



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**EPS VE ATIK LASTİK İÇEREN HAFİF  
DOLGUNUN PERFORMANSININ  
ARAŞTIRILMASI**

**Özcan DİKER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**HAZİRAN-2022**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Özcan DİKER

Tarih

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS

#### EPS VE ATIK LASTİK İÇEREN HAFİF DOLGUNUN PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

**Özcan DİKER**

**Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ**

**2022, 108 Sayfa**

**Jüri**

**Danışman Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ  
Prof. Dr. Murat OLGUN  
Dr. Öğr. Üyesi Esra URAY**

Geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan problemlerden birisi yumuşak ve kendini tutamayan zeminlerdir. Bu tür zeminlerin iyileştirme yöntemlerinden birisi de üzerine zemin dolgusu yerine hafif dolgular teşkil edilerek zemine etki eden yükleri azaltmaktır. Ayrıca hafif dolgular istinat duvarı gibi dayanma yapılarının geri dolgusunda kullanılarak yapıya gelen kuvvetleri azaltmaktadır. Benzer şekilde şehir merkezlerindeki yer altı yapılarına gelen yükleri azaltmak için de hafif dolgular kullanılabilir.

Bu çalışmada hafif dolgu malzemesi olarak EPS (Genleştirilmiş Polistiren Köpük), atık lastik, kum ve çimento malzemelerinden oluşan hafif dolgunun geoteknik özellikleri araştırılmıştır. Bunun için Taguchi Deney Tasarım Yöntemi ile tasarım tablosu oluşturulmuştur. Tasarımlarda ağırlıkça çimento/karışım (EPS+ atık lastik+ kum) oranı 8/1, 10/1, 12/1, 14/1 ve 16/1'dir. Tasarımlarda çimento/karışım oranı sabit tutulmuş, karışım içerisindeki EPS ve atık lastik ağırlıkça %10 ile %50 arasında değişen oranlar kullanılmıştır. Bir çimento/karışım oranı için 5 tasarım ve toplamda 25 tasarım oluşturulmuştur. Hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyi, Kaliforniya taşıma oranı (CBR), permeabilite deneyi ve donma çözülme deneyleri yapılarak hafif dolgu için uygun karışım oranı araştırılmıştır. 21. tasarımın 28 günlük kür süresi sonunda yoğunluğu  $1.342 \text{ g/cm}^3$  değerleri en yüksek bulunmuştur. 5. tasarımın 28 günlük kür süresi sonunda yoğunluğu  $0.360 \text{ g/cm}^3$  değerleri ile en düşük bulunmuştur. Deneyler sonucunda karışımlarda çimento oranının artmasıyla dayanımın arttığı ve EPS oranı arttığında ise dayanımın azaldığı görülmüştür. Bu tezde kullanılan oranlar dikkate alındığında tasarımlardaki atık lastiğin dayanımda etkili olmadığı anlaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Atık lastik, CBR, EPS, Hafif Dolgu, Serbest Basınç Dayanımı

## ABSTRACT

## MS THESIS

# INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF LIGHTWEIGHT FILL CONTAINING EPS AND WASTE TIRE

**Özcan DİKER**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Civil Engineering**

**Advisor: Asst. Prof. Dr. Atila DEMİRÖZ**

**2022, 108 Pages**

**Jury  
Asst. Prof. Dr. Atila DEMİRÖZ  
Prof. Dr. Murat OLGUN  
Asst. Prof. Dr. Öğr. Üyesi Esra URAY**

One of the problems encountered in geotechnical engineering is soft and inconsistent soils. One of the improvement methods of such soils is to reduce the loads acting on the ground by creating light fillings instead of normal ground fillings. In addition, the forces on the structure are reduced by using light fillings in the fillings of retaining structures such as retaining walls. Similarly, light embankments can be used to reduce the loads on underground structures in city centers.

In this study, the geotechnical properties of the light filling material consisting of EPS (Expanded Polystyrene Foam), waste rubber, sand and cement materials as light filling material were investigated. For this, a design table was created with the Taguchi Experimental Design Method. In the designs, the ratio of cement/mixture (EPS + waste tire + sand) by weight is 8/1, 10/1, 12/1, 14/1 and 16/1. In the designs, the cement/mixture ratio was kept constant, and EPS and waste rubber in the mixture were used at rates ranging from 10% to 50%. For the whole cement/mix ratio, 5 designs and a total of 25 designs were created. Unconfined compression test, California bearing ratio (CBR), permeability test and freeze-thaw tests were performed on the prepared samples and the appropriate mixing ratio was investigated. At the end of the 28-day curing period of the 21st design, the density of 1.342 g/cm<sup>3</sup> was found to be the highest. At the end of the 28-day curing period of the 5th pattern, the density was found to be the lowest with 0.360 g/cm<sup>3</sup> values. As a result of the experiments, it was observed that the strength increased with the increase in the cement ratios in the mixtures, and the strength decreased as the EPS ratio increased. Considering the ratios used in this thesis, it has been understood that the waste tire in the designs is not effective in strength.

**Keywords:** Waste Tire, CBR, EPS, Light filling, Unconfined Compression Test

## ÖNSÖZ

Yüksek Lisans eğitimim boyunca desteğini ve bilgi birikimini benden esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Atila Demiröz'e saygımı ve teşekkürlerimi sunarım. Beni yetiştiren bu günlere gelmemde maddi ve manevi olarak desteğini esirgemeyen değerli aileme saygı ve sevgimi sunarım. Çalışmam esnasında yardımlarını benden esirgemeyen Öğretim Görevlisi Alican Şenkaya'ya, Arş. Gör. Ekrem Burak Toka'ya teşekkür ederim. Yüksek Lisans eğitimim esnasında bana desteğine esirgemeyen değerli eşim Selda Diker'e teşekkür ederim.

Son olarak tez çalışmama desteklerinden dolayı Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkürlerimi sunarım.

Özcan DİKER  
KONYA-2022



# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Tezin Amacı.....	2
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>4</b>
2.1. Hafif Dolgu Malzemeleri .....	4
2.1.1. Genleştirilmiş polistiren boncuklar (EPS) .....	5
2.1.2. Atık Lastikler .....	13
2.2. Literatür Araştırması.....	17
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>26</b>
3.1. Malzeme Özellikleri .....	26
3.1.1. EPS (genleştirilmiş polistiren) boncukları .....	26
3.1.2. Atık lastik.....	27
3.1.3. Kum .....	28
3.1.4. Çimento.....	30
3.2. İstatiksel Deneş Tasarım Yöntemi .....	31
3.2.1. Taguchi Deneşsel Tasarım Yöntemi ile Deneş Tasarımı.....	31
3.2.2. Hafif dolgu malzemesinin deneş tasarım tablosunun oluşturulması .....	33
3.3. Deneş Numunelerinin Hazırlanması .....	34
3.4. Serbest Basınç Deneşleri .....	37
3.5. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneşleri.....	38
3.6. Donma- Çözülme deneşleri .....	40
3.7. Permeabilite Deneşleri .....	41
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA</b> .....	<b>43</b>
4.1. Serbest Basınç Deneşlerinin Sonuçları.....	43
4.1.1. Serbest basınç dayanım sonuçlarının ANOVA (varyans) analizi sonuçları .	53
4.1.2. 3, 9, 10, 15 ve 20 No'lu tasarımların serbest basınç dayanımı sonuçları .....	56
4.2. Donma Çözülme Deneşleri Sonuçları .....	61
4.3. CBR Deneşlerinin Sonuçları .....	62
4.4. Geçirimsizlik Deneşleri Sonuçları.....	65
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b> .....	<b>66</b>

5.1. Sonuçlar .....	66
5.2. neriler .....	68
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	
<b>EKLER .....</b>	<b>74</b>
<b>ÖZGEÇMİŐ .....</b>	<b>Hata! Yer iŐareti tanımlanmamıŐ.</b>



## Simgeler ve Kısaltmalar

### Simgeler

°	: Derece
A <sub>0</sub>	: İlk en kesit değeri
A <sub>f</sub>	: Uygulama sonrası en kesit değeri
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alüminyum oksit
C	: Santigrat
CaO	: Kalsiyum oksit
C <sub>c</sub>	: Eğrilik katsayısı
Cl	: Klor
cm	: Santimetre
C <sub>u</sub>	: Üniformluluk katsayısı
Ç	: Çimento
Ç/K	: Çimento/karışım oranı
D	: Çap
D <sub>10</sub>	: Efektif çap
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Demir (3) oksit
G <sub>s</sub>	: Özgül Ağırlık
H <sub>0</sub>	: İlk boy
i	: Hidrolik eğim
k	: Permeabilite katsayısı
K	: EPS+ Lastik+ Kum ağırlığı
kg	: Kilogram
kJ	: Kilojoule
kN	: Kilonewton
kPa	: Kilopaskal
L	: Boy
m	: Metre
m <sup>2</sup>	: Metrekare
m <sup>3</sup>	: Metreküp
MgO	: Magnezyum oksit
mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
N	: Newton
P <sub>max</sub>	: Maksimum yük
Q	: Debi
SiO <sub>2</sub>	: Silisyum dioksit
sn	: Saniye
t	: Zaman
w	: Doğal su muhtevası



$\gamma_k$  : Kuru birim hacim ağırlık  
 $\Delta H$  : Boy kısalma miktarı  
 $\varepsilon$  : Birim deformasyon  
 $\rho_s$  : Tane yoğunluğu



## Kısaltmalar

AB	:	Avrupa Birliği
AL	:	Atık Lastik
ANOVA	:	Tek Yönlü Varyans Analizi
ASTM	:	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
BASF	:	Badische Anilin & Soda-Fabrik
CBR	:	Kaliforniya Taşıma Oranı
CU	:	Konsolidasyonlu Drenajsız Deneyi
DIN	:	Alman Standardizasyon Enstitüsü
EPS	:	Genleştirilmiş Polistiren
ETREMA	:	Avrupa Lastik ve Kauçuk Üreticileri Derneği
IMF	:	Uluslararası Para Fonu
LASDER	:	Lastik Sanayicileri Derneği
OUK	:	Orhaneli Uçucu Külü
ÖTL	:	Ömrünü Tamamlamış Lastik
SBD	:	Serbest Basınç Deneyi
SP	:	Kötü Derecelendirilmiş Kum
UU	:	Konsolidasyonsuz Drenajsız Deney
XPS	:	Ekstrude Polistiren

## 1. GİRİŞ

İnşaat sektöründeki gelişmeler teknolojinin ilerlemesiyle birlikte hızla artmaktadır. İnsan nüfusunun çoğalmasıyla artan üst yapı ve alt yapı ihtiyacı ile birlikte zayıf ve problemlı zeminlerin kullanımı bir gereklilik haline gelmiştir. Buna bağılı olarak inşaat mühendisliğinin bir alanı olan geoteknik mühendisliğinde jet-grout, diyafram duvarlar, kazık çeşitleri ve birçok zemin iyileştirme çözümleri sürekli ilerleme göstermektedir. Bu çözümlerden birisi de kompozit malzemelerin inşaat sektöründe kullanılmasıyla, zemine ve yapılara gelen yükleri azaltmaktır. Bu sayede artan kompozit malzeme kullanımı ile yapı boyutları ve kullanılan donatı miktarı azalmaktadır. Zemine ve yapılara gelen yüklerin azaltılmasıyla ve proje gereksinimlerini karşılayabilecek dayanıma ve dayanıklılığa sahip kompozit malzemelerinin kullanımı yaygınlaşmıştır.

Kompozit malzemeler şu şekilde oluşur: En az iki farklı malzemenin bir araya gelerek kendi özelliklerinden farklı yeni özelliğe sahip malzeme ortaya çıkmaktadır. Oluşan yeni malzeme özellikleri, kullanılacağı alana yönelik ayarlanabilmektedir. Özetle en az iki malzemenin bir araya gelerek oluşturulan hafif dolgu malzemesi kompozit bir yapıya sahiptir. İnşaat sektöründe hafif dolgu malzemesi proje ihtiyacına göre istenilen dayanım ve dayanıklılıkta üretilebilmektedir. Burada hafif dolgu malzemesi, kendini tutabilen ve belirli dayanıma sahip bir malzemedir. Bundan dolayı kendini taşıyamayan zemin tabakaları üzerine gelen yükleri azaltmak amacıyla zemin iyileştirme metotlarından biri olan hafif dolgu, istenilen mukavemet ve dayanıklılığa sahip olarak üretilerek kullanılabilir. Bu şekilde zemine ve yapılara gelen yükleri azaltmak ve yumuşak zeminler üzerinde hafif dolgu malzemesi teşkil edilerek oturma ve taşıma gücü sorununa çözüm geliştirilebilmektedir.

Hafif dolgu oluşturulurken kullanılan malzemelerin birim hacim ağırlığı düşük ve bunların birleşimini sağlayan bağlayıcı malzeme kullanılmaktadır. Ağaç kabuğu, talaş, pomza taşı, uçucu kül, atık lastikler, polistiren köpük, cam köpüğü gibi zeminden hafif olan malzemelerdir.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte artan endüstriyel atıkların depolanması önemli bir sorun oluşturmaktadır. Bu atıklar zamanla insan sağlığını da tehlikeye atmaktadır. Örneğin; Birleşmiş Milletler ve IMF (Uluslararası Para Fonu) verilerine göre dünyada 2002 yılında 751 milyon olan motorlu araç sayısı 2030 yılında 1 milyar 660 milyon

seviyelerine ulaşacaktır (Topçu, Karakurt, & İşıkdag, 2014). Veriler incelendiğinde, otomobil sayısı ile birlikte artan atık lastiklerin ne şekilde yok edileceği problemi ortaya çıkacaktır (Fedroff vd., 1996). 1990'ların başında, kapsamlı araştırma projelerinde kullanılan atık lastikler çeşitli uygulamalarda kullanım alanı bulmuştur (Topçu, Karakurt, & İşıkdag, 2014). Atık lastiklerin hafif dolgu olarak kullanımı hem ekonomiye katkı sağlayacak hem de depolanan atık lastikleri kullanıma kazandırılmasına katkı sağlayacaktır.

Günümüze kadar yapılan çalışmalarda hafif dolgular bulamaç şeklinde veya sıkıştırılmış dolgu olarak uygulanmaktadır. İki uygulamada da dolgu malzemeleri olarak atık lastikler, ağaç kabuğu, talaş, ponza taşı, termik santral külü, termik santral uçucu kül gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bulamaç halindeki dolgularda hafif malzemeler ve bağlayıcı malzeme olarak genellikle çimento ile hafif dolgular teşkil edilmektedir.

Bu tez çalışmasında, EPS boncukları, atık lastik, kum ve çimentodan oluşan kompozit hafif dolgu malzemesi üzerinde laboratuvar deneyleri yapıldı. Bu kapsamda 25 farklı orana sahip hafif dolgu numuneleri hazırlandı. 7 ve 28 gün kür sürelerinde bekletilen numunelerin serbest basınç dayanımları belirlendi. Hafif dolgu malzemesi için uygun görülen dayanımlardaki numuneler üzerinde CBR, donma-çözülme ve geçirimsizlik deneyleri yapıldı.

### **1.1. Tezin Amacı**

Bu tez çalışmasında; EPS, atık lastik, çimento ve kum malzemelerinin belirli oranlarda karışımıyla oluşturulan kompozit hafif dolgunun mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Hafif dolgu numuneleri hazırlanırken zemin dolgusuna göre çok hafif olan EPS ve atık lastik oranları ağırlıkça karışım (EPS+ atık lastik+ kum) oranının %50 sine kadar arttırıldı. Tezin amacı, EPS, atık lastik, çimento ve kum malzemelerinden oluşan hafif dolgunun mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Hazırlanan hafif dolgu tasarımların serbest basınç dayanımı, yoğunluk, CBR değeri, geçirimsizlik katsayısı ve donma-çözülme deneyleri sonucunda serbest basınç mukavemetinin değişimi belirlendi. Oluşturulan kompozit hafif dolgunun zemine ve yapılara gelen yükleri azaltması ile yumuşak zeminler üzerinde hafif dolgu teşkil edilerek oturma, taşıma gücü sorununun çözümünde kullanılmasına katkı sunacağı düşünülmüştür. Bu tez araştırması beş bölümden oluşmaktadır:

- Birinci bölümde, tez çalışmasının amacı ve kapsamı hakkında bilgiler verilmiştir.
- İkinci bölümde, hafif dolgu hakkında literatür çalışması, atık lastikler, EPS köpüğü malzemelerin geoteknik özelliklerinden ve geçmişten günümüze kadar geoteknik alanındaki kullanımı hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.
- Üçüncü bölümde, tez çalışmasında kullanılan malzeme özelliklerinden ve yapılacak deneyler hakkında bilgiler verildi.
- Dördüncü bölümde, tez kapsamında yapılan deneylerin sonuçları verilmiştir.
- Beşinci bölümde, deneylerden elde edilen sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Hafif Dolgu Malzemeleri

Hafif dolgu malzemeleri talaş ve ağaç kabuğu gibi atıklardır. Endüstrinin gelişmesiyle oluşan yeni atık malzemeler ortaya çıkmıştır. Bu nedenle atık malzemelerin depolanması veya yok edilmesi problemine neden olmuştur (Topçu, Karakurt, & Işıkdag, 2014). Bu durum ilerleyen yıllarda çevre ve insan sağlığını tehdit edecektir.

Hafif dolguda endüstri atıklarından, kullanılmış malzemelerden yararlanılmaktadır. Bu malzemelere örnek olarak atık lastikler, termik santral uçucu külü ve çoğunlukla yalıtımda kullanılan genişletilmiş polistiren (EPS) boncukları hafif dolgu malzemeleri olarak gösterilebilir. Burada atık lastikler ve uçucu küllerin kullanımı çevre kirliliğini azaltılması ve insan sağlığını korunması açısından büyük önem taşımaktadır.

Hafif dolguların birim hacim ağırlığı zemin birim hacim ağırlığından düşük olduğu için yumuşak zeminlerin üzerine teşkil edilerek dolgu yükünü azaltır. Bu sayede zeminin oturması azalır. Kayma potansiyeli olan şevlerin üzerine teşkil edilerek şev gelen dolgu yükü azalmış olur. Şehir merkezlerindeki alt yapı üzerine uygulanarak zemin yükünü azaltır. İstinat yapılarının arkasına gelen zemin dolguları yerine kullanılarak istinat yapısına gelen yanal yükleri azaltarak daha ekonomik bir yapı elde etmek için hafif dolgular kullanılır.

Polistiren boncukların birim hacim ağırlığı 0.10 ile 0.50 kN/m<sup>3</sup> aralığında olması nedeniyle oldukça hafif bir malzemedir. Polistiren boncukların oldukça hafif olmalarında dolayı hafif dolgularda kullanılması dolgunun birim hacim ağırlığı düşürmektedir. Çizelge 2.1'de bazı hafif dolgu malzemelerinin birim hacim ağırlıkları verilmiştir. (Aksoy, 1998)

**Çizelge 2.1** Sıkıştırılmış haldeki bazı hafif dolgu malzemeleri (Aksoy, 1998)

Dolgu Cinsi	Birim Hacim ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> ) (Sıkıştırılmış haldeki)
Zemin	16-22
Talaş/Yonga/Ağaç kabuğu	3.5-10
Deniz kabuğu	-
Pomza taşı	6.5
Köpük beton	6
Kül (termik santral)	16- 18
Uçucu Kül (termik santral)	15.0- 18.5
Volkanik kül + Çimento + Köpük	10.00
Uçucu kül + Çimento + Köpük	5.40
EPS daneleri + çimento + uçucu kül	8.15-8.50
Oto Lastiği Parçaları	6.40-9.50
Polistiren Köpük	0.10-0.50

### 2.1.1. Genleştirilmiş polistiren boncuklar (EPS)

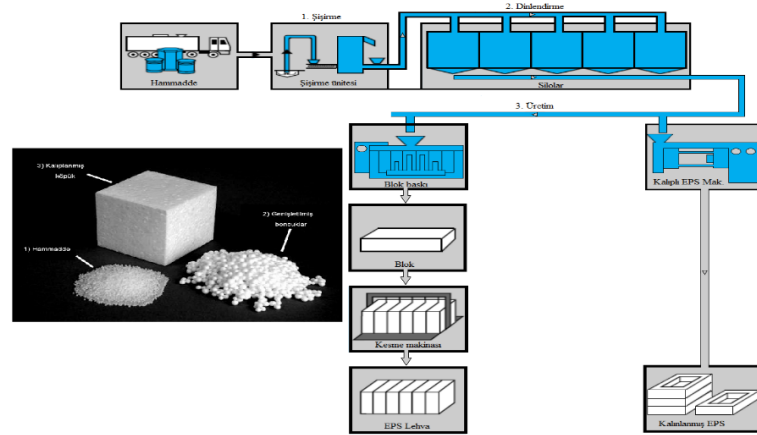
Polistiren, BASF şirketi tarafından 1929'da ilk üretimi yapılmıştır. 1949 yılında Fritz Stastny tarafından genleştirilmiş polistiren köpüğü üretilmiş ve Düsseldorf'ta "styropor" adıyla üretilmiştir. Genleştirilmiş polistirenin (EPS) ham maddesi, stiren etil benzenden üretilir. Petrol malzemesi olan EPS içerisinde karbon ve hidrojen bulunur. Öncelikli kullanımını ısı yalıtım malzemesi olsa da EPS dolgu malzemesi olarak inşaat mühendisliğinde kullanım alanı bulmuştur. Polistiren köpüğü ısı yalıtımı, hafif dolgu malzemesi, drenaj, titreşim sönümlleme ve zemin veya cephe kaplama elemanı olarak kullanılmaktadır.

Horvath (1995), genleşmiş polistiren köpük (EPS) ve ekstrude polistiren köpük (XPS) olarak iki türde ürettiği ürünlerin bloklarına "Geofoam" denir. EPS genel olarak rengi beyaz, XPS ise farklı renklerde üretilmektedir. EPS ve XPS malzemelerinin ayırt etmedeki temel fark dokularındadır. Genleşmiş polistiren tek tek hücreli polistiren boncuklara sahipken sert yapıda olan ekstrude polistiren daha tekdüze bir yapıya sahiptir (Kiriş, 2019).

#### 2.1.1.1. EPS Üretimi

Genleşmiş polistiren köpük, üç aşamada üretilmektedir. İlk aşamada ön genleşme yapılarak 80 ila 100 °C sıcaklıkta Stiren hammaddesi Pentan gazı ile ısıtılarak serbestçe şişirilir. Bu işlemde Stiren kendi hacminin 5 katına kadar büyütülerek boncuk halini alır (Şekil 2.1). Sonrasında soğumaya bırakılır ve Pentan gazı ile havanın yer değiştirmesi sağlanır. Son olarak ise boncuklar bir kalıba konularak buhar ile tekrar

genleştirilir ve boncukların birbirine yapışması/ kaynaşması sağlanır. Daha sonrasında kesilerek istenilen boyutlar elde edilmektedir.



Şekil 2.1 Genleşmiş polistiren köpüğün üretim aşamaları (Akpor, 2021)

### 2.1.1.2. Fiziksel ve mühendislik özellikler

İyi bir yalıtım malzemesi olan EPS; enerji emme özelliği olan, bazı zeminler kadar sertliğe ve taşıma gücüne sahip, oldukça hafif malzemelerdir. EPS boncuklar üretilirken stiren ham maddesi Pentan gazı kullanılarak belirli sıcaklıkta şişirilerek boncuklar şeklinde üretilir ve daha sonrasında pentan gazı ile hava yer değiştirir. Bu işlem sonucunda üretilen malzemenin içerisinde %98'i kapalı hava tanecikleri ve %2'si polistirenden oluşan EPS blokları üretilmiş olur. Üretilen levhaların yoğunluğuna bağlı olarak  $1\text{m}^3$  de 3-6 milyar arasında gözenekli hücreler bulunur. Şekil 2.2'de şişirilmiş polistiren boncukları ve Şekil 2.3'de polistiren köpüğü levha şeklinde görülmektedir.



Şekil 2.2 Pentan gazı ile ısıtılarak şişirilmiş polistiren boncukları





**Şekil 2.3** Levha şeklindeki polistiren köpüğü

EPS köpükleri, ASTM, DIN ve EN gibi standartlara uygun olarak üretimi yapılır. Avrupa standardı olan EN 14933, Türk Standartları Enstitüsü tarafından tercüme ettirilerek TS EN 14933 İnşaat Mühendisliği Uygulamaları için Isıl Yalıtım ve Hafif Ağırlıklı Dolgu Mamulleri – Fabrikasyonla İmal Edilmiş Genleştirilmiş Polistiren (EPS) – Özellikler adı altında 2004 yılında yayınlanmıştır. EPS köpüğün ASTM D6817’de verilen fiziksel ve mühendislik özellikleri Çizelge 2.2’de, TS EN 14933’ de verilen fiziksel ve mühendislik özellikleri Çizelge 2.3’de verilmiştir.

**Çizelge 2.2** Genleştirilmiş EPS köpüğün fiziksel ve mühendislik özellikleri (ASTM D6817)

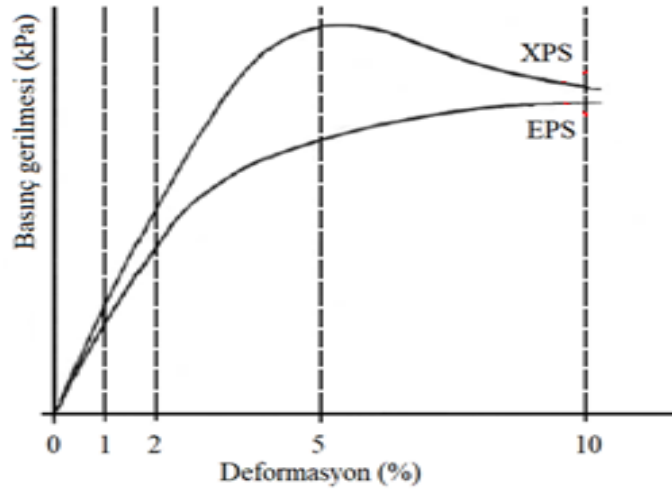
Cins	EPS 12	EPS 15	EPS 19	EPS 22	EPS 29	EPS 39	EPS 46
Birim hacim ağırlığı kg /m <sup>3</sup>	11.2	14.4	18.4	21.6	28.8	38.4	45.7
Basınç direnci min. (%1 deformasyonda) kPa	15	25	40	50	75	103	128
Basınç direnci min. (%5 deformasyonda) kPa	35	55	90	115	170	241	300
Basınç direnci min. (%10 deformasyonda) kPa	40	70	110	135	200	276	345
Eğilme direnci, min. kPa	69	172	207	276	345	414	517
Oksijen içeriği (hacimce %)	24	24	24	24	24	24	24

**Çizelge 2.3** Genleştirilmiş EPS köpüğün fiziksel ve mühendislik özellikleri (TS EN 14933)

Tip	EPS 40	EPS 60	EPS 100	EPS 120	EPS 150
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	12	16	20	24	30
min. Basınç dayanımı (%2 Deformasyonda)	20	30	60	80	100
min. Basınç dayanımı (%5 Deformasyonda)	30	50	80	100	120
min. Basınç dayanımı (%10 Deformasyonda)	40	60	100	120	150
min. Eğilme Dayanımı (kPa)	50	100	150	170	200

EPS köpüğünün en önemli özelliği düşük birim hacim ağırlığına sahip olup 8-40 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen yoğunluklardadır. Günümüzde EPS köpüğün ülkelerde ve kullanılan standartlara göre farklı yoğunluklarda kullanılmaktadır. 1.0 m<sup>3</sup> malzemenin kilogram ağırlığı ile orantılı olarak ASTM D6817 standardında EPS15, EPS19, EPS22 kullanımı ülkemizde oldukça yaygındır (Kiriş, 2019).

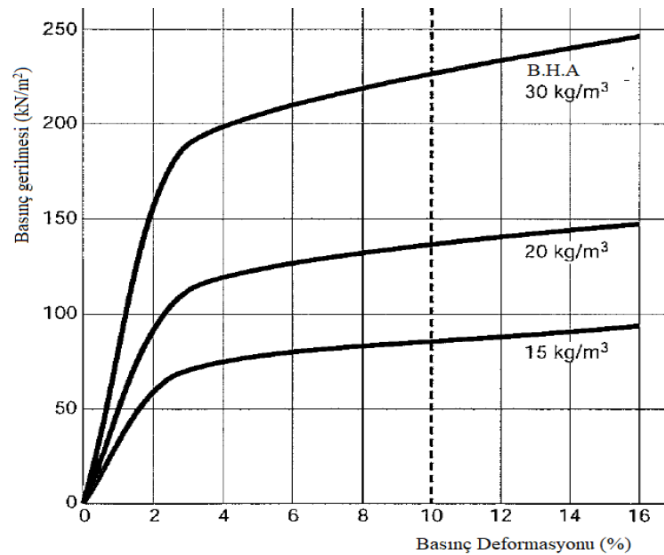
Genleşmiş ve ekstrude polistiren köpük malzemelerinin, serbest basınç deneyinde verdikleri basınç deformasyon grafiği birbirinden farklıdır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Polistiren köpüğün, basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme grafiği (Sander ve Snowdon, 1993)

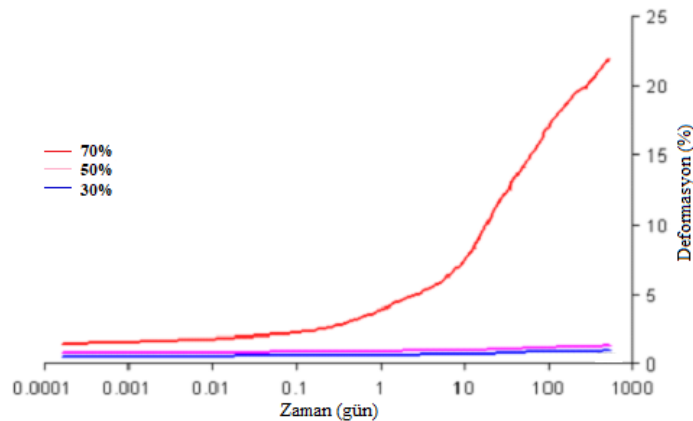
Şekil 2.4’de verilen grafikte genleşmiş polistiren %1-%2 deformasyon değişimine kadar, doğrusal elastik malzeme özelliği %2 deformasyondan sonraki basınç gerilmelerindeki küçük artışlarda, büyük şekil değişimleri, deformasyonun %10’u geçtikten sonra basınç dayanımında az miktarda bir artış görülmektedir.

XPS köpük doğrusal elastik malzeme özelliği göstermektedir (Şekil 2.4). Deformasyon kontrollü testlerde, %5 deformasyonda en yüksek basınç dayanımı verdiği saptanmıştır. Bu en yüksek gerilme değeri genelde malzemenin karakteristik basınç dayanım değeri olarak alınır. Yapılan deneylerde polistiren malzemesinin karakteristik basınç dayanımının %80’i büyüklüğündeki tekrar eden yükler etki ettirildikten sonra tekrardan karakteristik basınç dayanımını sağladığı görülmüştür. EPS, mühendislik çözümlerinde akmanın başladığı gerilme değeri önemlidir. Çünkü, akma gerilmesi aşıldığında plastik şekil değiştirmeler oluşacaktır. Genel olarak akma gerilmesi değeri %1 boy değiştirmeye denk gelen basınç gerilmesi değeri alınabilir. Şekil 2.5’de üç farklı yoğunluktaki EPS köpüğün basınç deformasyon eğrileri verilmiştir (BASF, 1998).



Şekil 2.5 Farklı EPS yoğunlukları için gerilme deformasyon grafiği (BASF, 1998).

Şekil 2.6'da sünme deneylerinde, sabit yükler uygulandığında uygulanan yükün artmasıyla oluşan sünme davranışı gösterilmiştir. Buradaki malzemeye mukavemetinin %30, %50 ve %70'i büyüklüğünde gerilmeler uygulandığında düşük gerilmeler ve sünmeler meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 2.6 EPS köpüğün farklı gerilme seviyelerindeki sünme davranışı (Elragi, 2000).

Polistirenin düşük poisson oranına sahip olduğu için yatayda çok düşük oranda yük aktarır. Blok EPS köpüklerde yapılan üç eksenli basınç deneyi sonucunda poisson oranı 0.01-0.02 değerler elde edilmiştir. Bu durumda poisson oranının hesaplamalarda sıfır olarak alınmıştır (Stark ve diğ., 2004).

EPS, düşük birim hacim ağırlığına sahip su emme potansiyelleri çok düşüktür. Kapalı boşluklu yapıya sahip oldukları için su emmezler (Kiriş, 2019). Malzemenin yapısındaki kılcal boşluklar yardımıyla az miktarda su girebilmektedir. Belirli aralıklarda su altında kalan EPS dolguları hacimce su emme değeri %4, su seviyesinin

üstünde kalan EPS dolgularda kılcal boşluklarda yükselen su seviyesi düşük çıkmaktadır (20 cm civarında). Kılcal boşluklarda yükselen su seviyesinin üstünde kalan bölgenin nem içeriği hacimsel olarak %1'i civarındadır. Sander ve Snowdon, (1993) tarafından yapılan deneyler sonucunda su emme oranının dolgunun dayanımına ve sıkışabilirliğine etkisinin çok az olduğu belirtilmiştir.

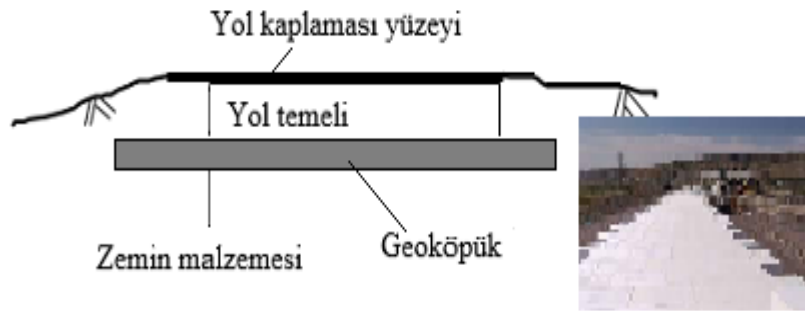
Polistiren köpük uzun süre dayanıklıdır. Fakat uygulama sürecinde, taşınmasında veya uygulama sonrasında maruz kalabilecek olumsuz etkilere karşı tedbir alınması gerekmektedir. Bazı olumsuz etkiler şunlardır:

- Dış etkilerden kaynaklı hasarlara maruz kalması,
- Ultraviyole ışınları ile temas etmesi,
- Petrol ve kimyasal ürünlere maruz kalma
- Sıcaklık ve alevin etki etmesi
- Kaza ile darbe alması

gibi sebeplerden dolayı zarar görebilir. Hasarlara maruz kalma durumu uygulama aşamasında oluşabilmektedir. Dikkatli davranılmalı ve korunmalıdır. Zemin örtüsü ile korunması sağlanabilir. Petrol ve kimyasal maddelerin temasından korumak için zemin şartlarına uygun membranlar ile koruma sağlanmalıdır.

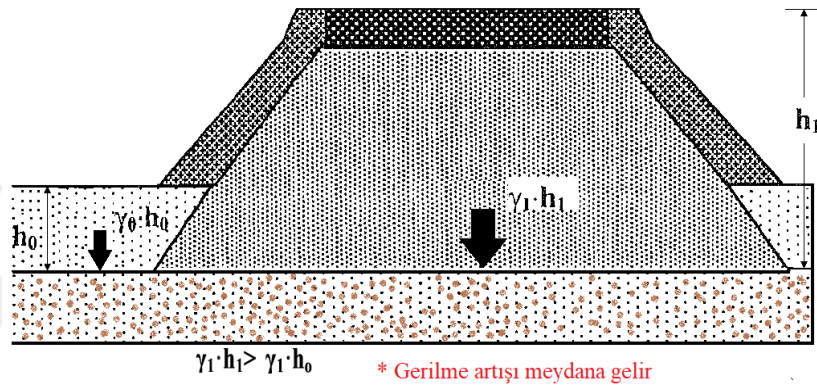
### 2.1.1.3. Geoteknik mühendisliğindeki kullanımı

EPS köpük bilindiği üzere birim hacim ağırlığı düşük, sıkışabilir, sönümleme gibi özellikleri olduğundan geoteknik mühendisliğinde farklı alanlarda kullanılmaktadır. 1960'lı yıllarda donma-çözölmeye maruz kalan yol dolguların kaplanmasında yalıtım malzemesi olarak EPS köpük malzemesi ilk defa kullanılmıştır (Şekil 2.7).

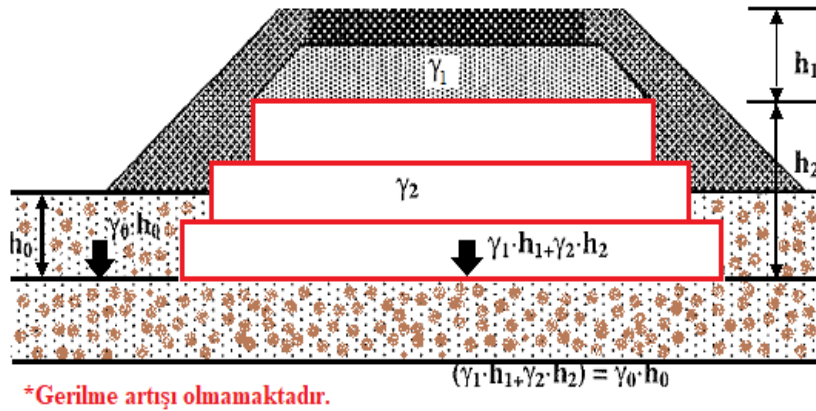


Şekil 2.7 EPS'nin yol kaplaması altında yalıtım amaçlı kullanımı (Horvath, 1999).

EPS köpükler, bloklarlar halinde dolgu teşkil edilerek düşey yükü azaltmaktadır. Bu sebeple kullanılan EPS köpük malzemesi oturma ve taşıma gücü sorunlarını çözmeyi amaçlar. Yol dolgularında taşıma ve oturma problemi olan zeminler üzerine uygulanan EPS köpük dolgusu uygulanabilmekte ve zemine aktarılan gerilmeler azaltılmış olmaktadır. Zemin dolgusundan daha hafif olduğu için alttaki zemine aktarılan gerilmeler çok az veya sıfıra yakın olmaktadır ve bundan dolayı taşıma gücü sorunu olmayacağından oturma problemi de kalmayacaktır (Şekil 2.8 ve 2.9).



Şekil 2.8 Zemin dolgusunda artan yüzey basıncı (Zou, 2001).



Şekil 2.9 EPS köpük ile yol dolgusu tasarımı (Zou, 2001).

EPS köpük şev güvenliğinin sağlanması amacıyla kullanılmaktadır. Kayma potansiyeli olan şevlerin üzerine yapılacak dolgularla kullanılarak şev duraylılığı sağlanmaktadır. Yol dolgusu yapılacak alanlarda şev stabilitesini artırmak için ihtiyaç duyulan yamaçlarda EPS bloklar ile çözüm sağlanabilmektedir.

EPS köpükler gömülü boru hatları ve menfez yapılarının koruması için de kullanılmaktadır. Boru hatları ve menfezler üzerine zemin dolgular yerine EPS köpük teşkil edilmesi bu yapıların üzerine gelecek yükleri azaltıcı etkisi olmakta ve oturmaları azaltmaktadır. EPS malzemesinin hafif ve sıkıştırma olmadan yerleştirilmesinden dolayı

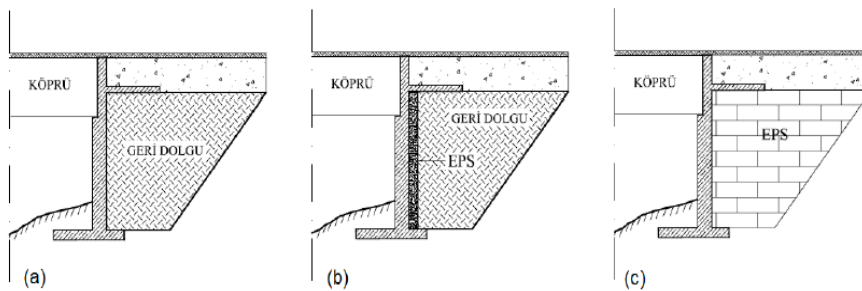
yapıların üzerine gelecek zeminin iyileştirme işlemi olmadan inşa etme rahatlığı sağlamaktadır. Gömülü boru hatları üzerine zemin ve dinamik yükler gelecek projelerde, hatları güçlendirmek yerine dolgu ağırlığı azaltılarak yapı inşa edilmektedir.

Şekil 2.10.a'da Utah'ta bulunan demiryolu güzergahi altında bulunan menfez üzerine EPS dolgu teşkili görülmektedir. (Bartlett ve diğ, 2015). Burada menfez üzerine EPS blokları teşkil edilerek menfeze ve temel zeminine gelen dolgu yükünü azaltılmıştır (Bartlett ve diğ, 2015). Şekil 2.10.b Eidsberg-Norveç'te E18 otoyolu inşası sırasında bir menfez (Tenor Menfezi) ait resim verilmiştir.



Şekil 2.10 EPS dolgu teşkili (Bartlett ve diğ, 2015, URL-1).

EPS; istinat duvarları, rıhtım duvarları gerisinde, menfez ve köprü ayakları gibi istinat yapılarının gerisinde kullanılarak statik ve sismik yanal basınçları önemli miktarda düşürmektedir. Yapıların gerisinde dolgu olarak kullanılarak, gelen yükleri azalttığı için yapı boyutlarının küçülmesini ve ekonomik olmasını sağlamaktadır. Ayrıca rijit yapıların gerisinde teşkil edilirse, zeminin hareket etmesine izin vererek sıkışır ve sükünetteki zemin basıncını aktif zemin basıncına dönüştürebilmektedir. Şekil 2.11'de EPS'nin geri dolgu olarak kullanımları verilmiştir.



Şekil 2.11 Rijit yapılarda a) EPS'siz durum b) EPS'nin sıkışabilir katman olarak teşkili c) EPS'nin hafif dolgu malzemesi olarak kullanımı (Kiriş, 2019).

### 2.1.2. Atık Lastikler

Araçlarda kullanılan lastiklerin ömrünü tamamlamış ve tekrar kullanılamayacak durumundaki lastiklere Ömrünü Tamamlamış Lastik (ÖTL) veya Atık Lastik (AL) olarak adlandırılır. Lastiklerin kullanımının sonlandırılması için belirlenen diş derinliğinin (binek taşıtlar için 1.6mm) altında olması durumunda taşıtlarda canlı hayatını tehlikeye attığı için kullanımı yasaklanmıştır. Ancak bazı araç lastikleri kaplama işlemi yapıp uygun olması halinde tekrar kullanılmakta, kullanılmayan atık lastikler ise depolanmaktadır.

Lastik Sanayicileri Derneği (LASDER) ülkemizde yılda 300.000 ton civarında atık lastik oluştuğunu belirtmiştir. Artan lastiklerin depolanması gelecekte insan ve çevre sağlığı için tehlikeli hale gelecektir. Depolanan atık lastiklerin geri dönüştürülmesi ekonomi ve çevre sağlığı açısından önemli olduğunu belirtmiştir (LASDER, 2021).

Lastik satan her üretici veya ithalatçı “Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği”ne göre kullanıcılara sattığı lastik miktarına göre gelecek yıl belli oranda lastik toplayarak geri kazanım sağlamak zorundadır. Ülkemizde bu oran %30-%80 sınırındadır.

Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde Avrupa Lastik ve Kauçuk Üreticileri Derneği (ETRMA-European Tyre & Rubber Manufacturers Association) atık lastikleri geri dönüşüme kazandırmayı planlamışlardır. Böylelikle AB ülkesinde üç farklı uygulama ile atık lastiklerin geri kazandırılması amaçlanmıştır (LASDER, 2021).

- **Vergi sistemi:** Bu uygulama sadece 2 ülkede uygulanmaktadır ve devlet her satılan yeni lastikten vergi almaktadır. Böylelikle atık lastikleri toplama ve geri kazandırma işlemini devlet yürütmektedir.
- **Serbest Sistem:** Bu sistem 3 ülkede uygulanmaktadır. Yeni lastik satılırken belirli bir “çevre katkı payı” alınmaktadır. Lastik satıcıları katkı payını toplama ve geri kazanımı yapan firmalara vermektedir.
- **Üretici Sorumluluğu:** AB ülkelerinin çoğunluğunda bu sistem uygulanmaktadır. Üretici/ithalatçı firmalar sattıkları lastiklerden “çevre katkı payı” almaktadır. Bu katkı payı ile atık lastiklerin toplama, taşıma ve geri dönüştürülmesiyle ilgili Yetkili Kuruluşlara devretmektedir.



ETRMA, 2019 yılında 3.555.611 ton atık lastik toplandığını ve bu miktarın satılan lastik miktarının %95'ine tekabül edildiğini ve toplanılan lastiklerin geri dönüşümde, enerji üretiminde kullanıldığını belirtmiştir. Ülkemizde toplanan atık lastik miktarı 227.509 tondur. 2018 yılında 3.573.900 ton lastik toplandığını ve 2019 yılında bu miktarın %1 oranında azalmış olduğu belirtilmiştir.

2019 yılında toplanan atık lastiklerin %3'ü inşaat mühendisliğinde, %40'ı enerjiye dönüştürülmede, %52'si geri dönüşüm malzemesi olarak kullanılırken %5'i stoklanmıştır. Atık lastikler toplandıktan sonra enerji üretimi, granül malzeme olarak kullanımı ve piroliz işlemi ile geri dönüşüme kazandırılmaktadır. Piroliz işlemi sonucunda piroliz yağı, karbon siyahı ve çelik tel ürünleri oluşur.

#### **2.1.2.1. Atık lastiklerin fiziksel özellikleri**

Lastiklerin yapısı birçok farklı malzeme ve katmanlardan meydana gelmektedir. Lastiklerin yapısında; %41 oranında doğal ve sentetik kauçuklar, %15 oranında güçlendirici malzemeler (çelik, polyester vd.), %6 oranında pekleştirici olarak yağ ve reçineler, %6 oranında sülfür ve çinko oksit gibi kimyasal malzemelerden ve diğer maddelerden oluşmaktadır. Lastikler ömrünü tamamladıktan sonra parçalanarak boyutlarına göre kullanılmaktadır. Bu şekilde kullanılan lastikler yine boyutlarına göre lastik yongası, toz lastikler ve şerit lastikler olarak adlandırılırlar.

#### **2.1.2.2. Lastik yongası**

Kırpıcı makine ile parçalanmış lastikler 1.3-7.6 cm arasındaki boyutlarda olan lastik parçalarıdır. Bu makinelere atılan atık lastikler 30-46 cm uzunluğunda ve 10-23 cm arasında kırılmış lastiklere ayrılır. Bu parçalanmış lastiklerin parça boyutları kesme makinasının modeline göre değişmektedir. Bu kırılmış lastikler ikinci bir kırpma işlemine tabi tutulmaları ile lastik yongaları ürünü elde edilmektedir (Şekil 2.12).



**Şekil 2.12** Lastik yongası



### 2.1.2.3. Granül lastikler

Atık lastiklerin kırpıcı makinelerde tekrarlı olarak parçalanmasıyla 1-12 mm arasında değişen granül lastik ürünleri meydana gelmektedir (Şekil 2.13). Araçlarda ömrünü tamamlayan lastikler parçalanarak farklı alanlarda kullanılmaktadır. Bu lastikler değişik hava şartlarında kullanılabilirliği, elastik özelliği ve çekme dayanımının olması tekrar kullanılmasını sağlamaktadır. Bu özelliklerden dolayı granül lastikler kaymaz yüzeyi ve esnek yapısı nedeniyle farklı yer kaplamalarında, çocuk park alanlarında, halı saha zeminlerinde, yer karoları imalatında, asfalt üretiminde ve farklı malzemeler için ham madde olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.13 Granül lastiklere ait görünüm

### 2.1.2.4. Toz lastik

Atık lastiklerin yeryüzünde çözümleri zor olduğundan dolayı günümüzde atık lastikler önemli bir sorun teşkil etmektedir. Atık lastiklerin parçalanmasıyla 1mm'den büyük 4.75 mm'den küçük çaptaki lastiklere toz lastik denir. Isı santrallerinde ve çimento üretiminde yakıt olarak kullanılmaktadır. Ayrıca atık lastik ile kum veya talaş ile birlikte harmanlanarak ahırlarda kullanılabilir. Atık lastiklerin içerdiği çelik teller toz lastiklerin içeriğinden ayrıldığı için yoğunluğu daha düşüktür.

### 2.1.2.5. Atık lastiklerin geoteknik özellikleri

Atık lastikler tekrarlı parçalanarak farklı şekil ve boyutlarda ürün halinde bulunurlar. Bu durum yığın halindeki parçalanmış lastiklerin yoğunluğunu etkilemektedir. Atık lastiklerin parçalanmış boyutuna bağlı olarak özgül ağırlığı 1.08-1.27 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişmektedir (Atabek, 2008). Çizelge 2.4'de atık lastik parçalarının boyutlarına ve göre yığın birim ağırlıkları verilmiştir. Kullanılmış lastik talaşları, kullanılmış lastik artıklarından daha incedir. Lastik yongalarının boyutları 1.3-

7.6 cm, minimum birim hacim ağırlığı 3.2-4.9 kN/m<sup>3</sup>, maksimum birim ağırlığı 5.7-7.3 kN/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir.

**Çizelge 2.4** Atık lastik parçalarının yığın birim ağırlığı (Atabek, 2008)

Yük (kPa)	Yığın birim ağırlığı (kg/m <sup>3</sup> )	Boyut (mm)
0	440-450	50×50
30-50	500-700	50×50
400	810-990	50×50
0	505-600	<38
0	620	38
9	690	38
18	730	38
0	580-630	51
9	660-690	51
18	700-730	51
0	630-640	76
9	720-730	76
18	780-790	76

Atık lastik parçalarının yığın birim ağırlığı sıkıştırma şekline, uygulanan yüke, parça lastik boyutuna ve çelik malzeme miktarından etkilenmektedir. Çizelge 2.5’de, atık lastik parçalarının boyutlarına göre özgül ağırlıkları verilmiştir. Atık lastik parçalarının üniform katsayısı 2.14’e, derecelenme katsayısı ise 1.26’ya eşittir. (Atabek, 2008)

**Çizelge 2.5** Atık lastik parçalarının boyutlarına göre özgül ağırlıkları (Atabek, 2008)

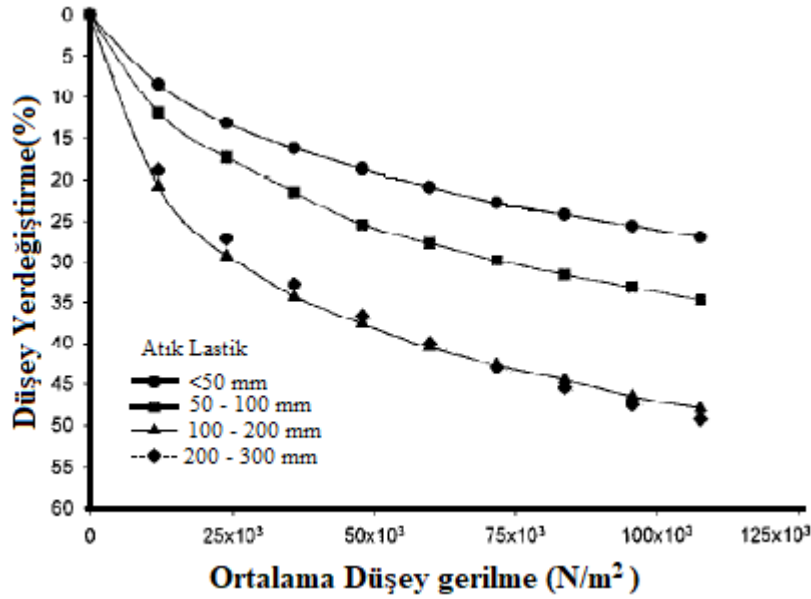
Atık lastik tipi	Boyut (mm)	Özgül ağırlık ( G <sub>s</sub> )
Çelik ve cam kuşaklı	-	1,05
Çelik kuşaklı	30-110	1.08- 1.36
Cam kuşaklı	-	1.02- 1.14
Çelik ve elyaf takviye karışımı	6- 150	1.13- 1.36
Metalsiz	-	1.15
Düz parçalar	10- 38	1.11
Granül	0.3- 19	1.08- 1.18
İnce uzun parçalar	0.3- 9.5	1.18
Pudra	0.1- 2	1.12
Çelik kayışlar olmadan	-	1.15
Çıkıntılı teller olmadan	13- 50	0.88- 1.13

Kullanılmış toz lastikler %2 ila %3.8, lastik parçaları ise %2 ila 4.3 su emebilir. Çizelge 2.6’da atık lastik yongaları ile yapılan üç farklı sıkıştırma testinin verileri verilmiştir. Bu veriler göre atık lastik yongalarının kuru birim ağırlığı, sıkıştırma enerjisinden az etkilendiği anlaşılmaktadır. Kullanılmış lastik parçalarının boşluk oranı 0.62 ile 0.96 arasında değişmekte ve gerilme arttıkça önemli ölçüde azalmaktadır (Atabek, 2008).

**Çizelge 2.6** Atık lastik yongaları ile yapılan üç farklı sıkıştırma testinin sonuçları (Atabek, 2008)

Deney	Birim hacim başına enerji (kJ/m <sup>3</sup> )	Darbe sayısı	Kuru birim ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )
Modifiye Proktor	2694,4	330	6,44
Standard Proktor	592,8	73	6,28
60 % Standart Proktor	355,7	44	6,28

Şekil 2.14'de farklı boyutlardaki atık lastik parçalarının sıkıştırılabilirliğini göstermektedir. 112.50 kPa düşey gerilme artışında %25-50 oranında düşey yer değiştirmelere sebep olduğu görülmektedir.

**Şekil 2.14** Farklı boyutlardaki atık lastik parçalarının sıkıştırılabilirliği (Atabek, 2008)

## 2.2. Literatür Araştırması

**Haşal (2000)**, yaptığı çalışmada dolgularda ve dayanma yapılarının arkasında kullanılması amacıyla hafif dolgu malzemesi üretmiştir. Malzemenin karışım bileşenleri Orhaneli uçucu külü (OUK), çimento ve köpük olup OUK üzerinde kompaksiyon, serbest basınç ve CBR deneyleri yapılmıştır. Karışımlar hazırlanırken ağırlıkça katı madde miktarı %55, su oranı %44.20 ve hava sürükleyici katkı miktarı % 0.80 dir. Toplam katı madde miktarı sabit tutulmuş kendi içerisinde uçucu kül %27.50-49.00 çimento %6-27.50 oranları arasında değiştirilmiştir.

Karışımlardaki çimento miktarı arttıkça numunelerdeki dayanım miktarının arttığı gözlenmiştir. Ağırlıkça çimento, OUK, hava sürükleyici katkı madde ve su oranları sırasıyla %27.50, %27.50, %0.80 ve %44.20 olan karışımın birim hacim ağırlığı 5.20-5.60 kN/m<sup>3</sup> arasındaki basınç dayanımı 7-28 gün sırasıyla 200-500 kPa, permeabilite katsayısı  $1.23 \times 10^{-6}$ - $1.45 \times 10^{-7}$  cm/sn, CBR değeri %6.40-%12 olarak

bulunmuştur. Deney sonuçlarında uçucu kül-çimento-köpük karışımının çok yumuşak ve oturması devam eden zeminler üzerine hafif dolgular teşkil ederek oturma ve taşıma gücü problemlerinin çözümünde, kayma olasılığı yüksek olan şevlerin üzerine dolgu yapılmasında dayanma yapılarına gelen kuvvetlerin azaltılmasında kullanılabilirliği tespit edilmiştir. Karışımın hafifliği ve katılaştıktan sonra kendini tutması nedeniyle yanal basınçları azaltacağı vurgulanmıştır.

**Pierce ve Blackwell (2002)**, hafif bir malzeme üretmek için akıcı dolgudaki kumun atık lastik ile değiştirilmesi üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır. Bunun için kamyon lastiklerinden elde edilen atık lastik, çimento, ağırlıkça %0.5 oranında akışkanlaştırıcı ve F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Tasarıma ait oranlar Çizelge 2.7'de verilmiştir.

**Çizelge 2.7** Atık lastik içeren akışkan hafif dolgu karışım oranları

Karışım tanımı	Su/Çimento oranı	Su/çimentolu malzeme oranı	Atık lastik	
			Ağırlıkça %	Hacimce %
1.5-24-F	1.5	0.6	2.45	48
1.75-23-F	1.75	0.7	23.2	46
2-22-F	2	0.8	22.2	44
2-22	2	0.9	22.3	44
2.5-21	2.5	1	20.5	40
3-19	3	1.2	19	37
3-29	3	1.6	28.5	48
3-38	3	2.4	38	57
4-17	4	1.6	16.6	32

Çalışma sırasında akışkanlık, hacim stabilitesi (hava alma) ve donma (priz) süresi bulunmuştur. Hazırlanan numunelerin priz süresi 24 saatten az olması amaçlanmıştır (ACI, 1999). Atık lastiğin, akışkan dolgu için teknik açıdan faydalı, çevreye zarar vermeyen ve ekonomik olarak uygun agrega olduğunu belirtmiştir. Deney sonuçlarından, atık lastik akışkan dolgu için kum yerine kullanılabilmesi, ağırlıkça %38 oranına kadar kullanıldığında karışımda ek bir katkı malzemesi kullanılmadan ayrışma olmayacağı sonucuna varılmıştır. Ayrışmayı kontrol etmek için karıştırma hızı, karıştırma süresi ve uçucu kül oranı artırılması gerektiği sonucuna varmıştır. Hafif dolgu, minimum mukavemet gereksinimlerini karşılayacak kadar dayanıklı ve gelecekte kazılabilecek dayanımdadır. Atık lastik ile üretilen hafif, akışkan bir dolgu, inşaat sektöründe, zemine daha az yük aktardığı, özellikle yumuşak ve sıkıştırılabilir zeminlerde dolgu yapıldığında oturmayı azaltacağını belirtmiştir. Ayrıca atık lastik, akışkan dolguda kullanıldığında süneklik ve daha yüksek ısı yalıtımı gibi faydalar sağlayacağını da belirtmiştir.

**Hagni ve diğ., (2006)**, yaptıkları çalışmada yeni bir hafif beton yapmak için farklı boyutlarda genişletilmiş polistiren (EPS) boncuklar, çimento ve Poliamid-66 iplikler kullanmıştır. Kullanılan EPS boncuklarının boyutu 3, 6 ve 8 mm, yoğunlukları  $12 \text{ kg/m}^3$ ,  $16 \text{ kg/m}^3$  ve  $20 \text{ kg/m}^3$  dür. 3, 7 ve 28 günlük kür sürelerinde serbest basınç testi yapmışlardır. Kür süresi arttıkça ve tanecik boyutu küçüldükçe dayanımın arttığını belirtmişlerdir. Basınç dayanımının yoğunluğuna ve kullanılan EPS boncuklarının boyutlarına bağlı olduğunu poliamid-66 ipliklerinin kullanılması çatlakların azaltılmasında önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

**Liu ve diğ., (2006)**, yaptıkları çalışmada polistiren boncukları, zemin, çimento ve su ile oluşturulan hafif dolgu tasarımların ağırlıkça oranları Çizelge 2.8' verilmiştir. Hazırladıkları tasarımlarda hafif dolgunun yoğunluğu, serbest basınç dayanımlarını araştırmışlardır. Deneylerde kullanılan boncukların boyutları 2 ile 4mm arasında ve zemin yumuşak siltli kildir. Karışım oranı, ağırlığa göre iki bileşenin, örneğin su/zemin çimentodan zemin ve polistiren boncuklarının zemine oranı olarak değerlendirilmiştir (Çizelge 2.8).

**Çizelge 2.8** Polistiren bocukları, çimento ve zemin ağırlıkça oranları

Su/zemin (%)	Çimento/zemin (%)	Polistiren boncuk/zemin (%)
50	15	4
50	20	2
60	10	2, 3, 4, 5, 6
60	15	2, 3, 4, 5, 6
60	20	2, 3, 4, 5, 6
60	25	2, 3, 4, 5, 6
70	10	2
70	15	2
70	15	4
70	20	2
70	25	2
80	15	4
80	20	2
90	15	4
90	20	2

Deney sonuçlarından polistiren boncukları, çimento, zemin ve su ile karıştırılmasıyla hafif bir dolgu malzemesi üretilebileceği ve yoğunluğun  $700-1100 \text{ kg/m}^3$  aralığında olacağını belirtmişlerdir. Numunelerin 28 günlük serbest basınç deney sonuçları dolgu malzemeleri için mukavemet gereksinimlerini karşılayan 100 - 510 kPa değerlerinde olduğu belirtilmiştir. EPS blok ile karşılaştırıldığında, polistiren boncukları ile hazırlanmış hafif dolgu malzemesinin yoğunluğu, sertliği ve dayanımı daha

yüksektir. Düzensiz hacimlerin doldurulması durumunda veya daha dayanıklı dolgu malzemesi gerektiğinde kullanılabilceğini belirtilmiştir.

**Atabek (2008)**, yaptığı çalışmada kullanılmış lastik granülleri ve parçalarının, kum numunelerinin geoteknik özelliklerini araştırmıştır. Standart Proctor deneyini kum, atık lastik granülleri ve parçalarında, geçirimsizlik ve kesme kutusu deneyini lastik granülleri, lastik parçaları, kum, lastik granülü+ kum ve lastik parçası+ kum numuneleri/ karışımları üzerinde yapmıştır. Daha sonrasında kum, çimento, lastik granül veya lastik parçalarından oluşan kompozit karışımlar üzerinde serbest basınç ve CBR deneyleri yapmıştır. Yapılan deneylerde lastik parçalarının özgül ağırlığını 1.23 g/cm<sup>3</sup>, lastik granüllerinin özgül ağırlığını 1.10 g/cm<sup>3</sup> olarak bulmuştur. Karışımlarda hacimce kum/lastik oranlarını 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 ve su/çimento oranı 1 olarak sabit tutulmuştur.

Yapılan deney sonuçlarından, kullanılmış lastik granülleri, kum ve kullanılmış lastik granül karışımları, düşük özgül ağırlıkları ve doğal birim ağırlıkları nedeniyle hafif dolgu malzemeleri olarak kullanılabilirliği, kullanılmış lastik granülleri ve parçaları dolgu olarak kullanıldığında sivilaşma olma ihtimaline karşın kum ile karışımların birlikte hazırlanmasını, kum ile kullanılmış lastik granüllerinden oluşan karışımın şev stabilitesi tasarımında ve kullanılmış lastik granülleri, kumlu zeminleri stabilize etmek için katkı olarak kullanılması önerilmektedir.

Hazırlanan çimento, kullanılmış lastik granülleri ve kumdan oluşan kompozit malzemenin zemin stabilizasyonu, karayollarındaki kum dolguların CBR değerlerini arttırdığını ve permeabilite katsayısını düşürdüğünü belirtmiştir. Kullanılmış lastik granüllerinin zemin dolgularında kum veya çimento ile birlikte kompozit malzeme olarak kullanımı, giderek artan atık lastiklerin ekonomiye kazandırılmasında çözüm olacağını belirtilmiştir.

**Wang ve Miao, (2009)**, yaptıkları çalışmada otoyol dolgusu için Yangzi Nehri kumu, çimento ve EPS boncuklarından oluşan yeni bir dolgu malzemesi üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Bir dolgudaki malzemenin uygunluğunu ve performansını araştırmak için hem deneysel hem de sayısal çalışmalar yapılmıştır. Laboratuvar deneyleri ve sayısal modelleme sonuçlarına dayanarak şu sonuçları çıkarmışlardır:

1. Çalışmadaki dolgu malzemenin birim ağırlığı, kum/çimento ve EPS boncuklarının 1:1 hacim oranlarına bağlı olarak 10 kN/m<sup>3</sup> tür. Malzemenin serbest basınç dayanımı, çimento içeriği ve kürlenme süresi ile artmıştır.
2. Konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) ve konsolide-drenajsız (CU) testleriyle kohezyonun çimento içeriğinden büyük ölçüde etkilendiğini, ancak sürtünme açısının hemen hemen aynı olduğunu belirtilmiştir.
3. Sayısal analiz, hafif zemin dolgusu oturmasının, genel kireçle stabilize edilmiş zemin setininkinden önemli ölçüde daha az olduğunu göstermiştir. Çalışmadaki hafif dolgunun Yangzi Nehri deltasında eksik olan zemin ihtiyacına çözüm olacağı ve nehir yatağı yüksekliğini korumak için kaldırılması gereken nehir kumunun kullanılabilmesi belirtilmiştir.

**Ahmedov (2012)**, hafif dolgu malzemesinin geoteknik özelliklerini belirlemiştir. EPS, kum ve çimentodan oluşan karışımdaki malzemelerin ilk olarak polistiren köpüğü ve kumun özgül ağırlıklarını, rölatif sıkılıklarını belirlemiş kesme kutusu deneyleri yapmıştır. Karışımdaki ağırlıkça EPS oranı %25, %50, %75 ve %100 seviyelerinde artırılıp kum oranı azaltılmış ve çimento oranı ilk başta karışıma oranla çimento/karışım oranı 6/1 seçilmiştir. Serbest basınç deneyinde yeterli dayanımı sağlamadığı için çimento/karışım oranını 12/1 seçerek serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Bu karışımlarda su/çimento oranı 0.45 olarak sabit tutulmuştur. Serbest basınç değeri uygun olan %50 EPS içeren karışım seçilerek CBR ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. EPS oranı %50 ve çimento/karışım oranı 12/1 olan karışımın serbest basınç değerleri 7- 28 günleri sırasıyla ortalama 221.14- 415 kPa, CBR deneyinde 7 günlük CBR değerinin ortalama %6, 28 günlük CBR değerinin ortalama %7 ve permeabilite katsayıları 7 ve 28 gün sırasıyla ortalama  $4.84 \times 10^{-2}$  ve  $4.55 \times 10^{-2}$  cm/s bulunmuştur.

Deney sonuçları ile literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırıldığında çimento, EPS ve kum numuneleri oluşturulan hafif dolgu kullanıldığında şev kaymasını azaltacağı belirtilmiştir. Çalışma sonucunda tasarımların dayanımı ve birim hacim ağırlığı zemin dolgusundan hafif ve dayanımının fazla olduğu belirtilmiştir. Ağır olan yapısal yükleri taşımak için uygun olmadığı, bunun yanında yol dolgularında kendi ağırlığından başka yüklerin gelmeyeceği şevlerin dolgusunda kullanılabilmesini belirtmiştir.

**Najmaddin (2012)**, yaptığı çalışmada atık strafor ve dere kumu karışımının hafif dolgu malzemesinin standart, modifiye kompaksiyon ve CBR deneyleri ile özelliklerini belirlemiştir. Küp şeklindeki atık straforları fırında 130 °C’de 15 dakika bekleterek karışımda ağırlıkça %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kullanmıştır. Fırında ısıtılmadan önce bir kenarı 10 mm olan atık küp şeklindeki straforların yoğunluğu 0.06 g/cm<sup>3</sup> iken fırında bekletildikten sonra bir kenarı 5 mm ve yoğunluğu ise 0.48 g/cm<sup>3</sup> olarak bulmuştur. Yapılan iki kompaksiyon deney sonuçlarında ağırlıkça kumun içindeki EPS oranları arttıkça maksimum kuru birim ağırlığın 1.90 g/cm<sup>3</sup>’ten 0.947 g/cm<sup>3</sup>’e azaldığı görülmüştür. Karışımlarda atık strafor oranı arttıkça CBR değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Standart proktor ile hazırlanan numunenin 2.50 mm penetrasyon için strafor oranı artarken, CBR değeri %41’den %17’ye inmiştir, 5 mm penetrasyon için strafor oranı artarken, CBR değeri %48’den %21’e inmiştir. Modifiye proktor ile hazırlanan numunelerde 2.50 mm penetrasyon için strafor oranı artarken CBR değeri %49’den %22’ye 5 mm penetrasyon için strafor oranı artarken CBR değerinin %60’den %49’a indiği görülmüştür.

Atık strafor ve kum karışımı istinat duvarı geri dolgusunda kullanılabileceği ve istinat duvarına gelen yükleri azaltarak tasarım maliyetinde azalma sağladığını belirtmiştir. Karışım aynı zamanda köprü ayaklarının dayanağında hafif dolgu olarak da kullanılabilir ve özellikle zeminin yumuşak veya sıkıştırılabilir olduğunda oturmayı azaltmak için yollarda, pistlerde, temel ve alt temel dolgusu olarak kullanılabilirliğini belirtmiştir.

**Tuncel (2012)**, yaptığı araştırmada cam köpüğü, kum ve çimento malzemelerinden oluşan kompozit hafif dolgu malzemesinin geoteknik özelliklerini araştırmıştır. Çalışmada üç farklı granülometride cam köpüğü malzemesi kullanılarak serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan karışımlarda çimento/su 0.7 ve çimento/cam köpük oranı 3 olarak seçilerek tane birim hacim ağırlıkları ve 7 günlük serbest basınç dayanımlarını incelemiştir. 7 günlük dayanımı 0.12 Mpa ve 2.04 kN/m<sup>3</sup> birim hacim ağırlığındaki cam köpük seçilerek, kumun etkisini araştırmak için kum/cam köpüğü yüzdesini %0, %25, %50, %75 ve %100 olacak şekilde numuneler hazırlanarak serbest basınç deneyleri yapmıştır. Karışımlarda su/çimento oranını 0.7 ve çimento/granüle malzeme oranını 1, 2 ve 3 tür. Su/çimento oranı ayrışma nedeniyle 0.45’e düşürülmüştür. Cam köpüğünün %50, kumun %50 ve çimento/(köpük+kum)



oranının 2 olduğu karışımın hacim ağırlığı  $8.83 \text{ kN/m}^3$ , 7 ve 28 günlük serbest basınç değerleri sırasıyla ortalama 0.75 MPa ve 0.91 MPa değerleriyle hafif dolgu malzemesi olarak uygun olduğu görülmüştür. Uygun karışım üzerinde CBR ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. Karışımın 7 ve 28 günlük CBR değerleri sırasıyla 38.40 78.90 permeabilite katsayıları  $7.28 \times 10^{-3} \text{ cm/sn}$  ve  $7.05 \times 10^{-3} \text{ cm/sn}$  olarak belirtilmiştir.

Deneyler sonucunda karışımın temel veya alt temel uygulamaları için yeterli olduğu belirtilmiştir. Cam köpüğü-kum-çimento kullanılarak oluşturulmuş hafif dolgu çok yumuşak zeminler üzerinde kullanılabilceği, oturma ve taşıma gücü problemlerinin çözümünde, kayma potansiyeli yüksek olan şevler üzerinde dolgu oluşturulmasında, dayanma yapılarına gelen kuvvetlerin azaltılmasında kullanılabilceği belirtilmiştir.

**Alqaissi (2012)**, araştırmasında iki farklı 5-9 mm ve 10-20 mm boyutlarında atık lastik kullanarak dolgu hazırlamış ve CBR değerlerini araştırmıştır. Bunun için kuma ağırlıkça %0, 10, 20 ve 30 oranlarında atık lastik eklemiş ve CBR deneyi yapmıştır. Sonuç olarak 5-9 mm boyutundaki atık lastik yüzdesi %20 iken yaklaşık %29, 10-20 mm boyut için %19.50 CBR değerleri bulmuştur. Atık lastik kullanılması durumunda, taşıma kapasitesini iyileştirdiği, temelin yük-yerleşme davranışını değiştirdiği ve oturmaya yaklaşık %22 oranında azalttığı belirtmiştir.

**Miao ve diğ., (2013)**, genişletilmiş polistiren boncuk (EPS), Yangtze Nehri kumu ve çimento malzemelerinden oluşan hafif dolgu malzemesinin standart Proctor testi, serbest basınç, CBR, konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) ve konsolide-drenajsız (CU) deneyleri ile karışımın özelliklerini belirlemişlerdir. Yangtze Nehrinden alınan kumun 2 mm'den büyük daneler karışımında kullanılmamıştır. EPS boncuklarının boyutları 2 mm'dir. Standart proktor, CBR ve serbest basınç deneylerinde kum ağırlığına göre %6, %7, %8, %9 ve %10 oranlarında çimento ve 5:5 oranında kum/ EPS kullanmıştır. Ayrıca %7 oranında çimento içeriğinde ve kum/ EPS hacimce 5:5, 6:4 ve 7:3 oranlarında numuneler hazırlanarak farklı EPS oranlarında standart proktor deneyi yapmıştır. Serbest basınç deneyinde  $70.70 \times 70.70 \times 70.70 \text{ mm}$  boyutlarında numuneler hazırlanmış, 7. ve 14. günlerde testler yapılmıştır. Deney sonuçlarından;

- Çimento, kum-EPS boncuk hafif dolgusunun maksimum kuru yoğunluğu, kireçle stabilize edilmiş zemin dolgusundan çok düşüktür. Optimum su içeriklerinin %7 çimento içeriğinde her üç dolguda %16-%17 arasında

değiştirdiği belirtilmiştir. Hafif dolgunun optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluğunun çimento içeriğinden önemli ölçüde etkilenmediğini göstermiştir.

- Hafif dolgu, serbest basınç deneyinde sünek davranışa sahip ve zemin dolgusu için Çin şartnamelerine göre (JTG D30-2004) karayolu zemin dolgusu için gerekli CBR değeri olan %4'ün üzerinde çıktığı belirtilmiştir.
- Sahada hafif dolgu teşkil edilerek kum koni testleri ve CBR testlerinin sonuçlarına göre karayolu dolgu yapımı için kullanılan hafif dolgu malzemesinin uygunluğu doğrulandığı belirtilmiştir.

**Topçu ve diğ., (2014)**, yaptığı çalışmada atık otomobil lastiklerini agrega gibi kullanılarak harçlar oluşturmuş, mekanik ve fiziksel özelliklerini araştırmışlardır. Yaptıkları deneylerde üç farklı dane boyutunda (0-1mm, 0-2mm ve 0-3mm) kum yerine hacimce %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında lastik agregası kullanılmıştır. Kullanılan kum 2.68 özgül ağırlığında olan Standart Rilem kumudur. Atık lastik oranı arttıkça harçların birim ağırlıklarında 2.2 kg/dm<sup>3</sup> den %25'e varan oranlarda düşüş olmuştur. Harç numunelerinde %30 ve üzeri atık lastik kullanımında işlenebilirliğin arttığı görülmüştür.

Deney sonuçlarında atık lastik miktarının artmasıyla birlikte birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı azalmıştır. Azalma 0-3 mm atık lastik içeren numunelerde daha açıktır. Sonuç olarak atık lastik kullanılan harçların düşük birim hacim ağırlık istenen durumlarda veya düşük taşıyıcılık özelliği istenen durumlarda kullanılabilirliği önerilmiştir.

**Karaman ve Ecemiş, (2017)**, araştırmada kum-kırpıntı lastik malzemelerini kullanarak dolgu malzemesi hazırlamıştır. Kırpıntı lastikler, 2.5-5mm ve 5-10mm arası çaplarda iki ayrı numune kullanılmıştır. Karışımda toplam hacmin %10, 20 ve 30 oranında lastikleri kum ile karıştırılmıştır. Toplam hacime oranı ve farklı çapların sınırlama potansiyeline etkisini araştırmak için laboratuvarında sarsma tablası deneyi yapmıştır. Sonuç olarak, lastik kum karışımının sınırlama direnci temiz kumun sınırlama direncinden fazla çıktığını bulmuştur. Sınırlama direncinin 5-10mm çapındaki lastikler ile hazırlanan dolgunun 2.5-5mm çapındaki lastikler ile hazırlanan dolguya göre daha yüksek çıktığını belirlemişlerdir. Lastik kırıntılarının deney sırasında ve sonrasında aşırı boşluk suyu basıncını azaltan özellikte olduğu sonucuna varmıştır. Kullanılan

çaplarda %20 oranına kadar lastik kullanıldığında sıvılaşıma direncinin arttığı belirlenmiştir.

**Syahril ve diğ., (2018)**, yaptıkları çalışmada Endonezya'nın Batı Java eyaletinde alınan kil zemin, F sınıfı uçucu kül ve EPS boncuklarından oluşan hafif dolgu malzemesi üzerinde standart kompaksiyon, serbest basınç ve konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) testleri yapılmıştır. Hazırlanan numunelerde F sınıfı uçucu külün kuru zemin ağırlığının %25 olarak sabit tutulmuş, EPS oranları kuru zemin ağırlığının %0, %0,2, %0,4, %0,6 ve%0,8 alınarak karışımlar hazırlanmıştır.

Test sonucu, EPS içeriği arttıkça kil zemin-uçucu kül-EPS karışımlarının kuru birim ağırlığının, optimum nem içeriğinin, serbest basınç dayanımının ve kohezyonun azaldığı görülmüştür. Hafif dolgu malzemelerinin yumuşak zemin üzerinde dolgu yapılması durumları için zemin iyileştirme çözümlerinden biri olma özelliğine sahip olduğu, zemin dolgu malzemelerine kıyasla yumuşak zeminlerin deformasyonunu azaltabileceğini belirtmiştir. Ayrıca hafif dolgu karışımının normal zemine benzer esnekliğe sahip olması bu nedenle zeminde daha uyumlu bir şekilde yer kaplayabilir ve dayanımı bağlayıcı madde içeriği veya türü değiştirilerek ayarlanabileceğini belirtmiştir.

**Shariatmadari ve diğ., (2020)**, yaptıkları çalışmada karbonatlı kum ve lastik karışımının kesme kutusu deneyi ile mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Kum numunesine hacimce %10, 20 ve 30 oranında 2-3.35 mm arasında atık lastik ekleyerek numuneler hazırlamış, test sonuçlarından atık lastik hacmi arttıkça numunenin kesme dayanımı azaldığı ve sertleşme davranışının kaybolduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde hem içsel sürtünme açısını hem de karbonat kumlarının partikül kırılmasını azalttığını belirlemişlerdir. Granül lastik ve karbonatlı kum tasarımı, sünekliği nedeniyle sismik izolasyon olarak kullanılabilirliğini belirtmişlerdir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Malzeme Özellikleri

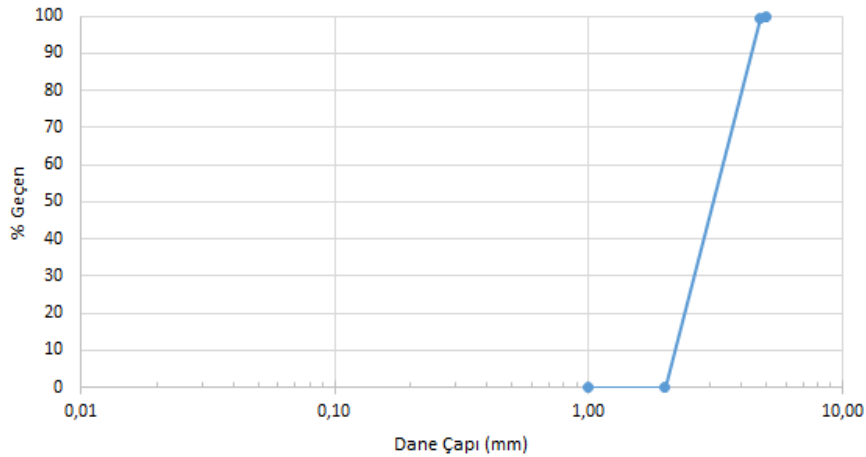
##### 3.1.1. EPS (genleştirilmiş polistiren) boncukları

EPS boncukları ülkemizde üretim yapan Akpor Yalıtım firmasından temin edilmiştir. EPS boncukları kullanımına göre farklı yoğunluklarda üretimi yapılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan boncuklar yuvarlak, 2-5 mm arasında değişen çaplarda ve yoğunluğu  $0.016 \text{ gr/cm}^3$ 'tür (Şekil 3.1)



Şekil 3.1 Hafif dolguda kullanılan genleştirilmiş polistiren (EPS) daneleri

EPS boncukları üzerinde TSE 1900-1 standardına göre elek analizi deneyleri yapılmıştır. Deneye ait tane dağılımı eğrisi Şekil 3.2'de verilmiştir. Elek analizi sonucuna göre zeminin efektif çapı ( $D_{10}$  %10 dan geçen danelere karşılık gelen çap) 2.25, üniformalık katsayısı ( $C_U = D_{60} / D_{10}$ ) 1.47 ve süreklilik katsayısı ( $C_C = D_{30}^2 / D_{10} \times D_{60}$ ) ise 0.98 olarak bulunmuştur. Çizelge 3.1'de ise EPS danelerinin fiziksel özellikleri verilmiştir. Elek analizi deneyi sonucuna göre EPS boncuklarının 2.0-4.75 mm arasında kaldığı görülmüştür (Şekil 3.3).



Şekil 3.2 EPS boncukların tane dağılım eğrisi



Şekil 3.3 Elek analizi deneyine ait görünüm

Çizelge 3.1 EPS danelerinin fiziksel özellikleri

Tane yoğunluğu ( $\rho_s$ ) (g/cm <sup>3</sup> )	0.016
Efektif çap ( $D_{10}$ )	2.25
Üniformluk katsayısı ( $C_U$ )	1.47
Eğrilik katsayısı ( $C_C$ )	0.98

### 3.1.2. Atık lastik

Çalışmada kullanılan atık lastik Konya İli, Selçuklu İlçesindeki geri dönüşüm tesisinden temin edilmiştir (Şekil 3.4).



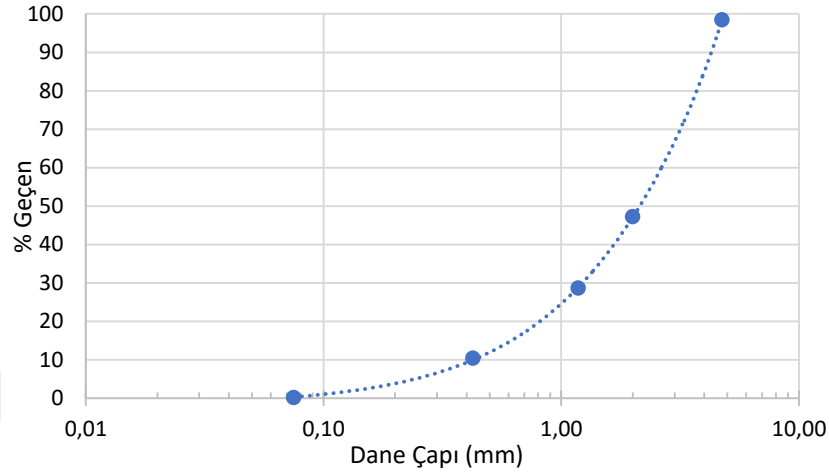
Şekil 3.4 Granül atık lastik

Granül atık lastikler temin edilerek Konya Teknik Üniversitesi geoteknik laboratuvarında TS 1900-1, TS EN 1097-6 standardına göre elek analizi ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Elek analizi sonucuna göre zeminin efektif çapı ( $D_{10}$ , %10 dan geçendanelere karşılık gelen çap) 0.42, üniformluluk katsayısı ( $C_U = D_{60} / D_{10}$ ) 6.31 ve süreklilik katsayısı ( $C_C = D_{30}^2 / D_{10} \times D_{60}$ ) ise 1.40 olarak bulunmuştur.

Atık lastiğin tane yoğunluğu piknometre deneyi sonucunda ( $\rho_s$ ) 1.00 g/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Atık lastiklerin içerisinde çok az miktarda metal tel parçalar bulunmaktadır. Granül atık lastiğin elek analizi grafiği Şekil 3.5'de, Çizelge 3.2'de fiziksel özellikleri verilmiştir

**Çizelge 3.2** Granül atık lastiğin fiziksel özellikleri

Özgül ağırlık ( $\rho_s$ ) (g/cm <sup>3</sup> )	1.00
Efektif çap ( $D_{10}$ ) (mm)	0.42
$D_{30}$ (mm)	1.25
$D_{50}$ (mm)	2.1
$D_{60}$ (mm)	2.65
Üniformluk Katsayısı ( $C_U$ )	6.31
Süreklilik Katsayısı ( $C_C$ )	1.40

**Şekil 3.5** Deneyde kullanılan granül atık lastiğin tane dağılım eğrisi

### 3.1.3. Kum

Çalışmada, Konya İli, Selçuklu İlçesi, Eğribayat kum ocağından getirilen malzeme öncelikle yıkanmış ve zemin mekaniği deneyleri yapılmıştır. Kum zeminde elek analizi ve birim hacim ağırlık deneyleri yapılarak fiziksel özellikler belirlenmiş (ASTM D 6913-04, 2009, ASTM D 854-10, 2010), ayrıca TS1500-2000'e göre zemin sınıfı tespit edilmiştir (TS1500, 2000).

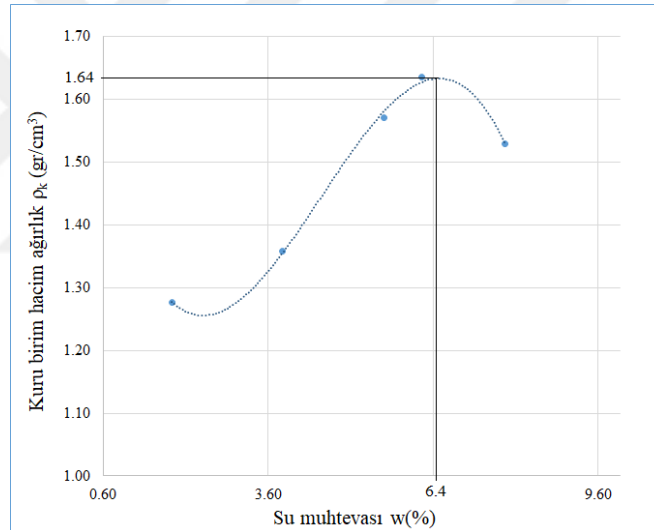
Deney kumu için laboratuvarında ASTM standartlarına uygun olarak yapılan elek analizi sonucunda tane çapı dağılımı bulunmuştur. Elek analizi deneyi sonuçları Çizelge 3.7'de verilmiştir. Zeminde %0 çakıl ve %95 kum %5'ini ince tane bulunmaktadır. Tane çapı dağılım eğrisi Şekil 3.8'de verilmiştir.

Konya Teknik Üniversitesi geoteknik laboratuvarında TS1900-1 standardına göre elek analizi ve standart sıkıştırma, TS EN 1097-6 standardına göre de özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Elek analizi sonucuna göre zeminin efektif çapı ( $D_{10}$ , %10 dan geçendanelere karşılık gelen çap) 0.18, üniformluk katsayısı ( $C_U = D_{60} / D_{10}$ ) 11,67 ve süreklilik katsayısı ( $C_C = D_{30}^2 / D_{10} \times D_{60}$ ) ise 1.11 olarak bulunmuştur. Deneyde kullanılan kum numunesinde ince tane ve çakıl kullanılmamıştır. Kum numunesinin iyi

derecelendirilmiş kum (SW) olarak tespit edilmiştir. Kum numunesi üzerinde yapılan sıkıştırma testleri sonucunda optimum su muhtevası(w) 6.40 ve kumun kuru birim hacim ağırlığı( $\rho_k$ ) 1.64 gr/cm<sup>3</sup> bulunmuştur. Kum numunesinin sıkıştırma eğrisi Şekil 3.7’de verilmiştir.



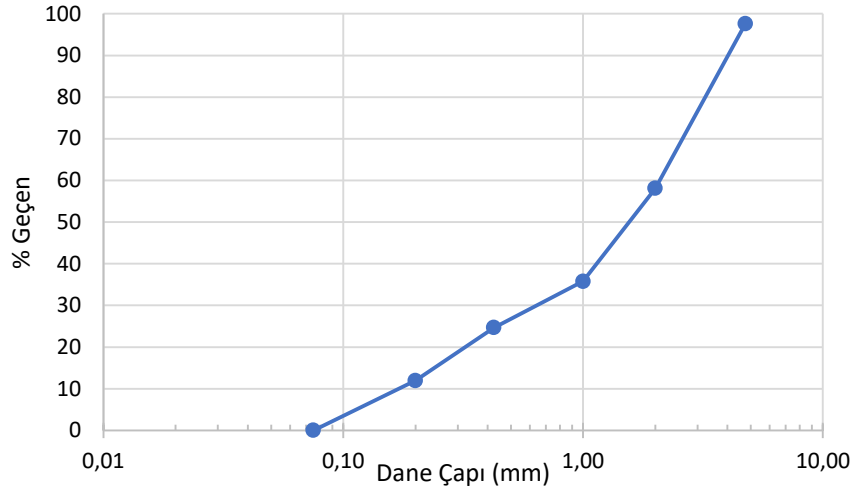
Şekil 3.6 Kum numunesine ait proktor deneyi ve elek analizi görünümü



Şekil 3.7 Kumun kuru birim hacim ağırlığı-su muhtevası eğrisi

Piknometre deneyi sonucunda kumun dane yoğunluğu ( $\rho_s$ ) 2.64 g/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Kumun elek analizi grafiği Şekil 3.8’de verilmiştir. Kullanılacak kum numunesinin fiziksel özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Kum numunesinin maksimum ve minimum kuru birim hacim ağırlıklarını ve boşluk oranlarını belirlemek için standartlara uygun şekilde proktor kalıpları ile deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda belirlenen kumun maksimum ve minimum boşluk oranları Çizelge 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.8 Denede kullanılan kumun granülometri eğrisi

Çizelge 3.3 Denede kullanılan kumun özellikleri

Kumun tane yoğunluğu ( $\rho_s$ ) (g/cm <sup>3</sup> )	2.64
Efektif çap ( $D_{10}$ )	0.18
$D_{30}$ (mm)	0.65
$D_{50}$ (mm)	1.65
$D_{60}$ (mm)	2.1
Üniformluk Katsayısı ( $C_U$ )	11.67
Süreklilik Katsayısı ( $C_C$ )	1.11
Optimum su muhtevası (%w)	6.40
Sıkı haldeki kuru birim hacim ağırlığı $\rho_{k, \max}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	1.64
Gevşek haldeki kuru birim hacim ağırlığı $\rho_{k, \min}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	1.46
Minimum boşluk oranı $e_{\min}$ (%)	20
Maksimum boşluk oranı $e_{\max}$ (%)	79

### 3.1.4. Çimento

Tez çalışmasında kullanılan Portland çimento tipi CEM I 42.5 R'dir. TS EN 197-1'e göre CEM I 42.5 R çimentosunun standart kimyasal ve fiziksel özellikleri ve yapılan araştırmalarla bulunan değerler Çizelge 3.4'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.4 CEM I 42.5 R çimentosunun standart özellikleri

Standart Kimyasal Özellikleri		
	TS EN 197-1	CEM I 42.5 R
Kızdırma kaybı	≤ %5.0	% 1.37
Çözünmeyen kalıntı	≤ %5.0	%0.4
Kükürt trioksit (SO <sub>3</sub> )	≤ %4.0	%2.73
Klorür (Cl-)	≤ %0.1	%0.0092
Standart fiziksel özellikleri		
	TS EN 197-1	CEM I 42.5 R
Priz başlama süresi	≥ 60 dk.	200 dk.
Hacim genişmesi	≤ 10 mm	1.3 mm
2 günlük dayanım	≥ 20 MPa	31.7 Mpa
28 günlük dayanım	42.5 MPa – 62.5 MPa	561 Mpa
Diğer özellikleri		
	TS EN 197-1	CEM I 42.5 R
Özgül yüzey (Blaine)	-	3502 cm <sup>2</sup> /g
Yoğunluk	-	3.12 g/cm <sup>3</sup>



### 3.2. İstatiksel Deney Tasarım Yöntemi

Tez çalışmasında serbest basınç deneyleri için oluşturulacak tasarım tablosu ‘Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi’ kullanılmıştır. Bu tasarım yöntemi ile serbest basınç deneyleri için tasarım tablosu oluşturulmuştur. Serbest basınç deneyi sonrasında tasarımların dayanımını etkileyen numuneler değerlendirilmiştir.

#### 3.2.1. Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi ile Deney Tasarımı

Bu yöntem Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiştir. Taguchi tasarım metodu, materyallerin ve üretimin doğasındaki değişkenliği, tasarım aşamasında göz önünde bulunduran sistemler topluluğudur (Taguchi, Elsayed , & Hsiang, 1989). Taguchi yöntemi kaliteyi tasarım ile bulmaya çalışan yöntemler sınıfına girmektedir (Taguchi, 1978). Bu yüzden ürün kalitesinde değişimlere neden olan önemli değişkenleri belirler ve kontrol eder (Karna & Sahai, 2012). Taguchi yöntemiyle tasarım numunelerinden elde edilen veriler ile araştırmanın nasıl devam ettirilmesi gerektiğine karar verilir.

Taguchi, varyasyonu ortadan kaldırmak için en iyi fırsatın bir ürünün tasarımı ve üretim süreci sırasında olduğunu fark etti. Sonuç olarak, kalite mühendisliği için her iki bağlamda da kullanılabilir bir strateji geliştirdi. Stratejinin üç aşaması vardır (Taguchi, 1987) (Taguchi, Elsayed , & Hsiang, 1989):

- Sistem tasarımı
- Parametre tasarımı
- Tolerans tasarımı

Sistem tasarımı: Sistem tasarımı, nominal koşullarda çalışacak olan bir sistemin geliştirilmesini kapsar. Sistem için geliştirilen teknik özellikler, tasarım özelliklerini geliştirmek için başlangıç noktasını tanımlar (URL-2).

Parametre tasarımı: Sistem tasarımından sonraki adım parametre tasarımıdır. Konsept oluşturulduktan sonra, geleneksel mühendisliğin detay tasarım aşaması olan çeşitli boyutların ve tasarım parametrelerinin nominal değerlerinin ayarlanması gerekir. Buna bazen sağlamlaştırma denir (URL-2).

Tolerans tasarımı: Parametre tasarımı aşaması yeterli olmadığında tolerans tasarım aşaması uygulanır. Başarılı bir şekilde tamamlanmış bir parametre tasarımı ve çeşitli parametrelerin performans üzerindeki etkisinin anlaşılmasıyla, kaynaklar kritik

birkaç boyuttaki varyasyonu azaltmaya ve kontrol etmeye odaklanabilir (URL-2). Taguchi metodu, herhangi bir süreci optimize etmek için 8 adım bulunmaktadır (Karna & Sahai, 2012).

Taguchi Metodundaki sekiz adım (Karna & Sahai, 2012):

- 1. Adım: Ana işlevi, yan etkileri ve arıza modu tanımlanır.
- 2. Adım: dış etki faktörleri, test koşulları ve kalite özellikleri tanımlanır.
- 3. Adım: Optimize edilecek amaç fonksiyonunu tanımlanır.
- 4. Adım: Kontrol faktörleri ve seviyeleri tanımlanır.
- 5. Adım: Ortogonal dizi matris deney parametreleri seçilir.
- 6. Adım: Matris deneyi gerçekleştirilir.
- 7. Adım: Veriler analiz edilip, optimum seviyeler ve performans tahmin edilir.
- 8. Adım: Doğrulama deneyi gerçekleştirilir ve gelecekteki eylem planı oluşturulur.

Taguchi, tercih edilen kalite özelliği olarak Sinyal-Gürültü (S/N) oranını kullanmıştır. S/N oranı, ortalama azaldıkça standart sapmanın da azalması ve bunun tersi olması nedeniyle standart sapma yerine ölçülebilir değer olarak kullanılmaktadır. S/N oranı ise aşağıdaki bağıntı ile bulunmaktadır (Demiröz , 2008).

$$\frac{S}{N} = -10 \times \log_{10} (MSD) \quad (3.1)$$

Burada MSD hedef değer etrafında sapma karelerinin ortalaması olup hedef değer en büyük en iyi, en küçük en iyi ve bilinen bir değer olması durumları için sırayla aşağıdaki bağıntılarla belirlenmektedir (Demiröz , 2008).

$$MSD = \left( \frac{1}{Y_1^2} + \frac{1}{Y_2^2} + \dots + \frac{1}{Y_n^2} \right) / n \quad (3.2)$$

$$MSD = \left( \frac{Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_n^2}{n} \right) \quad (3.3)$$

$$MSD = \left( \frac{(Y_1^2 - Y_0^2) + (Y_2^2 - Y_0^2) \dots + (Y_n^2 - Y_0^2)}{n} \right) \quad (3.4)$$

Formüllerde  $Y_1 \dots Y_n$ : deney sonuçlarını ifade etmektedir, n: deneydeki tekrar sayısı,  $Y_0$ : bilinen belirli hedef değerdir. Bu yöntemle göre yapılmış tasarımda optimum koşullarda beklenen hedef değerler veya deneylerin yapılmadığı kombinasyonlar için beklenen hedef değerler aşağıdaki bağıntı ile belirlenmektedir (Demiröz , 2008).

$$Y_{\text{beklenen}} = \sqrt{\frac{1}{MSD_{\text{ort}}}} \quad (3.5)$$

Deney sonuçlarının güvenilirliğinin ve değişkenlerin sonuca etkisini belirlemek için istatistiksel analizler yapılmalıdır. Bunun için tasarlanmış çok değişkenli varyans analizleri (ANOVA) kullanılmaktadır. Bu analizle verilerin serbestlik dereceleri, kareler toplamı varyansı ve değişkenliği belirlenmektedir (Karna & Sahai, 2012).

### 3.2.2. Hafif dolgu malzemesinin deney tasarım tablosunun oluşturulması

Bu çalışmada serbest basınç deneyi numuneleri hazırlanmasında ‘Minitab’ programı kullanılarak ‘Taguchi Deney Tasarım Yöntemi’ ile deney tasarım tablosu hazırlanmıştır. Bu metotla deney tasarım tablosu hazırlanırken karışımın değişkenleri ve değişim oranları belirlenmiştir. Deney sonucunda hazırlanan tasarımların uygunluğu tartışılmıştır.

#### 3.2.2.1. Çalışmadaki değişkenlerin alt ve üst karışım oranlarının belirlenmesi

Bu çalışmada EPS, atık lastik ve çimento malzemelerinin birleşimiyle oluşan bir tasarım tablosu oluşturulmuştur (Çizelge 3.5). Güncel uygulamaların genelinde hafif doğuların serbest basınç dayanımı 2,1 MPa’ı aşmamaktadır (Tuncel, 2012). Bir zeminin yük taşıyabilme kapasitesini ölçmede ortak bir kriter olan izin verilebilir taşıma gücünün 0.3 ile 0.7 MPa’lık dayanıma sahip olan zemin iyi sıkıştırılmış bir dolgu anlamına gelmektedir (Tuncel, 2012). Bu çalışmada EPS yoğunluğu ve içerisine atık lastik eklendiği düşünülerek çimento/ karışım (EPS+ atık lastik+ kum) oranı 8/1, 10/1, 12/1, 14/1 ve 16/1 olacak şekilde 5 seviye belirlenmiştir. Diğer çalışmalarda EPS malzemesi ağırlıkça kum/ EPS oranı %0 ile %100 arasında değişen oranlarda kullanılmıştır. Bu çalışmada kumdan hafif bir malzeme olan atık lastik kullanıldığı için ağırlıkça EPS/ karışım oranını %0 ile %50 arasında değişim gösterecek şekilde seçilmiştir. Aynı şekilde düşünülerek ağırlıkça atık lastik/ karışım oranı da %0 ile %50 arasında değişen değerler seçilmiştir. Tasarımlarda çimento/karışım, EPS/karışım ve

atık lastik/karışım olmak üzere üç parametre seçilmiştir. Deney tasarım tablosu Çizelge 3.5 de verilmiştir.

**Çizelge 3.5** Taguchi deney tasarım yöntemi ile oluşturulan deney tasarımı

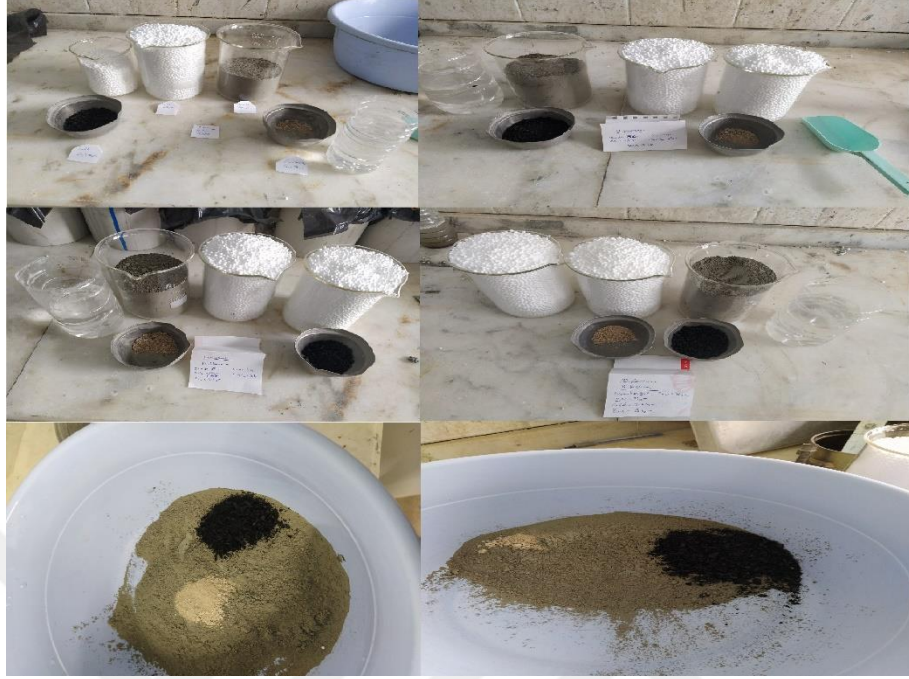
Tasarım No	Çimento/Karışım (EPS+ Lastik+ Kum)	EPS/Karışım (EPS+ Lastik+ Kum)	Lastik/Karışım (EPS+ Lastik+ Kum)
1	8/1	10	10
2	8/1	20	20
3	8/1	30	30
4	8/1	40	40
5	8/1	50	50
6	10/1	10	20
7	10/1	20	30
8	10/1	30	40
9	10/1	40	50
10	10/1	50	10
11	12/1	10	30
12	12/1	20	40
13	12/1	30	50
14	12/1	40	10
15	12/1	50	20
16	14/1	10	40
17	14/1	20	50
18	14/1	30	10
19	14/1	40	20
20	14/1	50	30
21	16/1	10	50
22	16/1	20	10
23	16/1	30	20
24	16/1	40	30
25	16/1	50	40

### 3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri belirlendikten sonra deney tasarım tablosunda belirtilen oranlarda malzemeler karıştırılarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Literatürdeki çalışmalarda su/çimento 0.45 ile 0.70 aralığında alındığı görülmüştür. Bu çalışmada tüm karışımlarda su/çimento= 0.5 alınmıştır.

Karışımlar hazırlanırken, karıştırma işlemi için bir kap, hassas terazi, karıştırıcı kürek ve malzemelerin hazır bulunduğu kaplar kullanılmıştır. Her bir tasarımda tüm malzemeler tartılıp hazırlandıktan sonra çimento, kum, atık lastik karıştırma kabına eklenerek homojenlik sağlamak amacıyla el mikseri ile karıştırılmıştır (Şekil 3.9). Daha sonrasında karışım su eklenerek ve homojenliği sağlamak amacıyla tekrar

karıştırılmıştır (Şekil 3.10). En sonunda EPS boncukları eklenerek tekrar karıştırılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.9 Karıştırma kabına eklenen çimento, kum ve atık lastik



Şekil 3.10 Çimento, kum, atık lastik ve su karışımı





Şekil 3.11 Karışıma EPS boncukları eklenmiş görünümü

Karışımların homojen şekilde karıştırılarak çapı 50 mm ve yüksekliği 100 mm olan plastik kalıplara dökülerek numuneler hazırlanmıştır (Şekil 3.12). Hazırlanan numuneler 7 ve 28 günlük deneyleri yapılmak üzere küre bırakılmıştır.



Şekil 3.12 Hazırlanan numuneler (D: 50mm, L: 100 mm)

### 3.4. Serbest Basınç Deneyleri

Serbest basınç deneyleri İnşaat Mühendisliği Zemin Mekaniği laboratuvarında yapılmıştır. Hazırlanmış olan numuneler plastik kalıplardan çıkarılarak ASTM D2166 standardına uygun olarak yapılmıştır.



Şekil 3.13 Serbest basınç deney aleti ve numunenin yerleştirilmiş görünümü

Tek eksenli basınç deneyi, ince taneli zeminlerin tek eksende serbest basınç dayanımını ölçmek için yapılmaktadır. Deney numunesi kalıptan çıkarılarak serbest basınç aletine alt ve üstteki plakaların ortasına dik doğrultuda yerleştirilmiştir. Eksenel yük artışları altında meydana gelen boy kısalması ölçülmüş ve gerilme-şekil değiştirme grafiği çizilmiştir. Deneylerde numunede oluşan kayma düzleminin alt ve üst yükleme başlıkları ile kesişmemesi için, boy/çap oranının iki olarak seçilerek 0.5 mm/dak yükleme hızıyla tek eksenli basınç deneyi düzeneğinde numunelerin kırılması gerçekleştirilmiştir. ASTM D2166 standardına göre serbest basınç dayanımı aşağıdaki Denklem 3.1'e göre hesaplanmıştır.

$$q_u = \sigma_1 = \frac{P_{\max}}{A_f} \quad (3.1)$$

$q_u = \sigma_1$ : Serbest basınç mukavemeti (kPa)

$P_{\max}$ : kırılma anındaki uygulanan maksimum yük (kN)

$A_f$ : Kırılma anındaki numunenin en kesit alanı ( $m^2$ )

$$A_f = \frac{A_0}{1 - \varepsilon}$$

(3.2)

$A_0$ : Numunenin deney öncesi en kesit alanı ( $m^2$ )

$\varepsilon$ : Numunenin aksenal birim boy değıştirmesi

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0}$$

(3.3)

$\Delta H$ : Deney sonucu numuneni boyunda oluşan kısalma miktarı (mm)

$H_0$ : Numunenin ilk boyu (mm)

### 3.5. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyleri

CBR deneyi kesit alanı  $19.35 \text{ cm}^2$  olan silindir bir pistonun belirli bir hızla zemine itilerek elde edilen yük- penetrasyon bağıntısının (kaliforniya taşıma oranı) bulunmasını kapsar. Taşıma oranı değeri, 2,5 mm'lik ve 5,0 mm'lik penetrasyonda hesaplanır ve elde edilen iki değerden, yüksek olanı zeminin taşıma oranı değeri olarak kabul edilir (TS 1900-2, 2006).

Genellikle CBR deneyi daha çok yolların ve hava alanlarının tabanını oluşturan zeminlerin oldukça kuru olduğu tropik ve yarı tropik bölgelerde uygulanmaya elverişlidir. Ayrıca havaalanı kaplamalarının ve demiryolu dolgularının taşıma oranını belirlemek içinde kullanılmaktadır. CBR değeri deney esnasındaki su muhtevasına ve kuru birim hacim ağırlığına bağılı olarak değışebilmektedir.

CBR deney aletindeki pistonun boyutları dolayısıyla deney, sadece tane büyüklüğü en çok 20 mm olan malzeme için uygulanır (TS 1900-2, 2006). Numunenin hazırlanışı, CBR deneyinden elde edilecek sonuçları büyük oranda etkilemektedir. Su içeriğinin oldukça yüksek olduğu kohezyonlu zeminlerde (CBR değeri %5'den küçük) bu deneyin doğru sonuçları vermediği görülmüştür.

CBR değeri, herhangi bir batma değeri için uygulanan yükün, standart bir yüke oranı olarak tanımlanır. CBR değeri aşağıdaki denklem 3.4 ile hesaplanmıştır.

$$\text{CBR} = \left( \frac{P}{P_s} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

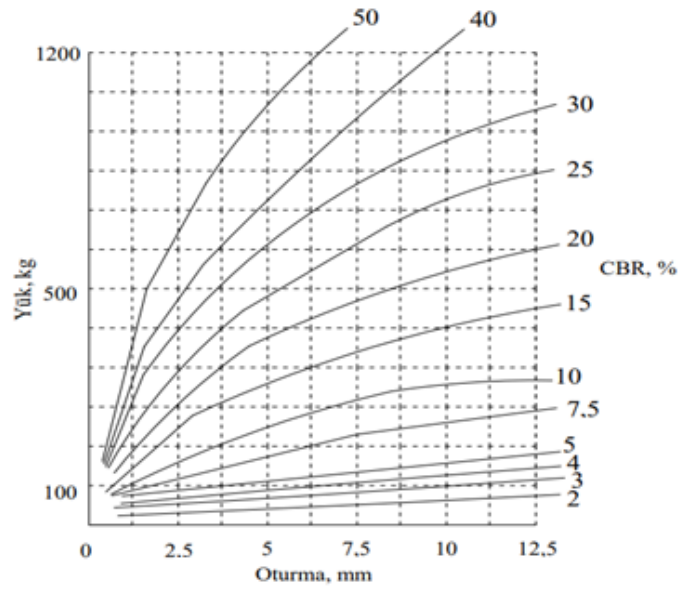


Burada;

P: 2.50 ve 5.00 mm'ye karşılık gelen yük değerleri

P<sub>s</sub>: Standart yük (2.5 mm Penetrasyon için 13.24 kN, 5 mm Penetrasyon için 20.012 kN)

CBR değeri olarak, 2.50 mm batmayı sağlayan oran alınır. Eğer 5 mm batmadaki oran, 2.5 mm batmadakinden daha büyükse deney tekrarlanır. Tekrar aynı sonuç elde ediliyorsa, 5 mm'lik batmadaki oran CBR değeri olarak alınır (Fındık, 2005). CBR değerini hesaplamada Şekil 3.14'deki yük-oturma eğrileri ile belirlemek uygulamada büyük kolaylık sağlar (MEGEP, 2006).



Şekil 3.14 CBR deneyinde kullanılan standart yük-oturma grafiği (MEGEP, 2006)

Deneyler TS 1900-2 standardına göre yapılmıştır. 150 mm çapındaki Şekil 3.15 gösterilen kalıplara hazırlanmıştır. 7 ve 28 gün kür sürelerinde bekletilmiştir. CBR deney aletine yerleştirilerek deney aletindeki çelik uç numuneye temas ettirilerek deneye başlanmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.15 Hazırlanan CBR numuneleri görünümü



Şekil 3.16 Numunelerin test cihazına yerleştirilmesi

### 3.6. Donma- Çözülme deneyleri

Donma-çözülme deneyleri İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği laboratuvarında  $-18^{\circ}\text{C}$  ile  $-22^{\circ}\text{C}$  arasında sıcaklıkta derin dondurucuda yapılmıştır (Şekil 3.17). Numuneler hazırlandıktan sonra 7 ve 28 gün boyunca kürede bekletildikten sonra donma çözülme çevrimi yapılmıştır (Yarbaşı, 2015). Kür sonunda numuneler derin dondurucuda 12 saat süre bekletilmiş ve numuneler derin dondurucudan çıkarılarak 12 saat süre boyunca çözülmeye bırakılmıştır (Yarbaşı, 2015). Bu işlem 10 defa tekrarlı şekilde uygulanmıştır. Donma çözülme deneyinden sonra serbest dayanım deneyi yapılarak numunelerdeki basınç değişimi değerlendirilmiştir.



Şekil 3.17 Donma çözülme deneyinde kullanılan derin dondurucu

### 3.7. Permeabilite Deneyleri

Suyun zemin içerisindeki boşluklar arasından geçişi mümkün olmakta ve suyun geçiş hızı zemin türüne bağlı olarak değişmektedir. Zeminin geçirirliiliği permeabilite katsayısı (cm/sn) olarak ifade edilmektedir ve 'k' sembolü ile gösterilmektedir (Das, 2006). Zeminlerin permeabilite katsayısı sıvının akıcılığına, zemindeki boşluklara, dane dağılımına, boşluk oranına bağlı olarak değişmektedir.

Geçirirliiliği yüksek olan malzemeler için sabit seviyeli permeabilite deneyi uygundur (Tuncel, 2012). Numuneler 50 mm çapındaki kalıplar içerisinde yerleştirilerek hazırlanmıştır (Şekil 3.18) ve hazırlandıktan sonra 7 ve 28 gün boyunca kürede bekletilmiş ve deneyleri yapılmıştır.

Laboratuvardaki deney düzeneğine yerleştirilen numune Şekil 3.19'da görülmektedir. Sabit su seviyesi ile taşan su seviyesi arasındaki yükseklik ayarlanarak sabit akış hızı sağlanır. Sonrasında zeminin içerisinde geçen su bir kaptaki birikir ve birikme süresi kaydedilir (Tuncel, 2012). Darcy kanunundan t süresi boyunca toplanan, toplam debi ( $Q$ ,  $\text{cm}^3/\text{sn}$ ), Denklem 3.5'de belirtilen bağıntı ile bulunur (Das, 2006).

$$Q = q \times \Delta t = A \times k \times i \times \Delta t \quad (3.5)$$

Burada;

A: Deney numunesinin en kesit alanı

i: Hidrolik eğimi ifade etmektedir ve aşağıdaki Denklem 3.6 ile bulunmaktadır.

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (3.6)$$

L: Numune boyu

Denklem 3.5 düzenlenerek Denklem 3.7'deki bağıntı düzenlenirse

$$Q = k \times \frac{\Delta H}{L} \times A \times t \quad (3.7)$$

Denklem 3.8 de verilen bağıntı ile geçirimsizlik katsayısı hesaplanmaktadır.

$$k = \frac{Q \times L}{\Delta H \times A \times t} \quad (3.8)$$



Şekil 3.17 Geçirimsizlik deneyine ait deney numuneleri



Şekil 3.18 Sabit seviyeli permeabilite deneyinin yapılışı

#### 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bir zeminin üzerindeki yükü taşıyabilme kapasitesini ölçmede ortak bir kriter olan izin verilebilir taşıma gücünün 0.3 ile 0.7 MPa'lık dayanıma sahip olan zemin iyi sıkıştırılmış bir dolgu anlamına gelmektedir (Tuncel, 2012). Hafif dolgular ACI 116R raporu kapsamında basınç mukavemeti 8,3 MPa'lı geçmeyen malzemeler olarak belirtilmiştir (ACI, 2000). Güncel uygulamaların genelinde serbest basınç dayanımı 2,1 MPa'ı aşmamaktadır. Bu nedenle tez çalışmasında, hafif dolgu malzemesi ile yapılan dolgunun tekrar geri kazılması olasılığından dolayı serbest basınç dayanım değerleri 7 günlük numunelerde en az 0.3 MPa, 28 günlük numunelerde en fazla 1.0 MPa olması planlanmıştır (Tuncel, 2012).

Bu tez çalışmasında; EPS, atık lastik, kum ve çimento malzemeleri karışımından hafif dolgu numuneleri hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılan malzemelerin farklı oranlarda karıştırılarak 25 farklı tasarım için serbest basınç deneyi için numuneleri hazırlanmıştır (Çizelge 3.5). 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda test edilmiştir. CBR, donma çözülme ve geçirimsizlik deneyleri, 0.3 MPa ile 1.0 MPa serbest basınç mukavemeti aralığındaki tasarımlar için yapılmıştır.

##### 4.1. Serbest Basınç Deneylerinin Sonuçları

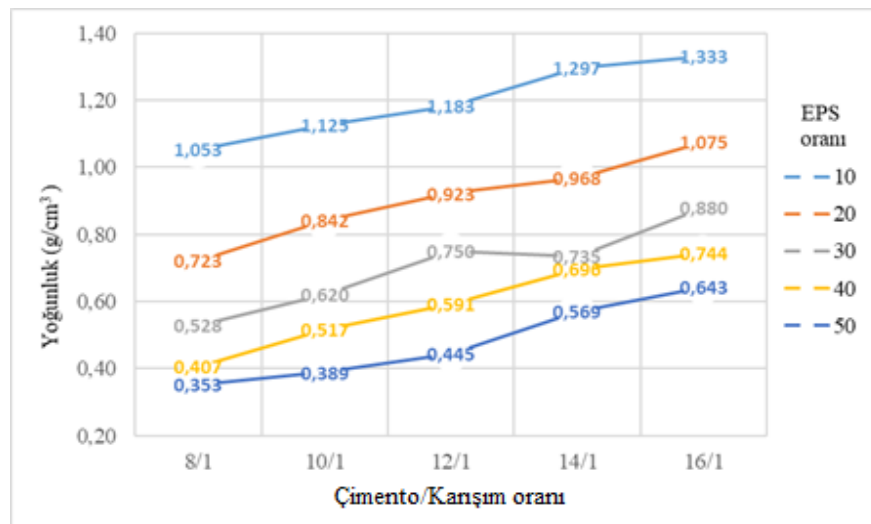
EPS, atık lastik, kum ve çimento malzemeleri kullanılarak tasarımlar oluşturulmuştur. Tasarımlarda beş farklı oranda çimento kullanılmıştır. Aynı çimento oranlarında ise atık lastik, EPS ve kum oranları değiştirilmiştir. Deneylerde su/çimento oranı tüm numuneler için 0.5 alınmıştır. 25 tasarım için serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Her tasarımda 6 numune hazırlanarak 3 tanesi 7 günlük, diğer 3 tanesi de 28 günlük kür sürelerinde bekletilmiştir. Tasarımlar hazırlanırken kullanılan malzemelerin yoğunlukları ve oranları dikkate alınarak tasarım yoğunlukları ve 7- 28 gün kür süresi sonundaki yoğunluk değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Numunelerdeki yoğunluk değişimi, kullanılan malzemelerin oranlarına bağlı olarak değişmektedir. EPS yoğunluğu çok düşük olduğu için tasarımlardaki oranı arttıkça yoğunluğun azaldığı görülmüştür (Şekil 4.1). Şekil 4.1'de verilen grafikte aynı EPS oranlarında Ç/karışım oranı arttıkça yoğunluğun arttığı anlaşılmaktadır.

16 numaralı tasarım %10 EPS, %40 atık lastik ve 14/1 Ç/K oranları ile 1.342 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk değeri en yüksek, 5 numaralı tasarım %50 EPS, % 10 atık lastik ve 8/1

Ç/K oranları ile  $0.360 \text{ g/cm}^3$  yoğunluk değeri en düşük olarak bulunmuştur (Çizelge 4.1).

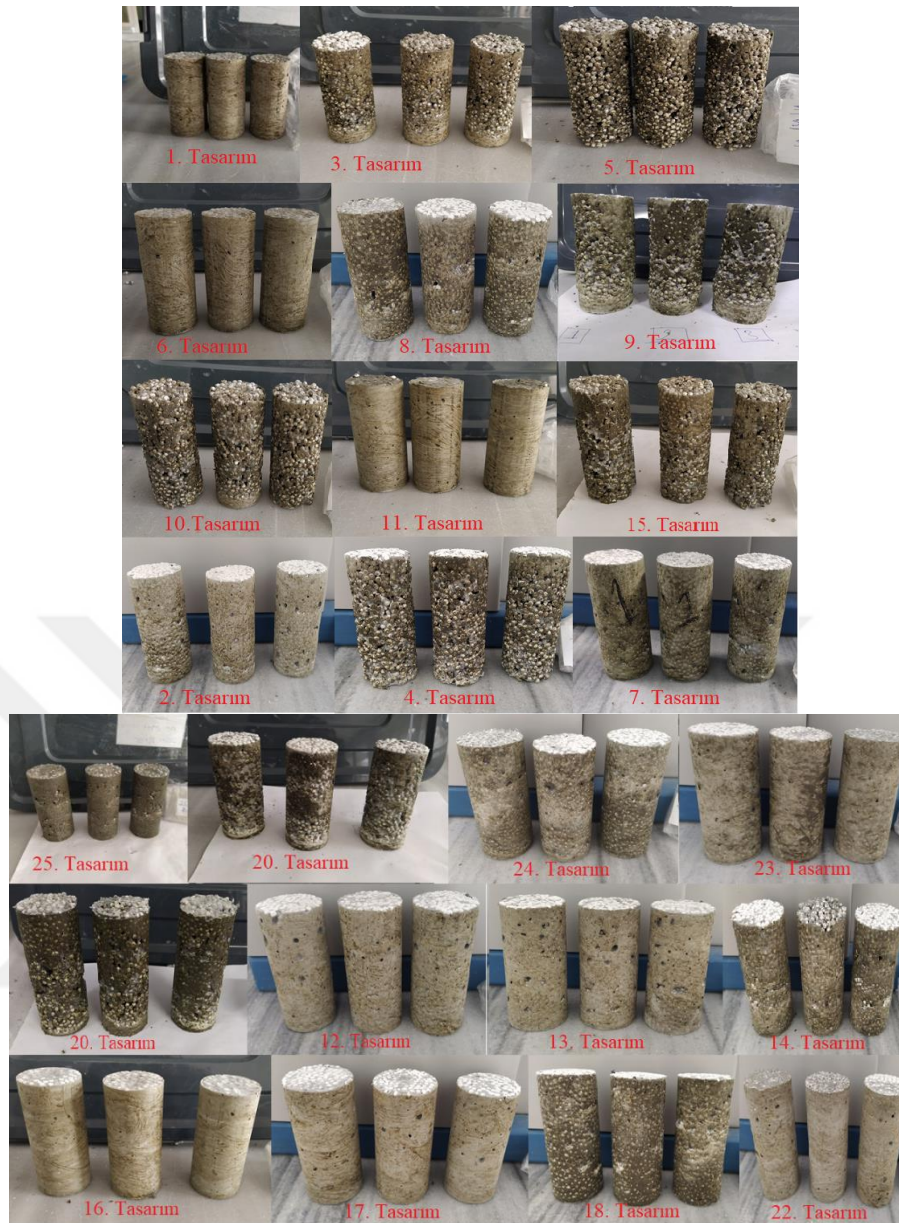
Çizelge 4.1 Tasarımların 7 ve 28 günlük yoğunlukları

Tasarım No	Çimento/Karışım (EPS+Lastik+Kum)	EPS (%) (EPS+Lastik+Kum)	Lastik (%) (EPS+Lastik+Kum)	Tasarım Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )	7 günlük Ortalama Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )	28 günlük Ortalama Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )
1	8/1	10	10	0.982	1.053	1.132
2	8/1	20	20	0.666	0.723	0.770
3	8/1	30	30	0.504	0.528	0.660
4	8/1	40	40	0.406	0.407	0.424
5	8/1	50	50	0.339	0.353	0.360
6	10/1	10	20	1.071	1.125	1.217
7	10/1	20	30	0.754	0.842	0.857
8	10/1	30	40	0.582	0.620	0.645
9	10/1	40	50	0.474	0.517	0.563
10	10/1	50	10	0.403	0.389	0.415
11	12/1	10	30	1.141	1.183	1.263
12	12/1	20	40	0.829	0.923	0.931
13	12/1	30	50	0.651	0.750	0.739
14	12/1	40	10	0.540	0.591	0.663
15	12/1	50	20	0.459	0.445	0.528
16	14/1	10	40	1.198	1.297	1.343
17	14/1	20	50	0.893	0.968	0.971
18	14/1	30	10	0.719	0.735	0.740
19	14/1	40	20	0.597	0.696	0.718
20	14/1	50	30	0.510	0.569	0.592
21	16/1	10	50	1.246	1.333	1.333
22	16/1	20	10	0.960	1.075	1.034
23	16/1	30	20	0.774	0.880	0.879
24	16/1	40	30	0.648	0.744	0.786
25	16/1	50	40	0.557	0.643	0.655



Şekil 4.1 Numunelerin yoğunluk değişimi

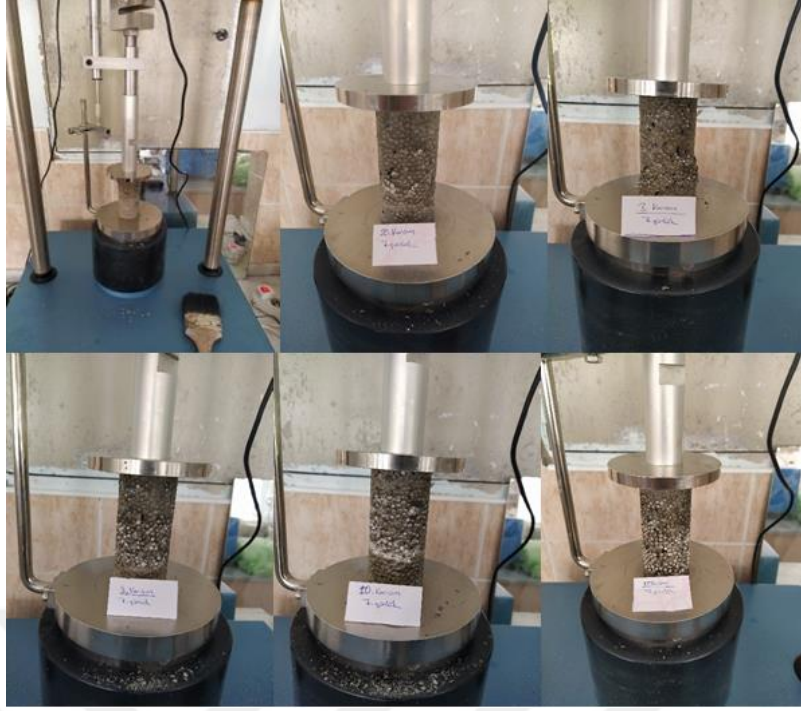




**Şekil 4.2** Serbest basınç deneyi için hazırlanan numunelere ait görünüşler

Hazırlanan numuneler (Şekil 4.2) 0.5 mm/dak yükleme hızında test edilmiştir (Şekil 4.3). Test sırasında numunelerin yük-deformasyon değerleri bilgisayara aktarılmıştır. Tasarımlara ait 7 ve 28 günlük serbest basınç deneyi sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Şekil 4.4’de tasarımlarda çimento oranı arttıkça numunelerde belirgin bir şekilde parçalanmalar görülmektedir. Çimento malzemesi sertleştikten sonra gevrek kırılma özelliğinden dolayı parçalanma belgiğidir. EPS malzemesi yumuşak ve içerisi hava ile doludur. Tasarımlardaki EPS ve atık lastik oranı arttıkça numunelerin sünekliliğini artmaktadır (Aksoy, 1998).



Şekil 4.3 SBD'de numunelerin kırılması



Şekil 4.4 SBD sonundaki numunelere ait görüntüler

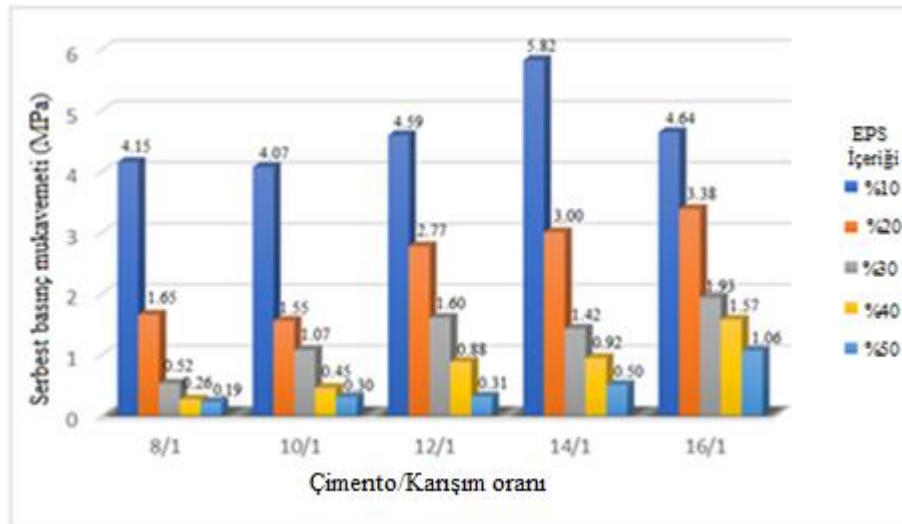
Şekil 4.5 ve 4.6'deki grafikler incelendiğinde tasarımlarda çimento oranları sabit tutularak EPS oranları artırıldığında dayanım düştüğü gözlenmiştir. Çimentonun



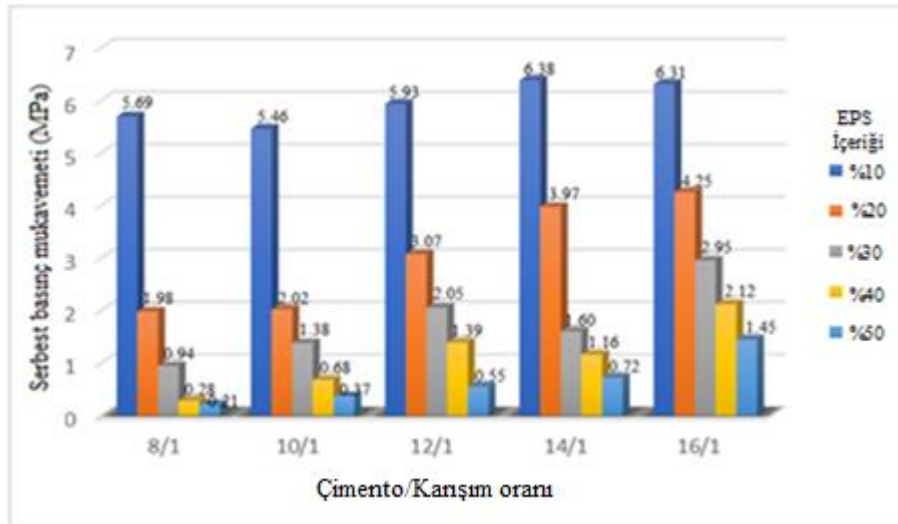
bağlayıcı malzeme özelliğinden dolayı çimento oranı arttıkça numunelerin dayanımı artmıştır. EPS boncuklarının içeriğinin %98'i havadır ve bu özelliğinden dolayı dayanımı düşürdüğü görülmüştür.

**Çizelge 4.2** Tasarımların 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

Tasarım No	Ç/Karışım (EPS+Lastik+Kum)	EPS (%) (EPS+Lastik+Kum)	Lastik (%) (EPS+Lastik+Kum)	7 günlük Ortalama Dayanım (MPa)	28 günlük Ortalama Dayanım (MPa)
1	8/1	10	10	4.15	5.69
2	8/1	20	20	1.65	1.98
3	8/1	30	30	0.52	0.94
4	8/1	40	40	0.26	0.28
5	8/1	50	50	0.19	0.21
6	10/1	10	20	4.07	5.46
7	10/1	20	30	1.55	2.02
8	10/1	30	40	1.07	1.38
9	10/1	40	50	0.45	0.68
10	10/1	50	10	0.30	0.37
11	12/1	10	30	4.59	5.93
12	12/1	20	40	2.77	3.07
13	12/1	30	50	1.60	2.05
14	12/1	40	10	0.88	1.39
15	12/1	50	20	0.31	0.55
16	14/1	10	40	5.82	6.38
17	14/1	20	50	3.00	3.97
18	14/1	30	10	1.42	1.60
19	14/1	40	20	0.94	1.16
20	14/1	50	30	0.50	0.72
21	16/1	10	50	4.64	6.31
22	16/1	20	10	3.38	4.25
23	16/1	30	20	1.93	2.95
24	16/1	40	30	1.57	2.12
25	16/1	50	40	1.06	1.45



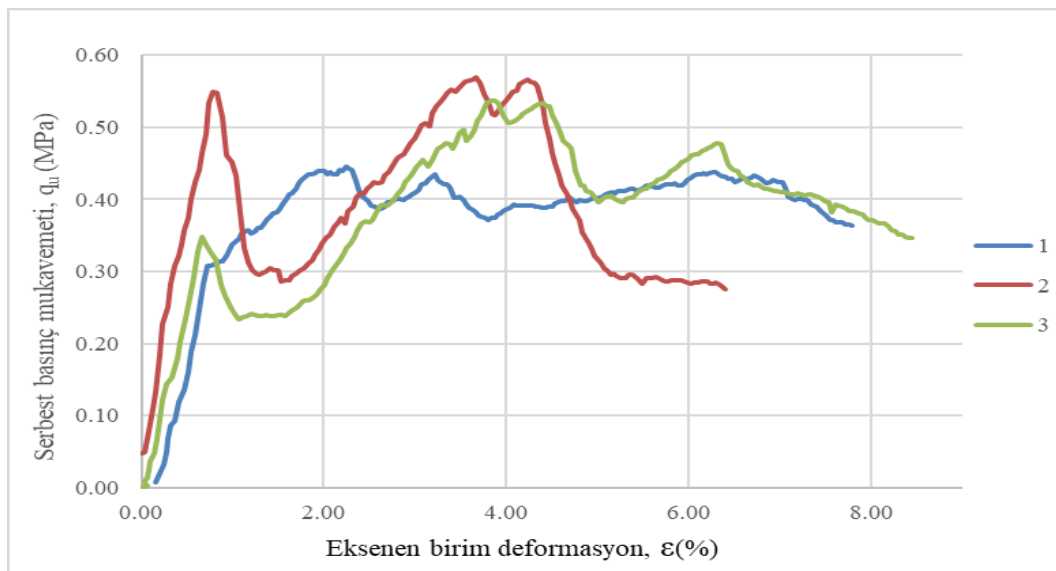
**Şekil 4.5** Sabit çimento oranlarındaki EPS değişimine göre 7 günlük ortalama basınç dayanımları



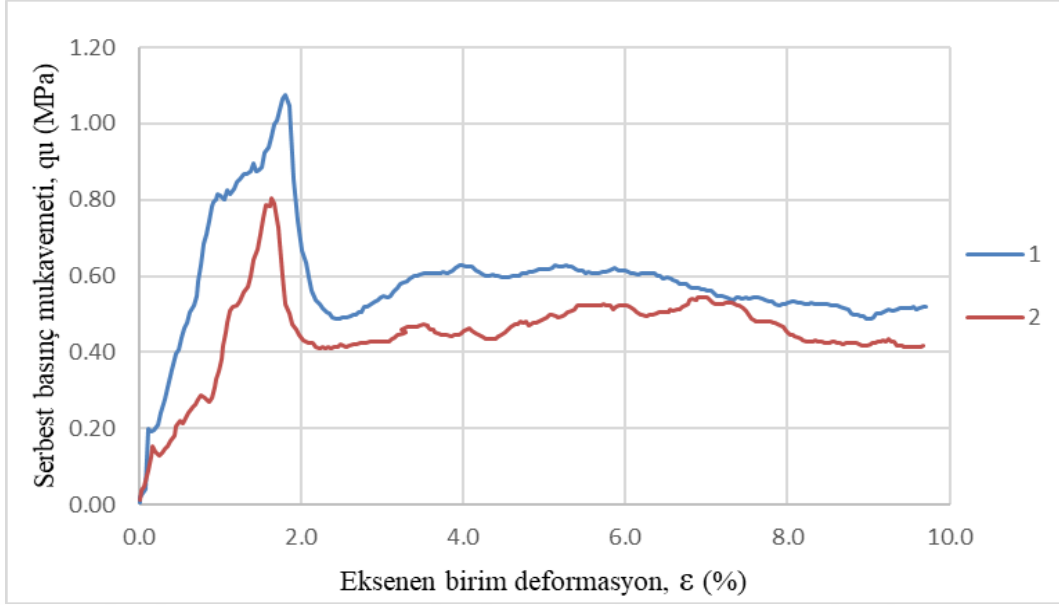
Şekil 4.6 Sabit çimento oranlarındaki EPS değişimine göre 28 günlük ortalama basınç dayanımları

Şekil 4.7 ve 4.16 arasındaki grafiklerde 3, 9, 10, 15 ve 20 No'lu tasarımların 7 ve 28 günlük üçer numunelerin yük- deformasyon eğrileri verilmiştir. Diğer tasarımların yük- deformasyon grafikleri EK-1'dedir.

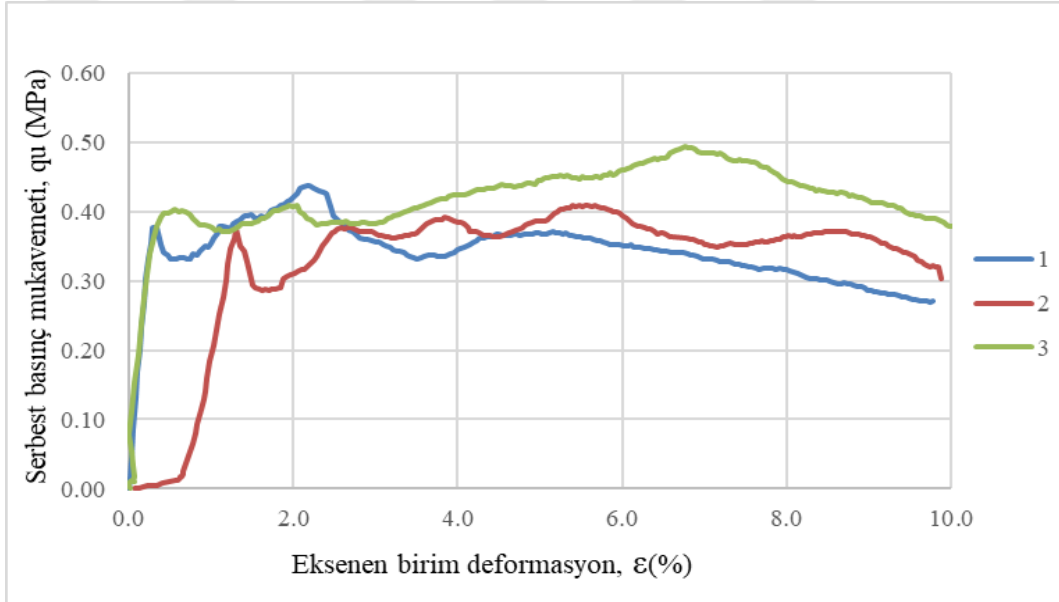
Şekillerdeki (4.7 ile 4.16) grafikler incelendiğinde çimento oranı yüksek ve EPS oranı düşük olan numunelerde gevrek kırılmalar görülmektedir. EPS oranı yüksek olan ve çimento oranı düşerken numunelerde dayanımın ve esnekliğinin arttığı görülmüştür. Şekil 4.3'de Ç/Karışım oranı 8/1 ve %30 EPS içeriğinde (7 günlük 3 No'lu tasarım) şekil değişimi olurken dayanım yükselmekte ve sonrasında dayanımda düşüş görülmektedir. Bu durum numunedeki bağlayıcı çimento malzemesinin kırıldığı ve EPS malzemesinde hacim azalarak dayanım tekrar artmaya başlamaktadır.



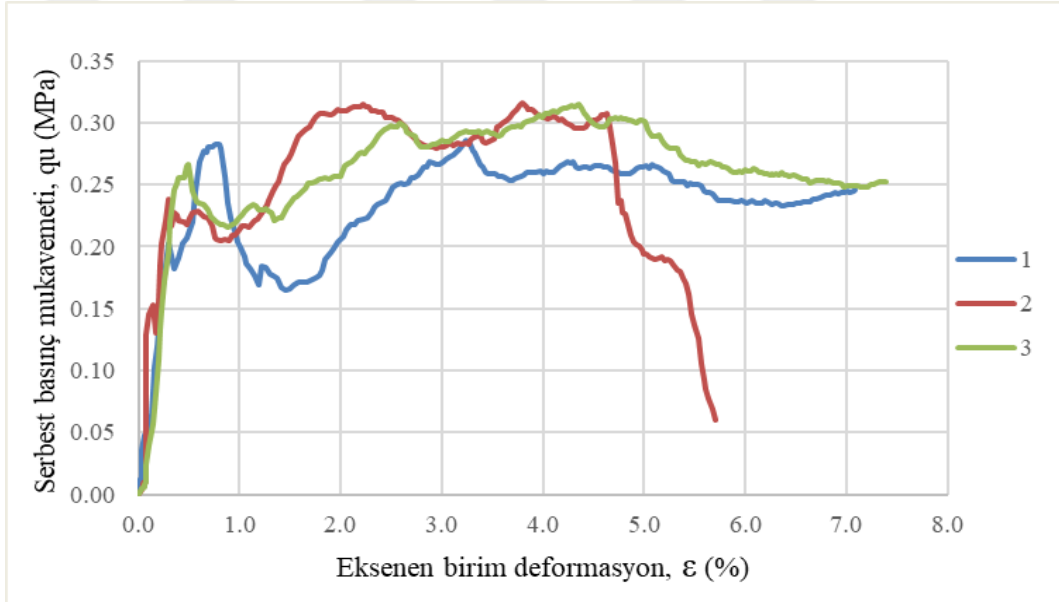
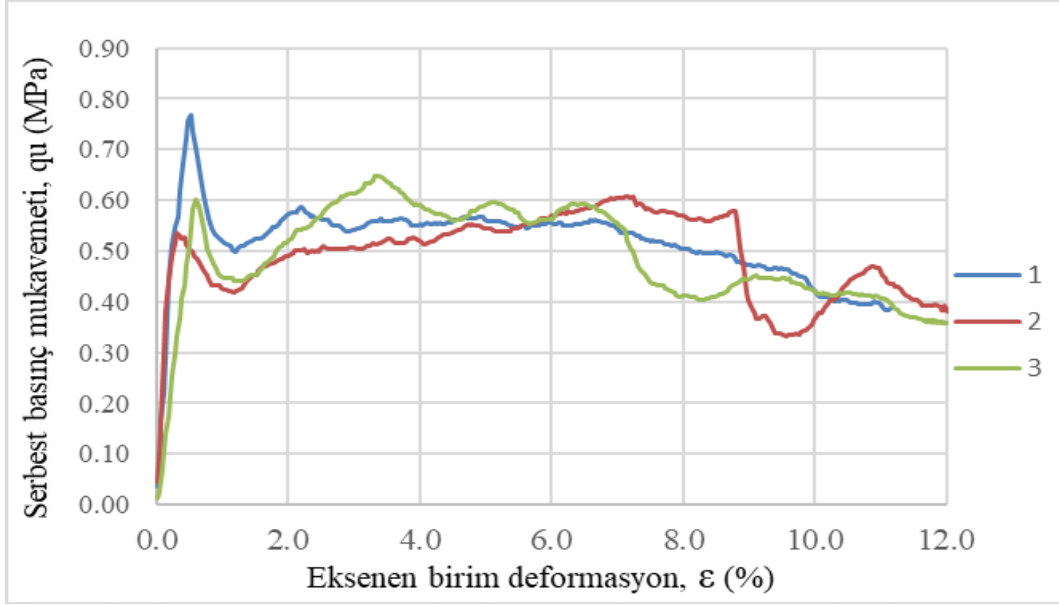
Şekil 4.7 3 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği

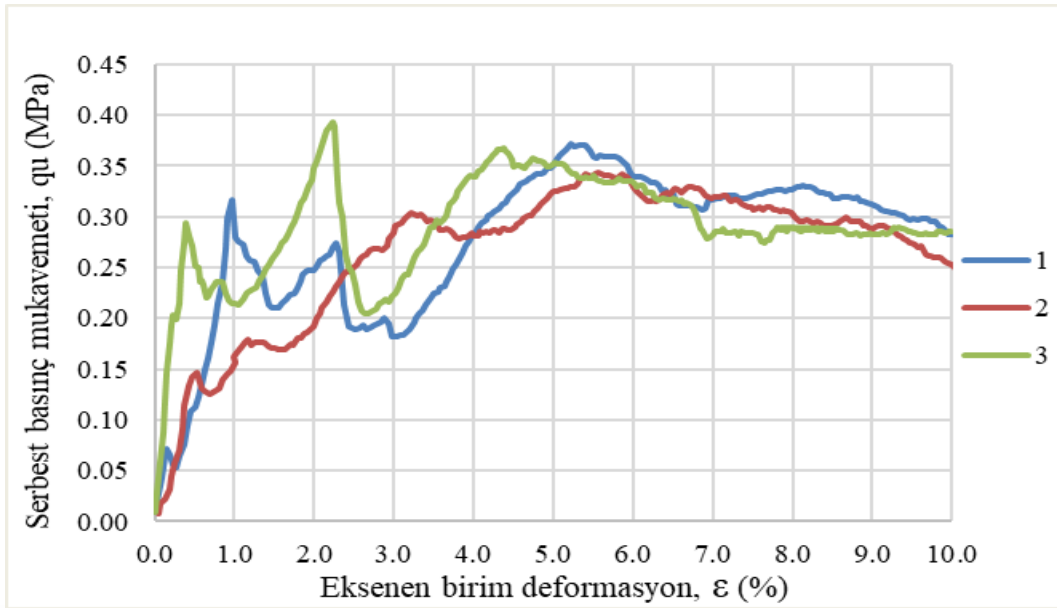


Şekil 4.8 3 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- eksenel birim deformasyon grafiği

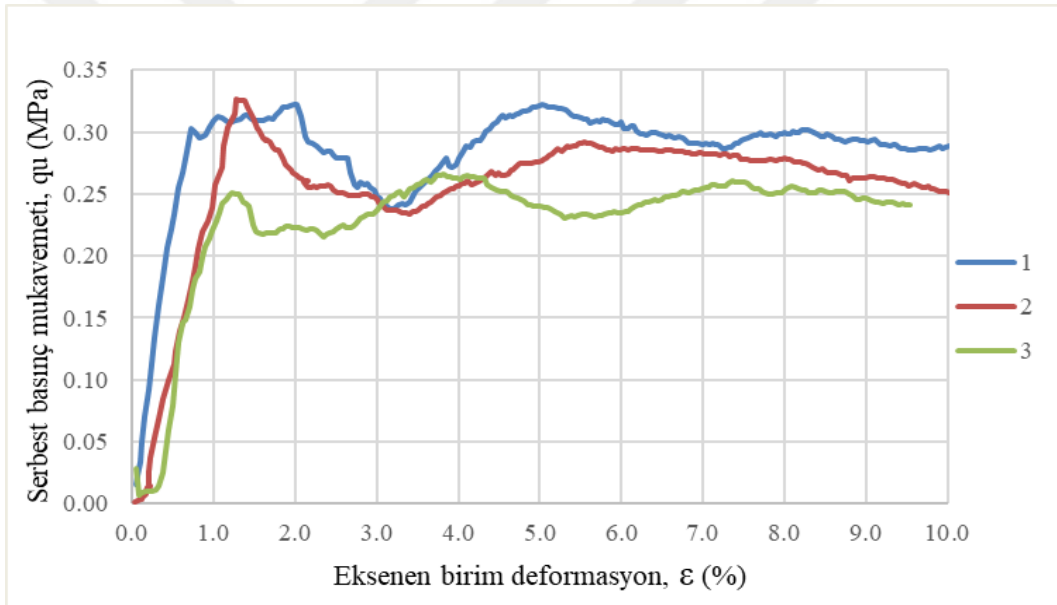


Şekil 4.9 9 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği

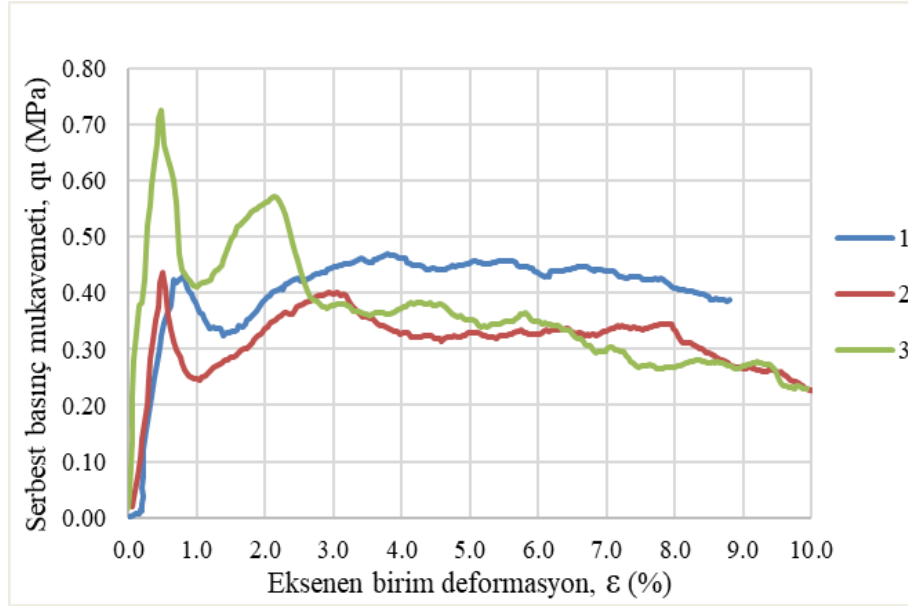




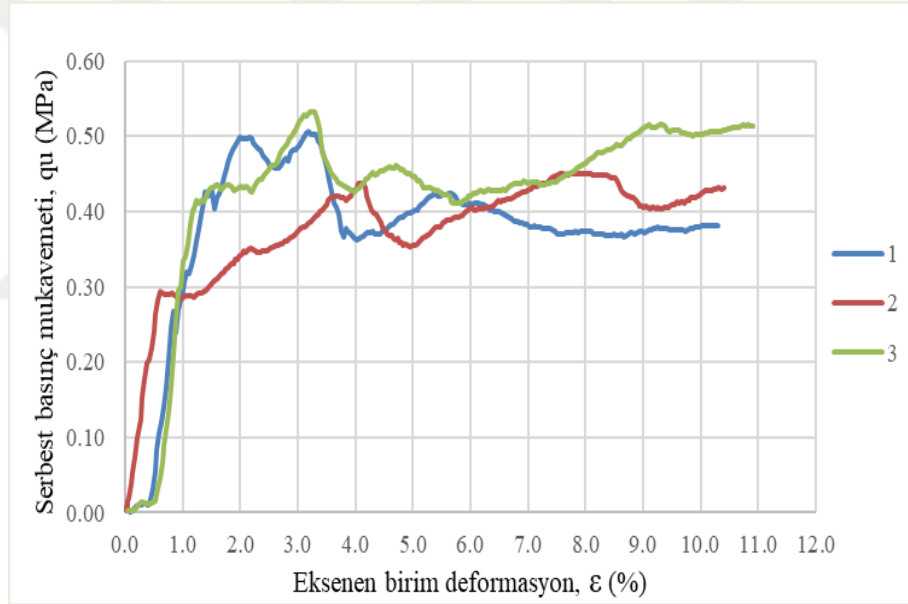
Şekil 4.12 10 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- eksenel birim deformasyon grafiği



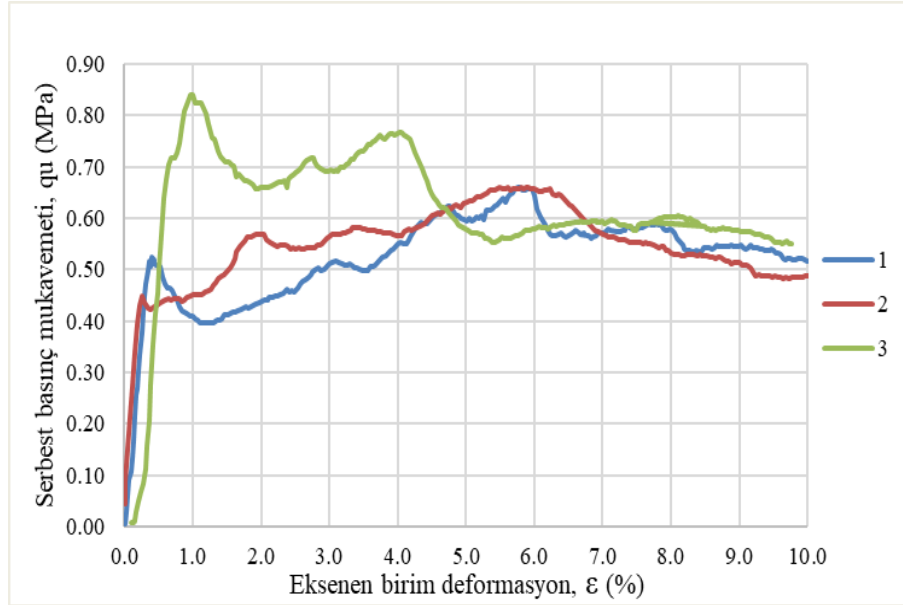
Şekil 4.13 15 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- eksenel birim deformasyon grafiği



Şekil 4.14 15 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği



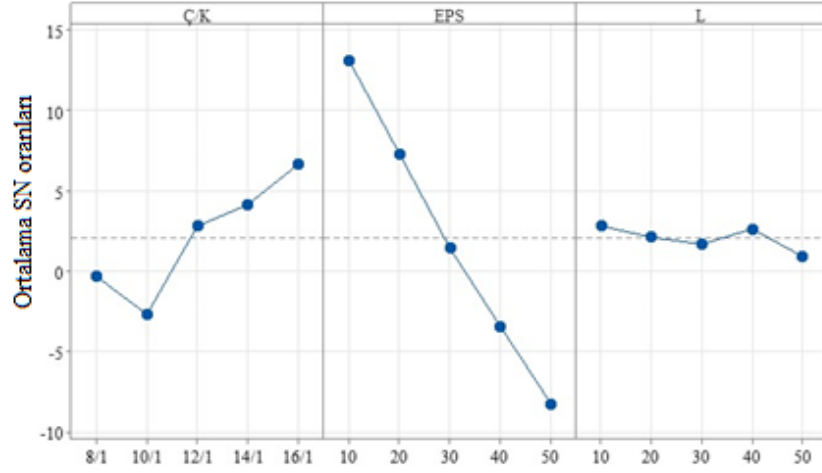
Şekil 4.15 20 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği



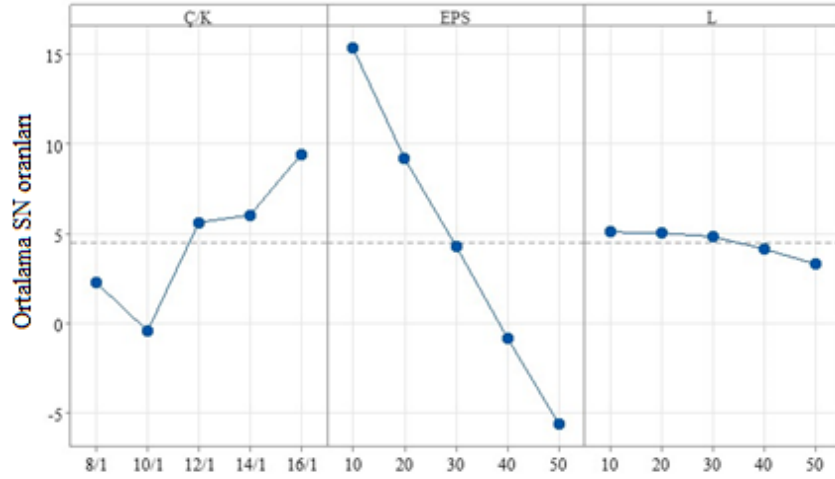
Şekil 4.16 20 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği

#### 4.1.1. Serbest basınç dayanım sonuçlarının ANOVA (varyans) analizi sonuçları

Taguchi tasarım yöntemi kullanılarak serbest basınç deney sonuçlarının analizi MSD hedef değer etrafında sapma karelerinin ortalaması olup hedef değer en büyük en iyi olduğu durum için tasarım analiz yapılmıştır. Tasarımların 7 ve 28 günlük dayanımlarına göre sırasıyla Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de S/N oranları için ana etkiler grafiği verilmiştir. Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 da görüldüğü üzere bağlayıcı malzeme olarak kullanılan çimento oranı arttıkça tasarımların dayanımları arttığı anlaşılmaktadır. Aynı şekillerden tasarımlarda hafif malzeme olarak EPS ve atık lastik kullanılmış ve EPS oranı arttıkça tasarımların dayanımları azaldığı ve kullanılan atık lastik oranlarının tasarımlarda dayanım miktarında etkisi az olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de görülen çimento/karışım oranı 10/1 olan tasarım dayanımlarının 8/1 olan tasarımların dayanımından düşük çıkması numunelerin kalıplara yerleştirmeden kaynaklandığı düşünülmektedir.

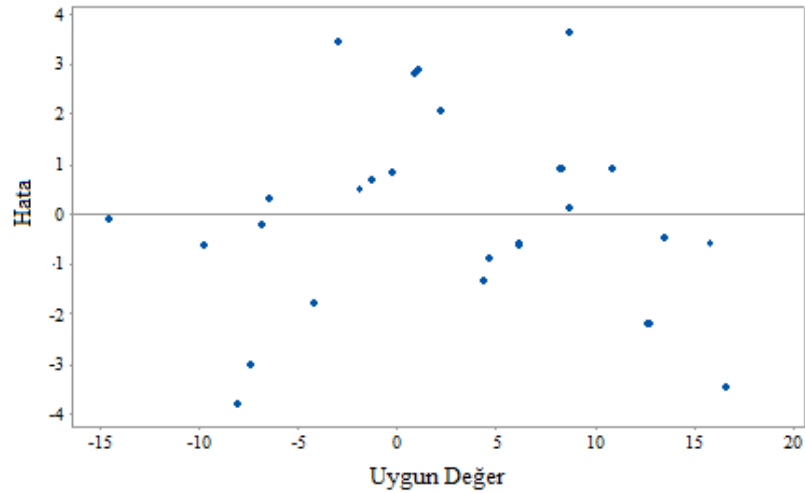


Şekil 4.17 Tasarımların 7 günlük dayanımları için SN oranları için ana etkiler grafiği



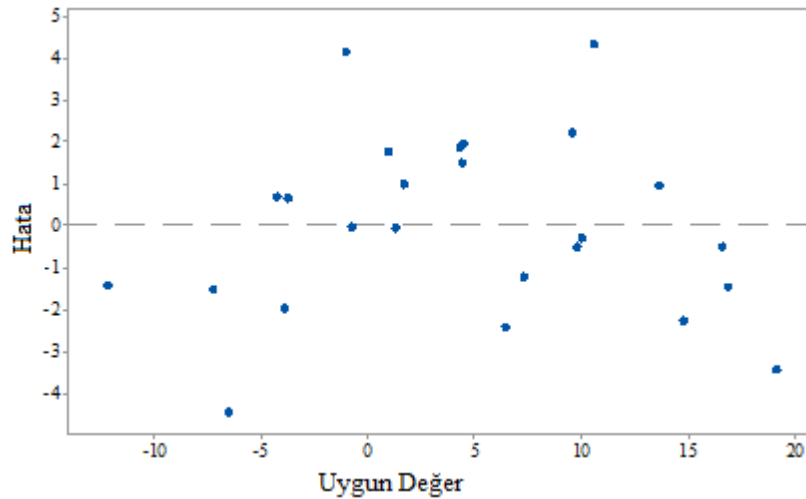
Şekil 4.18 Tasarımların 28 günlük dayanımları için SN oranları için ana etkiler grafiği

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de verilen etkileşim grafiğinde görülen dağılım sonuçların uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.19 Tasarımların 7 günlük dayanımları için SN oranlarının etkileşimi





Şekil 4.20 Tasarımların 28 günlük dayanımları için SN oranlarının etkileşimi

Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de deney sonuçlarının sırasıyla 7 ve 28 günlük S/N oranları için varyans analizleri yapılmıştır. Buradaki sonuçlar irdelendiğinde  $R^2$  değerlerinin 7 ve 28 günlük deney sonuçları için sırasıyla %94.80 ve %93.70 çıkması deney tasarımlarının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Varyans analizi sonuçlarında görüldüğü üzere dayanım üzerinde birinci etkili değişken F değeri yaklaşık 40 olan EPS’dir. Dayanımlarda ikinci etkili olan değişken F değeri yaklaşık 8.75 değeri ile Ç/K değişkenidir. Varyans analizi sonuçlarına göre F değeri yaklaşık 0.34 değeri ile atık lastik etkisi olmadığı anlaşılmaktadır.

Tasarımlardaki ilişkinin anlamlı olup olmadığını anlamak ve modeli yorumlamak için P anlamlılık düzeyi hesaplanmıştır. P sayısı sıfıra eşit veya yakın olduğunda terim ile yanıt arasında bir ilişki olduğu anlamına gelmektedir. Genellikle 0.05 anlamlılık düzeyi ( $\alpha$ ) fiili bir ilişki olmadığında, bir ilişkinin var olduğu sonucuna varılma riskinin %5 olduğunu gösterir (Noori, 2019).

- P değeri  $\leq \alpha$ ; İlişki istatistiksel olarak anlamlı
- P değeri  $> \alpha$ ; İlişki istatistiksel olarak anlamlı değil

Çizelge 4.3- 4.4’de verilen Ç/K ve EPS için P değerleri  $\leq \alpha$  olduğu için dayanıma etkisinin olduğu anlaşılmaktadır (Noori, 2019). EPS bocuklarının P değeri 0.00 olduğu için dayanıma etkisinin en fazla olduğu anlamına gelmektedir.

**Çizelge 4.3** Tasarımların 7 günlük dayanımları için SN oranlarının Varyans Analizi

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplam	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Ortalaması	F	P
Ç/K	4	295.43	295.43	73.858	9.25	0.001
EPS	4	1432.04	1432.04	358.011	44.83	0.000
Lastik	4	11.72	11.72	2.929	0.37	0.828
Ölçüm Hatası	12	95.82	95.82	7.985		
Toplam	24	1835.02				
S	2.826					
R <sup>2</sup>	94.80%					
Düzeltilmiş R <sup>2</sup>	89.60%					

**Çizelge 4.4** Tasarımların 28 günlük dayanımları için SN oranlarının Varyans Analiz

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplam	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Ortalaması	F	P
Ç/K	4	311.39	311.39	77.847	8.36	0.002
EPS	4	1353.44	1353.44	338.361	36.32	0.000
Lastik	4	11.53	11.53	2.883	0.31	0.866
Ölçüm Hatası	12	111.79	111.79	9.315		
Toplam	24	1788.15				
S	3.052					
R <sup>2</sup>	93.70%					
Düzeltilmiş R <sup>2</sup>	87.50%					

Tez çalışmasında Minitab programı kullanılarak Taguchi tasarım yöntemi ile tasarımlar oluşturulmuştur. Tasarımların doğruluğunun kontrolü için Taguchi tasarım yöntemi ile en yüksek en iyi tasarımı vereceği Ç/K oranı 16/1, EPS ve atık lastik oranı %10 olan numuneler hazırlanmıştır. Numuneler 7 günlük kür sürelerinde bekletilerek serbest basınç deneyi yapılarak sonuçlar Çizelge 4.5’de verilmiştir.

**Çizelge 4.5** Serbest basınç tasarım sonuçları ve doğruluk yüzdeleri

Tasarım İçeriği(ağırlıkça)	Analiz Sonucu (MPa)	Deney Sonucu (MPa)	Doğruluk Yüzdesi (%)
Ç/K=16/1, EPS %10, Atık lastik %10	5.3064	5.013	94.47

Çizelge 4.5 incelendiğinde analiz sonucunda serbest basınç dayanımı 5.3064 MPa bulunmuştur. Aynı çizelge incelendiğinde hazırlanan numunenin deney sonucu 5.013 MPa bulunmuştur. Tasarımın doğruluk yüzdesi 94.47 olarak bulunmuştur.

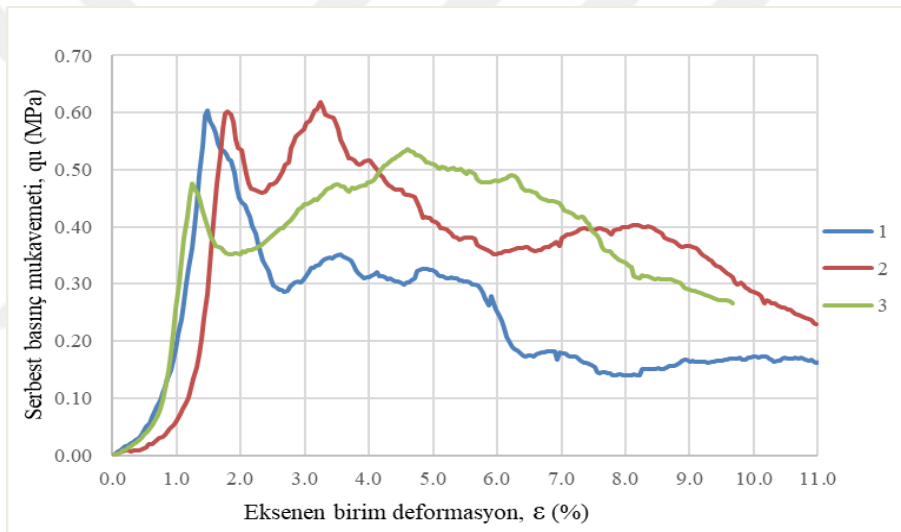
#### 4.1.2. 3, 9, 10, 15 ve 20 No’lu tasarımların serbest basınç dayanımı sonuçları

Hafif dolgu malzemesi olarak kullanılabilen tasarımların, farklı zamanlarda tekrardan numuneleri hazırlanarak serbest basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları ilk numunelerin sonuçları karşılaştırıldığında yakın sonuçlar çıktığı

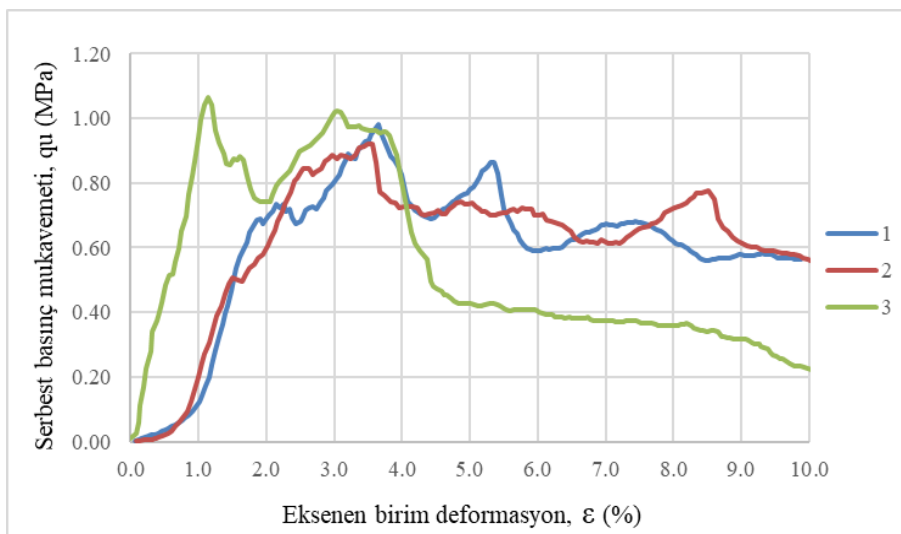
görülmüştür. Numuneler test yapılmadan önce ağırlıkları ve boyutları ölçülerek 7 ve 28 günlük yoğunlukları hesaplanmıştır (Çizelge 4.6). Deneyde elde edilen veriler Şekil 4.21-4.30 normal gerilme şekil değiştirme grafikleri verilmiştir. Test sonuçları Çizelge 4.7’de ortalamaları bulunarak verilmiştir.

**Çizelge 4.6** Tasarımların 7 ve 28 günlük yoğunlukları

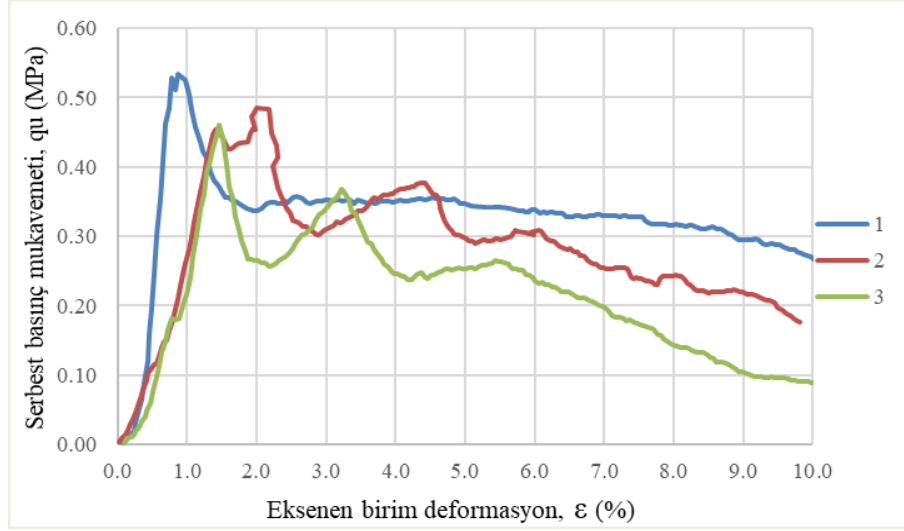
Tasarım No	Tasarım Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1-7	2-7	3-7	7 günlük Ortalama Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1-28	2-28	3-28	28 günlük Ortalama Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
3	0.504	0.605	0.616	0.581	0.601	0.696	0.655	0.781	0.711
9	0.474	0.567	0.562	0.525	0.551	0.612	0.574	0.583	0.590
10	0.403	0.418	0.460	0.431	0.436	0.548	0.488	0.580	0.539
15	0.459	0.445	0.415	0.422	0.427	0.536	0.504	0.516	0.519
20	0.510	0.619	0.666	0.696	0.660	0.593	0.557	0.614	0.588



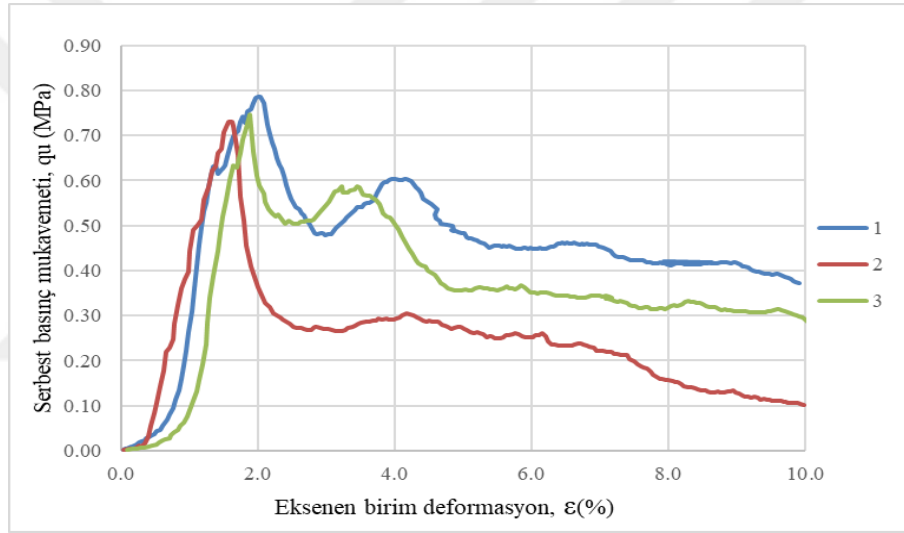
**Şekil 4.21** 3 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



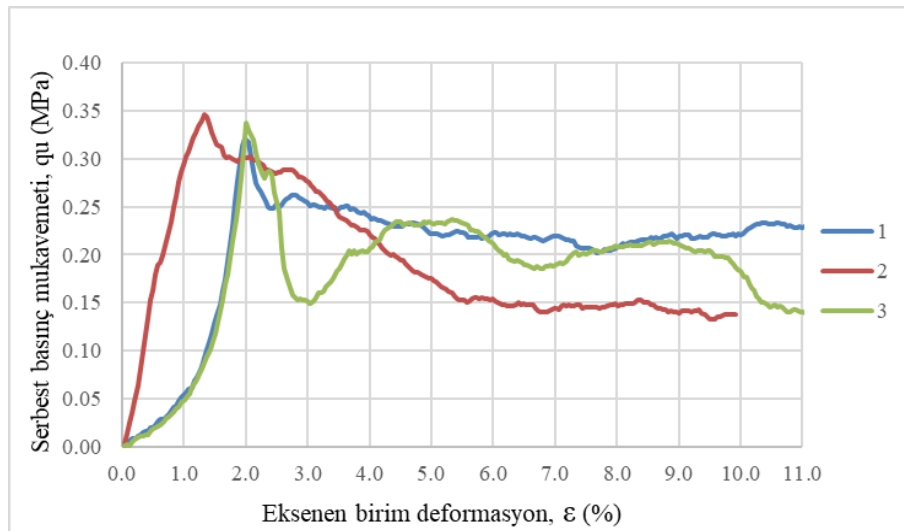
**Şekil 4.22** 3 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



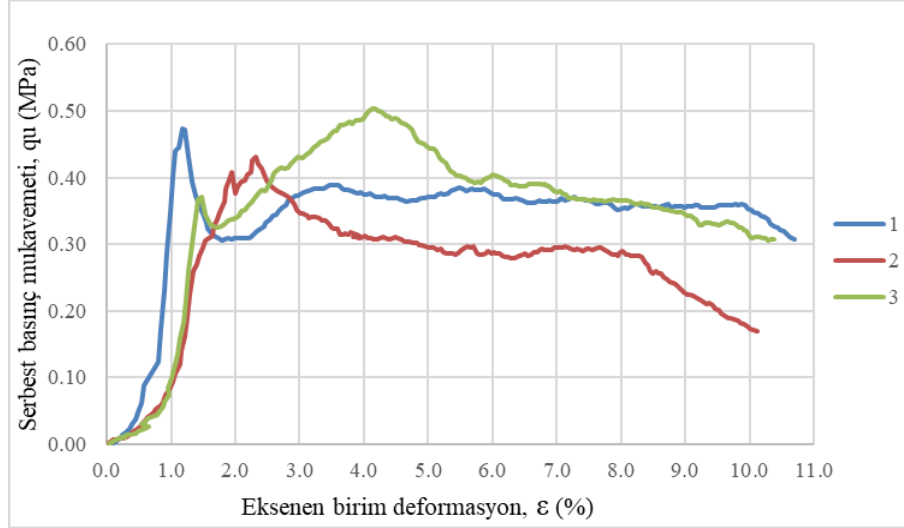
Şekil 4.23 9 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



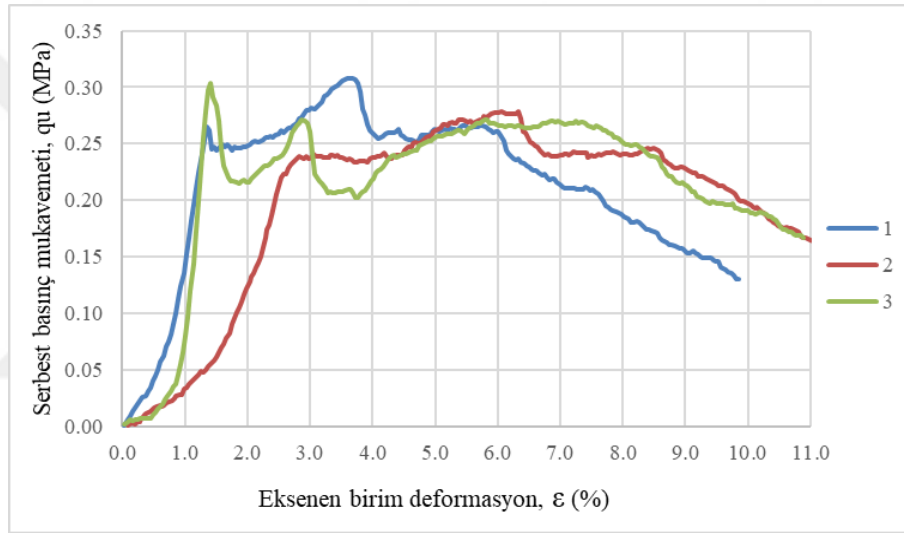
Şekil 4.24 9 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



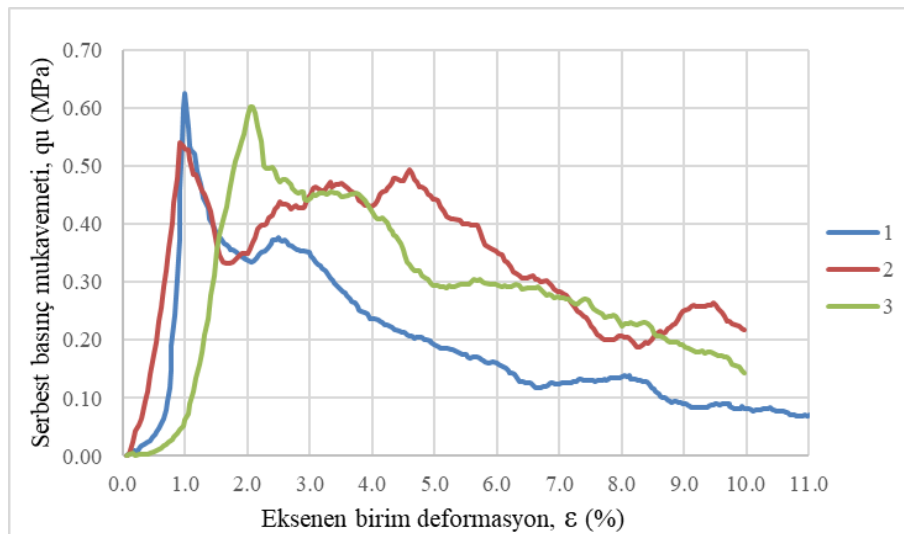
Şekil 4.25 10 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



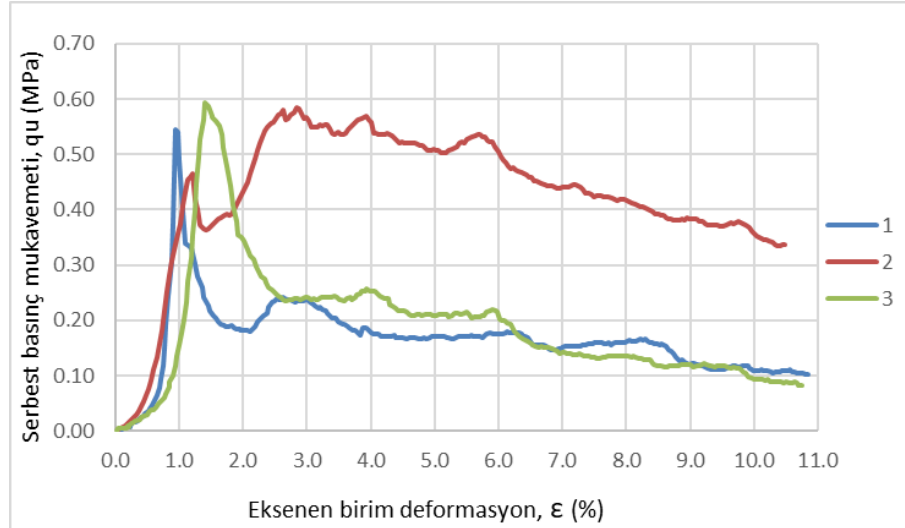
Şekil 4.26 10 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



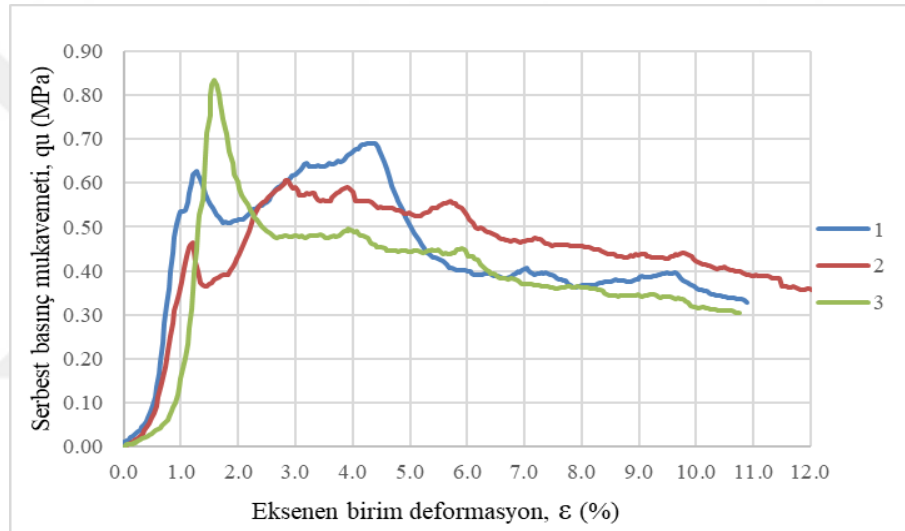
Şekil 4.27 15 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



Şekil 4.28 15 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



Şekil 4.29 20 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- eksenel birim deformasyon grafiği



Şekil 4.30 20 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- eksenel birim deformasyon grafiği

Çizelge 4.7 Tasarımların 7 ve 28 günlük serbest basınç deneyi sonuçları

Tasarım No	7. Günlük Dayanım	7. Günlük Dayanım Ort.	28.Günlük Dayanım	28.Günlük Dayanım Ort.
3-1	0.6		0.98	
3-2	0.62	0.59	0.92	0.95
3-3	0.54		1.07	
9-1	0.53		0.79	
9-2	0.48	0.49	0.73	0.76
9-3	0.46		0.75	
10-1	0.32		0.47	
10-2	0.35	0.34	0.43	0.47
10-3	0.34		0.5	
15-1	0.31		0.63	
15-2	0.28	0.30	0.54	0.59
15-3	0.3		0.6	
20-1	0.54		0.69	
20-2	0.58	0.57	0.61	0.71
20-3	0.59		0.83	

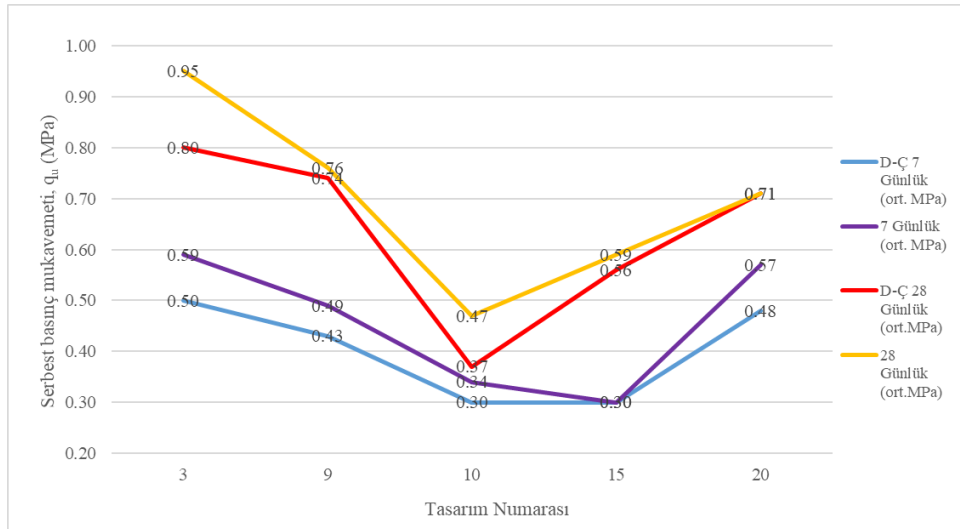
#### 4.2. Donma Çözülme Deneyleri Sonuçları

Hafif dolgu olarak kullanılabilen 3, 9, 10, 15 ve 20 No'lu tasarımların 7 ve 28 gün kür sürelerinde bekletilerek donma çözülme deneyleri yapılmıştır. Donma çözülme sonucunda serbest basınç deneyleri yapılarak dayanımları belirlenmiştir (Çizelge 4.8).

3 numaralı tasarımda 28 günlük kür süresinde dayanım ortalama dayanım 0.95 MPa bulunmuş ve aynı tasarımda donma-çözülme sonucunda ortalama dayanım 0.80 MPa olarak bulunmuştur. 20 numaralı tasarımda 28 günlük kür süresinde dayanım ortalama 0.72 MPa bulunmuş ve aynı tasarımda donma-çözülme sonucunda ortalama 0.71 MPa olarak bulunmuştur. 3 numaralı tasarımda dayanım farkının fazla olması yalıtım malzemesi olarak kullanılan EPS boncuklarının az olduğundan kaynaklanmaktadır. 9, 10, 15 ve 20 No'lu tasarımlarda EPS oranı %30'dan fazla olduğu için dayanım değerleri birbirine yakın çıktığı görülmüştür. Deney sonuçları donma çözülmeden sonra numunelerin dayanımlarında genel olarak azalma olmuştur. EPS oranı az olan tasarımlarda dayanım farkı fazla olduğu anlaşılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.8'da ve serbest basınç deneyi grafikleri ise Ek-2'de verilmiştir.

**Çizelge 4.8** 7 ve 28 günlük donma çözülme sonrasında numunelerin dayanımları

Tasarım No	7. Günlük Dayanım	7. Günlük Dayanım Ort.	28.Günlük Dayanım	28.Günlük Dayanım Ort.
3-1	0.49		0.76	
3-2	0.51	0.50	0.83	0.80
3-3	0.50		0.95	
9-1	0.43		0.76	
9-2	0.42	0.43	0.68	0.74
9-3	0.44		0.78	
10-1	0.29		0.37	
10-2	0.31	0.30	0.38	0.37
10-3	0.29		0.36	
15-1	0.28		0.54	
15-2	0.30	0.30	0.62	0.56
15-3	0.31		0.51	
20-1	0.48		0.74	
20-2	0.49	0.48	0.70	0.71
20-3	0.48		0.68	



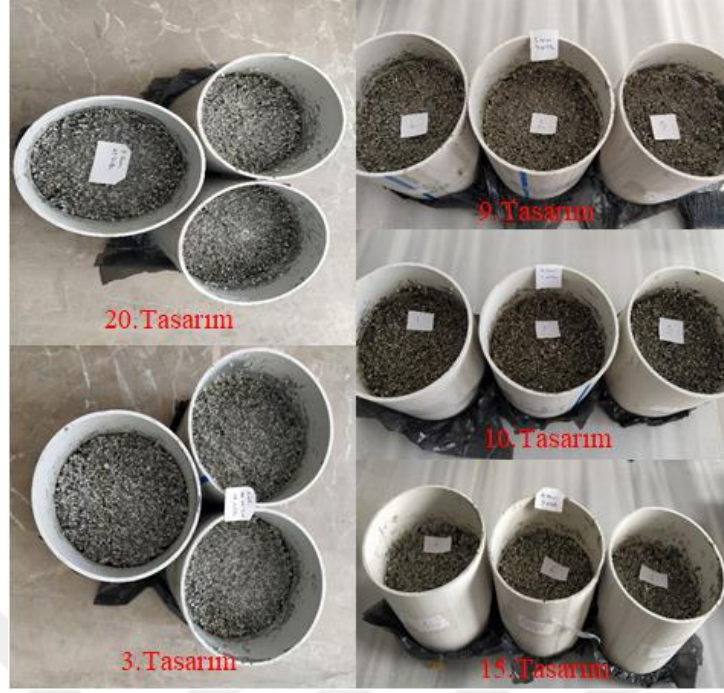
Şekil 4.31 Tasarımların dayanımları ve D-Ç sonrası dayanımlarının karşılaştırılması

### 4.3. CBR Deneylerinin Sonuçları

Hafif dolgu malzemesi olarak kullanılabilen 3, 9, 10, 15 ve 20 No'lu tasarımların serbest basınç deneyi sonuçları 0.3-1.0 MPa arasında kaldığından dolayı hafif dolgu için uygun olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.31'da görüntüleri verilen numuneler hazırlanmıştır ve 7 ve 28 gün kürde bekletilerek CBR değerleri bulunmuştur (Şekil 4.32). Deney sonuçlarında tüm tasarımların 2.5mm penetrasyonda CBR değerleri, 5mm penetrasyondaki CBR değerinden küçük çıkmıştır. Deney sonuçları tanımlanırken 5mm penetrasyondaki CBR değeri kullanılmıştır.

Deneyi yapılan numunelerin görünümü Şekil 4.32'de verilmiştir. Çizelge 4.9'da verilen deney sonuçları, Çizelge 4.10 verilen CBR değerlerinin sınıflandırılmasına göre 3 ve 20 No'lu tasarımların sırasıyla, 31.74 ve 24.44 CBR değeri ile 'iyi' sınıfı tanımına uygun olmakta ve temel veya alt temel tabakası olarak kullanılabilen sonucuna varılmıştır. 9, 10, 15 No'lu tasarımlar ise CBR değeri 7-20 arasında bulunmuştur ve 'orta' sınıfı tanımına uygun olmaktadır. 9, 10, 15 No'lu tasarımlar alt temel tabakası olarak kullanılabilen belirlenmiştir. CBR deney sonuçlarının Penetrasyon-yük grafikleri EK-3'de verilmiştir.

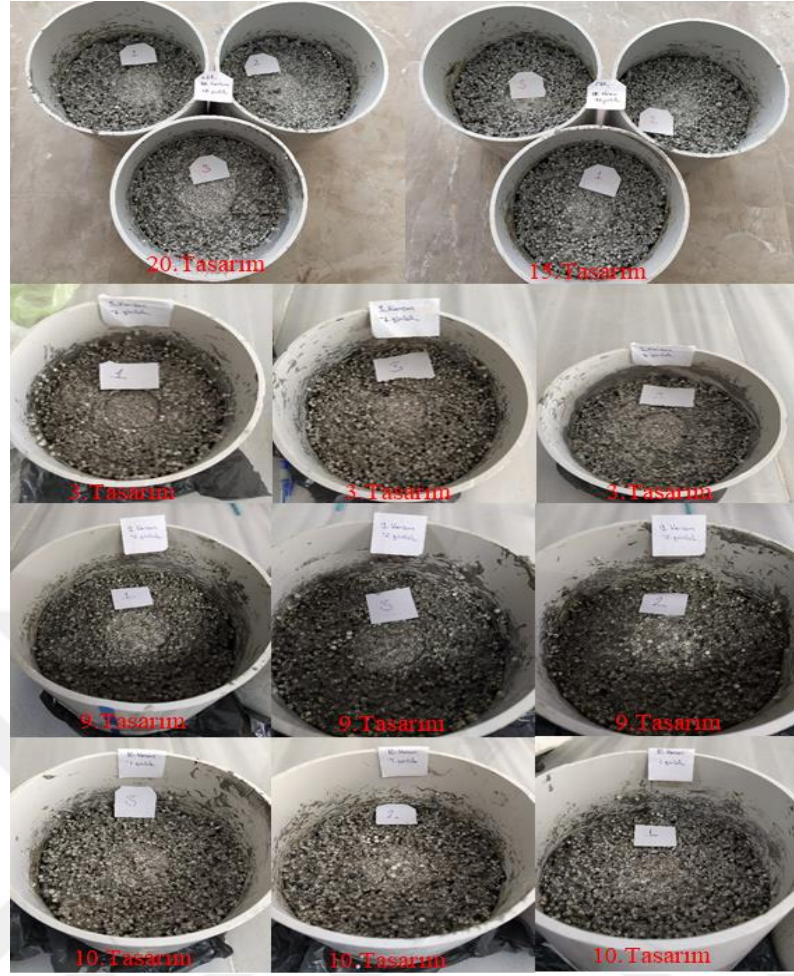




Şekil 4.31 CBR deneyi için hazırlanan numuneler



Şekil 4.32 CBR deneyi esnasındaki numune görünümü



Şekil 4.33 CBR deneyi yapılmış numunelerin görünümü

Çizelge 4.9 Tasarımların 7 ve 28 günlük CBR sonuçları

Tasarım No	7 günlük Ort. CBR		28 günlük Ort. CBR	
	2.5 mm	5 mm	2.5 mm	5 mm
3	17.45	20.42	21.53	31.74
9	7.03	11.27	10.93	19.72
10	5.57	8.56	7.52	11.02
15	6.47	10.65	10.01	18.07
20	14.47	19.01	18.35	24.44

Çizelge 4.10 CBR değerlerinin sınıflandırılması (Bowles, 1988).

CBR Değeri (%)	Genel Değerlendirme	Kullanım Alanı	Sınıflandırma Sistemi
			Birleşik
0-3	Çok zayıf	Doğal zemin	OH, CH, MH, OL
3-7	Zayıf	Doğal zemin	OH, CH, MH, OL
7-20	Orta	Alt temel	OL, CL, ML, SC, SM, SP
20-50	İyi	Temel veya alt temel	GM, GC, SW, SM, SP, GP
>50	Çok iyi	Temel	GW, GM

#### 4.4. Geçirimsizlik Deneyleri Sonuçları

Hafif dolgu malzemesi olarak kullanılabilen 3, 9, 10, 15 ve 20 No'lu tasarımların geçirimsizlik deneyi için 50 mm çapında kalıplara numuneler hazırlanmıştır. 7 ve 28 günlük kür sürelerinden sonrasında sabit seviyeli geçirimsizlik deneyi yapılmış ve tasarımların geçirimsizlik özellikleri belirlenmiştir. Deney sonuçları Çizelge 4.12'de verilmiştir. Çizelge 4.11'e göre permeabilite kat sayıları  $1.00 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$  cm/sn aralığında olan zeminler düşük geçirimsizlik sınıfına girmektedir. Geçirimsizlik deneyi sonuçlarına göre tasarımların permeabilite kat sayıları bu aralıkta olduğundan dolayı düşük geçirimsizliğe sahip olarak bulunmuştur. Permeabilite katsayısı literatürdeki diğer çalışmalarla yakın değerler verdiği görülmüştür.

**Çizelge 4.11** Zeminlerin permeabilite katsayılarına göre sınıflandırılması (Ahmedov, 2012)

Zemin Tipi	Permeabilite katsayısı k (cm/sn)	Permeabilite değeri
Çakıl	$1.0 - 1 \times 10^2$	Yüksek
Kaba kum	$1.0 - 1 \times 10^{-2}$	Orta
İnce kum	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$	Düşük
Siltler	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-5}$	Çok düşük
Kil	$< 1 \times 10^{-6}$	Pratik olarak geçirimsiz

**Çizelge 4.12** Tasarımların 7 ve 28 günlük geçirimsizlik deneyi sonuçları

Tasarım No	Su Geçişi Süresi (t) (sn.)	Geçirimsizlik Katsayısı (k) (cm/sn.)		Ortalama Geçirimsizlik Katsayısı (k) (cm/sn.)	
		7 Günlük	28 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
3-1	60	$1.53 \times 10^{-2}$	$1.42 \times 10^{-2}$		
3-2	60	$1.56 \times 10^{-2}$	$1.44 \times 10^{-2}$	$1.545 \times 10^{-2}$	$1.430 \times 10^{-2}$
9-1	60	$4.39 \times 10^{-2}$	$4.17 \times 10^{-2}$		
9-2	60	$4.41 \times 10^{-2}$	$4.23 \times 10^{-2}$	$4.400 \times 10^{-2}$	$4.200 \times 10^{-2}$
10-1	60	$5.97 \times 10^{-2}$	$5.77 \times 10^{-2}$		
10-2	60	$5.84 \times 10^{-2}$	$5.70 \times 10^{-2}$	$5.905 \times 10^{-2}$	$5.735 \times 10^{-2}$
15-1	60	$5.27 \times 10^{-2}$	$5.16 \times 10^{-2}$		
15-2	60	$5.53 \times 10^{-2}$	$5.46 \times 10^{-2}$	$5.400 \times 10^{-2}$	$5.310 \times 10^{-2}$
20-1	60	$2.12 \times 10^{-2}$	$1.92 \times 10^{-2}$		
20-2	60	$2.08 \times 10^{-2}$	$1.91 \times 10^{-2}$	$2.100 \times 10^{-2}$	$1.905 \times 10^{-2}$

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Geoteknik mühendisliğinde problemlerden birisi yumuşak, taşıma gücü olmayan, oturma sorunu olan ve kendini tutamayan zeminlerdir (Tuncel, 2012). Bu tür zeminlerin iyileştirme yöntemlerinden birisi de üzerine normal zemin dolgusu yerine hafif dolgular teşkil edilerek zemine etki eden yükleri azaltmaktır. Ayrıca hafif dolgular istinat duvarı gibi dayanma yapılarının arkasında kullanılarak yapıya gelen kuvvetleri azalmaktadır. Benzer şekilde şehir merkezlerindeki yer altı yapılara gelen yükleri azalmak için de hafif dolgu kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında EPS, atık lastik, çimento ve kum malzemelerinin belirli oranlarda karışımıyla oluşturulan hafif dolgunun mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Bu kapsamda, yoğunlukları  $0.016 \text{ g/cm}^3$  EPS boncukları temin edilmiştir. Yapılan elek analizi sonucuna göre tane çapları 2-5 mm aralığında olduğu belirlenmiştir. Temin edilen atık lastiklerin laboratuvarında yapılan piknometre deneyi sonucunda özgül ağırlığının  $1.0 \text{ g/cm}^3$  olduğu bulunmuştur. Tasarımlarda kullanılan kum malzemesinin özelliklerinin belirlenmesi için piknometre deneyi, elek analizi ve sıkıştırma testleri yapılmıştır. Yapılan bu deney sonuçlarından kumun özgül ağırlığı  $2.64 \text{ g/cm}^3$ , USCS zemin sınıflandırmasına göre iyi derecelendirilmiş kum (SW) ve sıkıştırma testi sonucunda optimum su muhtevası (w) 6.40 ve kumun kuru birim hacim ağırlığı ( $\rho_k$ )  $1.64 \text{ gr/cm}^3$  olarak bulunmuştur. Kumun minimum ve maksimum boşluk oranları hesaplanarak  $e_{\min}=\%20$  ve  $e_{\max}=\%79$  olarak bulunmuştur.

Hafif dolgu tasarımlarında ağırlıkça çimento/karışım oranı 8/1, 10/1, 12/1, 14/1 ve 16/1 kullanılmıştır. EPS ve atık lastik ağırlıkça %10-20-30-40-50 oranlarında kullanılarak 25 tasarım hazırlanmıştır. Oluşturulan tasarımların dolgu yapıldığında geri kazılma ihtimalinden dolayı 28 günlük dayanım değerinin en fazla 1.00 MPa ve 7 günlük en düşük dayanım değeri 0.30 MPa olması amaçlanmıştır (Tuncel, 2012).

Hazırlanan numuneler 7 ve 28 günlük kür süresi sonucunda serbest basınç deneyi yapılmıştır. Serbest basınç deneyi dayanım değerleri çimento/ karışım oranı 8/1, %30 EPS ve %30 atık lastik içeren 3 No'lu tasarımın 7 günlük dayanım ortalaması 0.52 MPa ve 28 günlük dayanım ortalaması 0.94 MPa çıkmıştır. 9 No'lu tasarımın çimento/ karışım oranı 10/1, %40 EPS ve %50 atık lastik içeriğiyle 7 günlük dayanım ortalaması

0.45 MPa ve 28 günlük dayanım ortalaması 0.68 MPa çıkmıştır. 10 No'lu tasarımın çimento/ karışım oranı 10/1, %50 EPS ve %10 atık lastik içeriğiyle 7 günlük dayanım ortalaması 0.30 MPa ve 28 günlük dayanım ortalaması 0.37 MPa çıkmıştır. 15 No'lu tasarımın çimento/ karışım oranı 12/1, %50 EPS ve %20 atık lastik içeriğiyle 7 günlük dayanım ortalaması 0.31 MPa ve 28 günlük dayanım ortalaması 0.55 MPa çıkmıştır. Tasarımlardan hafif dolgu için dayanım aralığı uygun bulunan 20 No'lu tasarımın, çimento/ karışım oranı 14/1, %50 EPS ve %30 atık lastik içeriğiyle 7 günlük dayanım ortalaması 0.50 MPa ve 28 günlük dayanım ortalaması 0.72 MPa çıkmıştır. Tasarımlarda kullanılan EPS boncukları ve atık lastik malzemesi numunelerin sünekliğini artırmaktadır.

Taguchi tasarım yöntemi kullanılarak serbest basınç deney sonuçlarının analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda;

- Tasarımlarda çimento oranı arttıkça tasarımların dayanımlarının arttığı,
- EPS oranı arttıkça tasarımların dayanımlarının azaldığı
- Atık lastik oranlarının tasarımlarda dayanıma etkisinin olmadığı anlaşılmıştır.
- $R^2$  değerlerinin 7 ve 28 günlük deney sonuçları için sırasıyla %94.80 ve %93.70 çıkması deney tasarımlarının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Tez çalışmasında hazırlanan tüm numunelerin yoğunlukları  $0.360 - 1.343 \text{ g/cm}^3$  aralığında bulunmuştur. Tasarımlarda EPS boncuk oranı arttıkça yoğunluğun azaldığı anlaşılmaktadır. Tüm numunelerin yoğunluk değerleri zemin dolgu yoğunluğundan az bulunmuştur.

SBD sonucunda 7 günlük dayanımı 0.3 MPa'ın üstünde ve 28 günlük dayanım değeri 1.00 MPa'ın altında olan 3, 9, 10, 15 ve 20 No'lu tasarımların hafif dolgu malzemesi olarak kullanılabilceği belirlenmiştir. Bu tasarımlarda numuneler hazırlanarak donma çözülme, CBR ve geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır.

Donma çözülme deneyi için numuneler hazırlanmış 7 ve 28 gün kür süreleri sonunda,  $-18^\circ\text{C}$  ile  $-22^\circ\text{C}$  sıcaklıklarda derin dondurucuda 12 saat bekletilmiş ve sonrasında derin dondurucudan çıkarılarak 12 saat çözülmesi için bekletilmiştir. Bu işlem 10 defa tekrar edilmiş ve numuneler serbest basınç deneyi yapılmıştır. Donma çözülme sonucunda numunelerin dayanımları donma çözülme yapılmayan numuneler ile karşılaştırılmıştır. Donma çözülme sonucunda dayanımın azaldığı görülmüştür. EPS

oranı %30 olan numunelerde dayanım değerlerinin EPS oranı %30'dan fazla olan numunelere göre fazla olduğu görülmüştür.

CBR deneyi sonucunda 3 No'lu tasarımın 28 günlük kür süresinde bekletilen numunede 5 mm'lik penetrasyonda 31.74 CBR değeriyle temel veya alt temel tabakası olarak kullanılabilceği belirlenmiştir. 20 No'lu tasarımın 28 günlük kür süresinde bekletilen numunede 5 mm'lik penetrasyonda 24.44 CBR değerleri bulunmuştur. Bu değerin 28 günlük CBR değeri ile temel veya alt temel tabakası olarak kullanılabilceği belirlenmiştir. 9, 10 ve 15 No'lu tasarımlar 28 günlük kür süresinde bekletilen numunelerde 5mm'lik penetrasyonda CBR değerleri sırasıyla 19.72, 11.02 ve 18.07 değerleri bulunmuştur. Literatürde özgül ağırlığı  $4.31 \text{ kN/m}^3$  olan cam köpüğü ile hazırlanan hafif dolgunun, 7 ve 28 günlük CBR değerleri sırasıyla %38.4 ve %78.9 olarak bulunmuştur (Tuncel, 2012). Tuncel'in çalışmasında bulunan CBR değeri ile kıyaslandığında küçük çıkmıştır. Ahmedov'un yaptığı çalışmada  $0.0011 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğunda EPS bocuklar kullanılarak hazırlanan hafif dolgunun 28 günlük CBR değeri ortalama %6.5 olarak bulmuştur. Ahmedov'un yaptığı çalışmada bulunan CBR değeri ile kıyaslandığında bu çalışmadaki CBR değerleri yüksek çıktığı görülmektedir. Bu CBR değerleri alt temel tabakası olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır. Geçirimsizlik deneyi sonucunda tüm deneylerin permeabilite katsayıları  $1.0 \times 10^{-2} - 1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/sn}$  aralığında olduğu için düşük geçirimsizlik sınıfına girmektedir.

Bu tez çalışmasında hazırlanan 25 tasarımdan 3, 9, 10, 15 ve 20 No'lu tasarımların serbest basınç deneyleri sonucunda hafif dolgu olarak yumuşak zeminler üzerine dolgu teşkilinde, istinat yapıları geri dolgusu olarak, alt yapılara gelen yükleri azaltmak için zemin dolgusu yerine kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

## 5.2. Öneriler

Tasarımlar hazırlanırken malzemelerin karıştırma sırası homojen karışım için önemlidir. Tasarımlarda ağırlıkça %10, 20, 30, 40 ve 50 oranlarında atık lastik kullanılmıştır. Bu atık lastik oranları tasarım içerisinde hacimce EPS oranlarından çok küçük kalmaktadır ve dayanımda etkisinin olmadığı düşünülmektedir. Farklı atık lastik ve EPS oranları ile tasarımlar hazırlanarak atık lastiğin dayanıma etkisi artırılabilir.



## 6. KAYNAKLAR

- Aab e, R., & Frydenlund, T. E. (2011). 40 Years of Experience with the use of EPS Geofoam Blocks in Road Construction. *4. International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications*, (s. 6-8). Lillestr m.
- Aab e, R., Bartlett, S. F., Duřkov, M., Frydenlund, T. E., Mandal, J. N., Negussey, D., . . . Vaslestad, J. (2018). Geofoam Blocks in Civil Engineering Applications. *The 5th International Conferences on Geofoam Blocks In Construction Applications*, (s. 3-38). K.K.T.C.
- ACI. (1999). Controlled Low-Strength Materials. *ACI 229R-99 Committee Report*.
- ACI. (2000). Cement and Concrete Terminology. *ACI 116R-00 Committee Report*.
- Ahmedov, R. (2012).  imento-EPS-Kum Karışımının Hafif Dolgu Malzemesi Olarak Geoteknik  zelliklerinin Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitsi*. İstanbul.
- Aksoy, İ. H. (1998, Ekim 22-23). Polistiren K pgn Hafif Dolgu Olarak Kullanılması. *Yıldız Üniversitesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi, Cilt I*, s. 428-437. İstanbul.
- Alqaissi, Z. H. (2012). Behavior of Strip Footings Resting on Sand Mixed with Tire-Chips. *Journal of Engineering and Development*, 12(4), 142-156.
- ASTM D2166. (2016). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. 1-8. ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D6817. (2013). Standard Specification for Rigid Cellular Polystyrene Geofoam. *American Society for Testing and Materials*. USA.
- Atabek, B. A. (2008). Determination Of Properties Of Composite Soil With Used Tire Granulates, Sand And Cement. *M. Sc. Thesis, İstanbul Technical University, Institute Of Science And Technology*. İstanbul.
- Bartlett, S. F., Lingwall, B. N., & Vaslestad, J. (2015). Methods of protecting buried pipelines and culverts in transportation infrastructure using EPS geofoam. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(5), 450-461.
- BASF Corp. (1998). "Rigid Styropor foam as a lightweight construction BASF material for highway foundations: GEOFOAM" Technical Information, BASF Corp., Germany.
- Bowles, J. (1988). *Engineering Properties of Soils and Their Measurement*. Singapore: McGraw-Hill Book Company.

- Das, B. M. (2006). Principles of Geotechnical Engineering. *Sixth Edition, Nelson Press, Thompson Canada Limited.*
- Demiröz , A. (2008). Geogrid Donatılı Kum Üzerine Oturan Sürekli Temellerde Taşıma Gücünü Etkileyen Tasarım Faktörlerinin Deneysel Olarak Araştırılması. *Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.* Konya.
- Elragi, A. F. (2000). Selected Engineering Properties and Applications of EPS Geofoam. *ProQuest Dissertations, State University of New York, College of Environmental Science and Forestry, . New York.*
- EPSDER. (2021). *Geofoam Yenilikçi Hafif Dolgu Mazemeleri.* 11 4, 2021 tarihinde EPS Sanayi Derneği: [www.epsder.org.tr](http://www.epsder.org.tr) adresinden alındı
- Fedroff, D., Ahmad, S., & Savas, B. Z. (1996, ocak 1). Mechanical Properties of Concrete with Ground Waste Tire Rubber. *Transportation Research Record No. 1532, Transportation Research Board, 66-72.*  
doi:<https://doi.org/10.1177/0361198196153200110>
- Fındık, F. S. (2005). Karayolu Esnek Üstyapıları Alttemel Tabakasının Stabilizasyonunda Hafif Agregaların Kullanılabilirliği. *Yüksek Lisans Tezi, S.D.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü.* Isparta.
- Gever, B., Güneş , B. N., Gülel, D., Ataseven, E. B., Saatcıoğlu, Ö., & Bebek, Z. S. (2014). Bir Üretim İşletmesinin Verileri Kullanılarak Çarpımsal Deneysel Tasarımı İle Taguchi Yaklaşımının Karşılaştırılması. *TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Dergisi, 26(1), 2-26.*
- Haghi, A. K., Arabani, M., & Ahmadi, H. (2006). Applications of Expanded Polystyrene (EPS) Beads and Polyamide-66 in Civil Engineering, Part One: Lightweight polymeric concrete. *Composite Interfaces, 13(4-6), 441-450.*  
doi:<https://doi.org/10.1163/156855406777408575>
- Haşal, E. (2000). Ucucu Kül-Çimento- Köpük Karışımının Hafif Dolgu Malzemesi Olarak Geoteknik Özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.* İstanbul.
- Horvath, J. (1999). *Lessons Learned from Failures Involving Geofoam in Roads and Embankments.* New York: Manhattan College Research Report No. CE/GE-99-1).
- Işık, F. (2000). Taguchi Metodu ve Bir Uygulama. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.* İstanbul.
- Karaman, M., & Ecemiş, N. (2017). Kum - Lastik Kırpıntı Çapının ve Karışım Oranının Sıvılaştırma Potansiyeline Etkisinin Sarsma Tablası Deneysel İle İncelenmesi. 7. *Geoteknik Sempozyumu,* (s. 677-688). İstanbul.



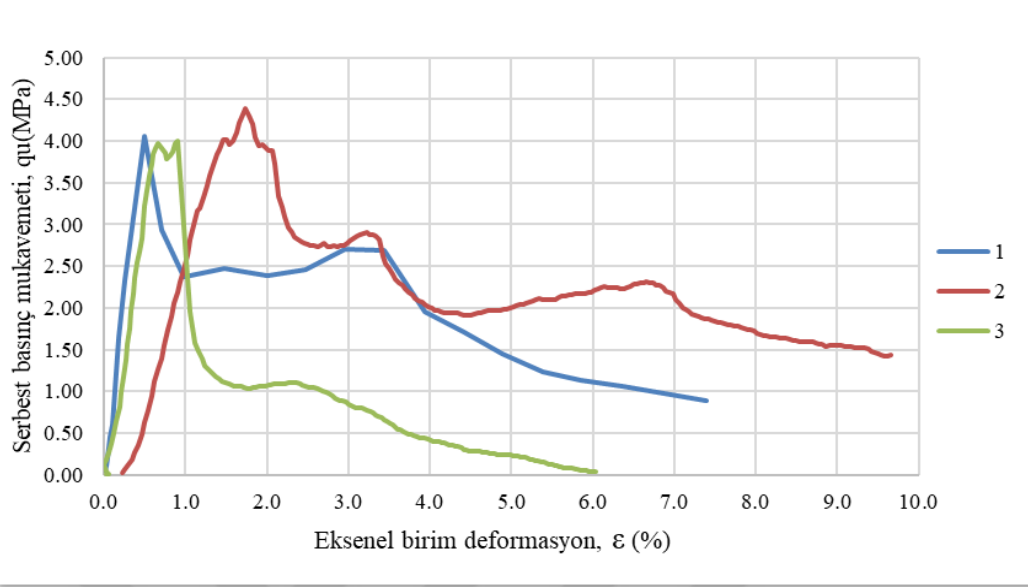
- Karna, S. K., & Sahai, R. (2012). An Overview on Taguchi Method. *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences*, 1, 1-7.
- Kiriş, H. H. (2019). Genleştirilmiş Polistiren (EPS) Köpüğün Geoteknikte Kullanılması. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- LASDER. (2021). <https://www.lasder.org.tr/otl/>. 12 9, 2021 tarihinde www.lasder.org.tr. adresinden alındı
- Liu, H.-l., Deng, A., & Chu, J. (2006). Effect of different mixing ratios of polystyrene pre-puff beads and cement on the mechanical behaviour of lightweight fill. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(6), 331-338. doi:10.1016/j.geotexmem.2006.05.002
- MEB. (tarih yok). MEGEP (Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi), İnşaat Teknolojisi Zemin Deneyleri-IV. Ankara, 2006.
- Miao, L., Wang, F., Han, J., Lv, W., & Li, J. (2013). Properties and Applications of Cement-Treated Sand-Expanded Polystyrene Bead Lightweight Fill. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 25(1), 86-93. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000556.
- Najmaddin, D. Y. (2012). Compaction and CBR Properties Of Sand Mixed with Modified Waste EPS. *M.Sc. Thesis, University of Gaziantep, Graduate School of Natural & Applied Sciences*. Gaziantep.
- Noori, M. A. (2019). Katkı İçerikli Derin Karıştırma Kolonları Performans Özelliklerinin Model Deneylerle Araştırılması. *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*. Konya.
- Pierce, C., & Blackwell, M. (2002). Potential of Scrap Tire Rubber as Lightweight Aggregate in Flowable Fill. *Elsevier*, 23(3), 197-208. doi:10.1016/S0956-053X(02)00160-5
- Sanders, R., & Snowdon, R. (1993). Polystyrene as an Ultra-Lightweight Engineered Fill. *Proceedings of the conference Engineered Fill's 93*. Newcastle upon Tyne Thomas Telford,Londra.
- Shariatmadari, N., Norouzi, M., Javadi, A. S., & Alizadeh, M. (2020). Geotechnical Behaviour of the Carbonate Sand-Granulated Tire Mixture. *Indian Journal of Geo Marine Sciences*, 149-155.
- Specifications for Highway Subgrade. (2004). *China Ministry of Communication, JTG D30-2004*. Beijing.

- Stark, T. D., Bartlett, S. F., & Arellano, D. (2012). *Expanded Polystyrene (EPS) Geofom Applications & Technical Data*. EPS Industry Alliance.
- Stark, T., Arellano, D., Horvath, J., & Leshchinsky, D. (2004). Geofom Applications in the Design and Construction of Highway Embankments. *NCHRP Web Document 65 (Project 24-11)*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Syahril, Somantri, A. K., & Febriansya, A. (2018). The Effect of EPS Addition to Soil Stabilized with Fly Ash as Lightweight Fill Materials for Embankment Construction. *Journal of Physics: Conference Series 1364*, 1-9. doi:10.1088/1742-6596/1364/1/012077
- Taguchi, G. (1978). Off-Line and On-Line Quality Control Systems, Proceedings of the International Conference on Quality Control. Tokyo, Japan.
- Taguchi, G. (1987). *System of Experimental Design*. Unipub/Kraus, International Publications.
- Taguchi, G., Elsayed, A. E., & Hsiang, T. C. (1989). *Quality Engineering in Production Systems*. New York: McGraw-Hill College.
- Topçu, İ. B., Karakurt, C., & Işıkdağ, B. (2014). Atık Lastik Agregalı Harçların Mekanik ve Fiziksel. *Politeknik Dergisi*, 17(1), 3-7. doi:10.2339/2014.17 Sayı 1 :1, 3-7
- TS 1500. (2000). Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması. Ankara.
- TS 1900-1. (2006). *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri – Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini*. TSE, Ankara.
- TS 1900-2. (2006). *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini*. Ankara.
- TS EN 14933. (2008). *İnşaat Mühendisliği uygulamaları için ısı yalıtım ve hafif ağırlıklı dolgu mamülleri – fabrikasyonla imal edilmiş genleştirilmiş polistiren (eps) – Özellikler*.
- Tuncel, E. Y. (2012). Cam Köpüğü-Çimento-Kum Karışımının Hafif Dolgu Malzemesi Olarak Geoteknik Özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- URL-1. (tarih yok). <https://www.austrotherm.com.tr/bilgi-servisi/haberler/eps-blok-ile-koeprue-ve-menfez-dolgusu-norvec> adresinden alındı

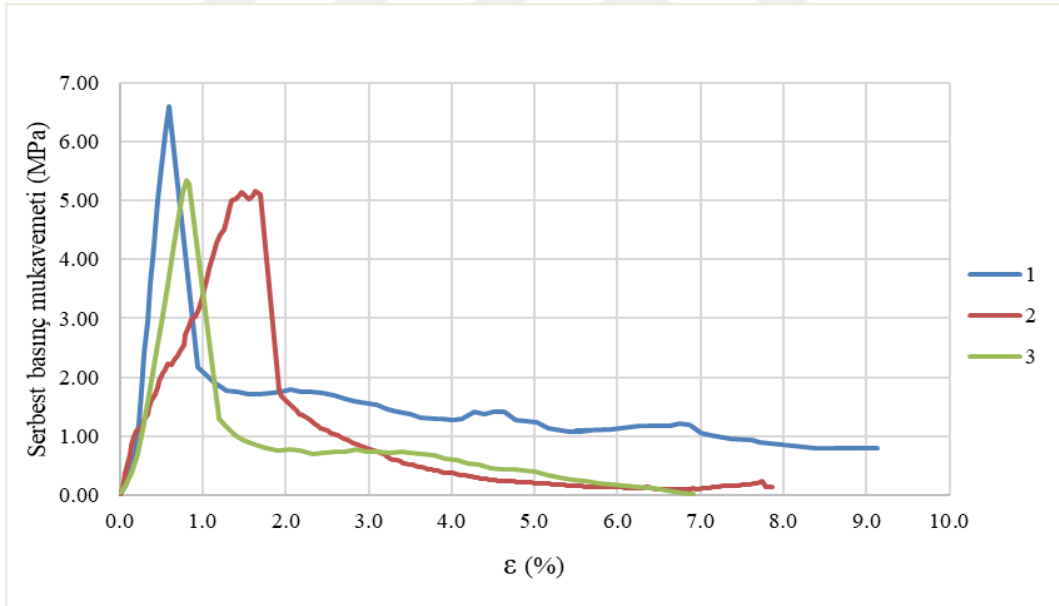
- URL-2. (tarih yok). <https://www.muhendisbeyinler.net/taguchi-metodu-nedir/> adresinden alındı
- Wang, F., & Miao, L. (2009). A proposed lightweight fill for embankments using cement-treated Yangzi River sand and expanded polystyrene (EPS) beads. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68, 517-524. doi:DOI 10.1007/s10064-009-0228-8
- Yang, S. (1999). Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications. *Retrospective Theses and Dissertations, Iowa State University*. Ames.
- Yarbaşı, N. (2015). Atık Lastik Parçaları ile Güçlendirilmiş Killi Zeminlerin Donma Çözülme Davranışı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(6), 559-562. doi:10.5505/pajes.2015.04875
- Yeğınobalı, A., & Ertün, T. (2011). *Çimentoda Standartlar ve Mineral Katkılar* (5 b.). Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.
- Yıldırım, E. (tarih yok). BETONARME KONSOL İSTİNAT DUVARLARI ile GEOGRİD DONATILI İSTİNAT DUVARLARININ TEKNİK ve EKONOMİK YÖNDEN ARAŞTIRILMASI.
- Zou, Y. (2001). Behaviour of the Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam on Soft Soil. *Doctor Thesis, Universty of Western Sdney*. Nepean.

## EKLER

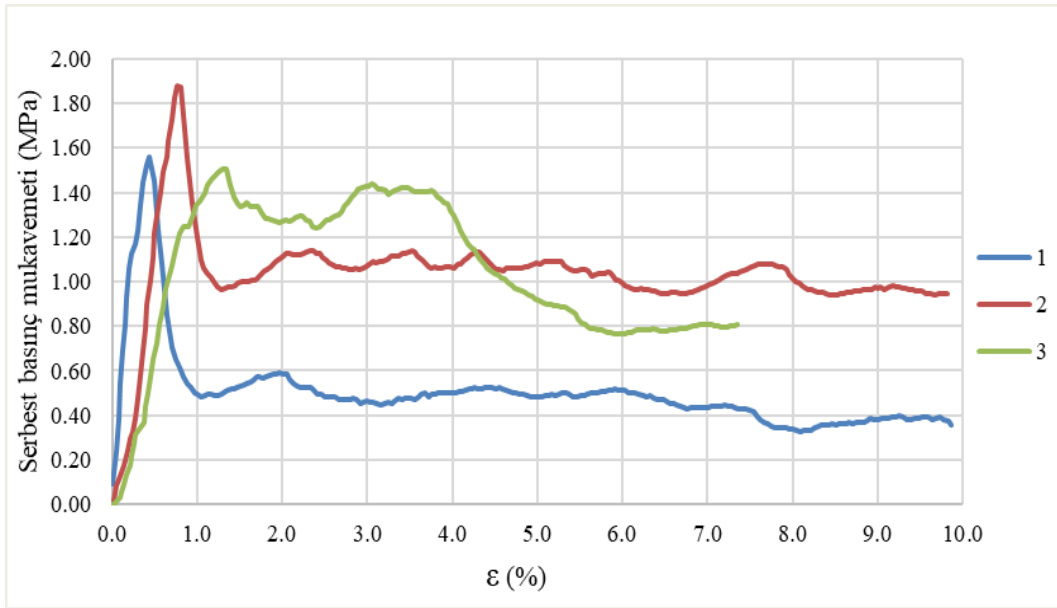
### EK-1 Serbest Basınç Deneyi Normal Gerilme- Aksel Birim Deformasyon Grafikleri



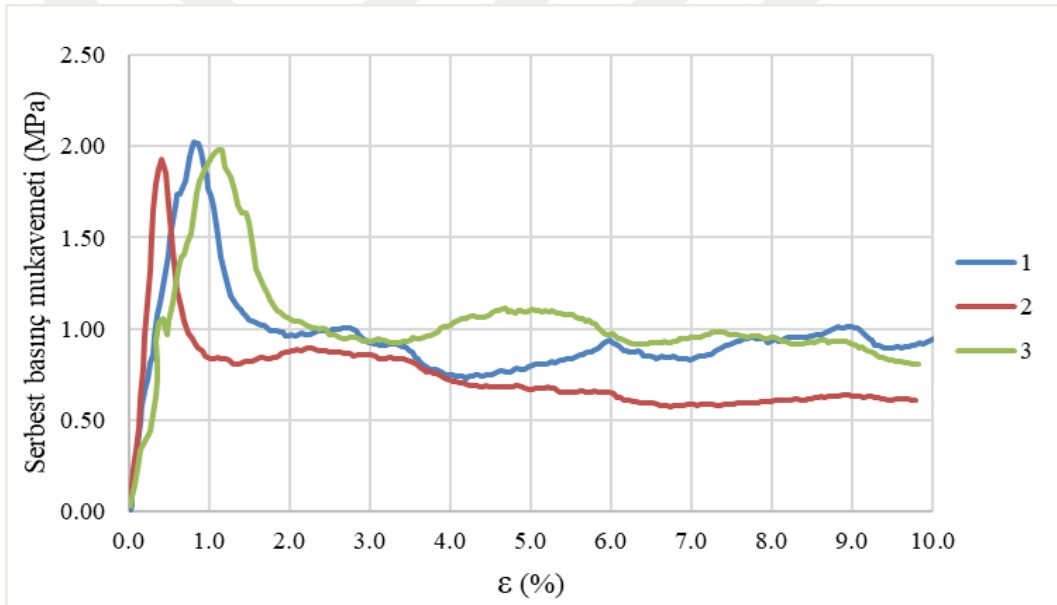
Şekil Ek 1 1. 1 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



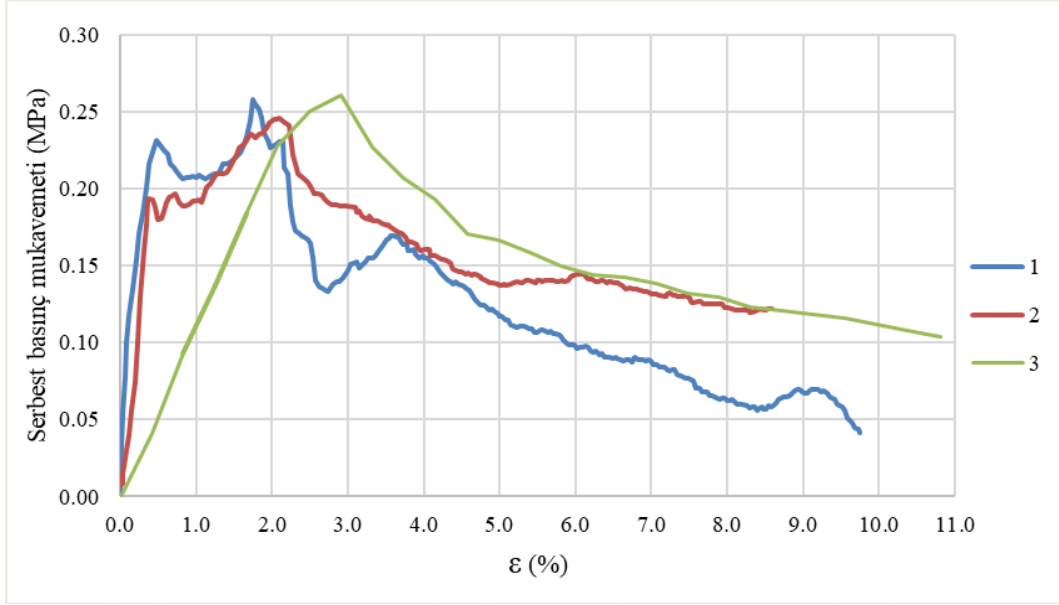
Şekil Ek 1 2. 1 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



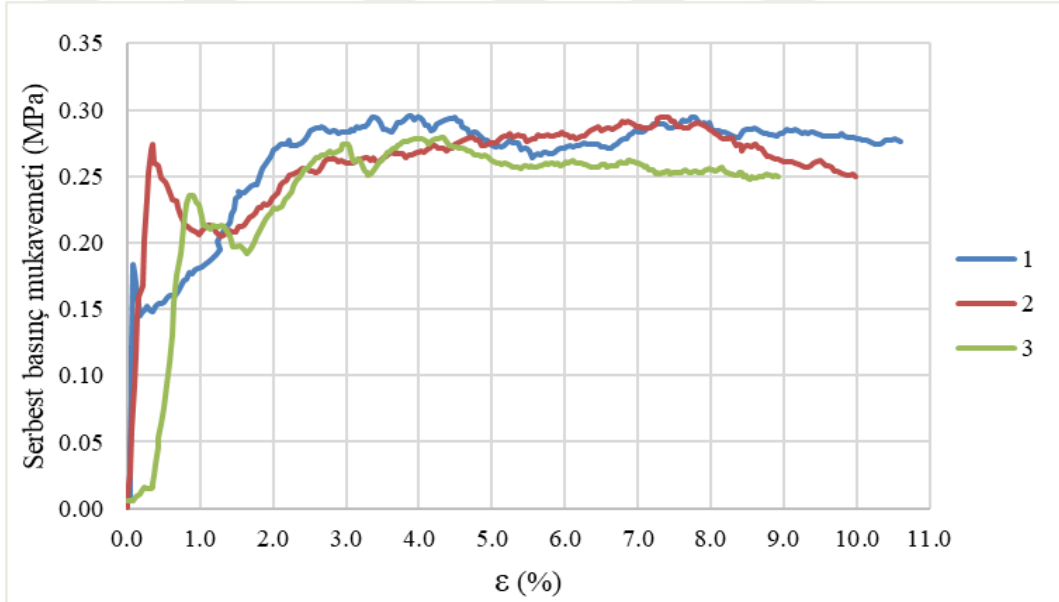
Şekil Ek 1 3. 2 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği



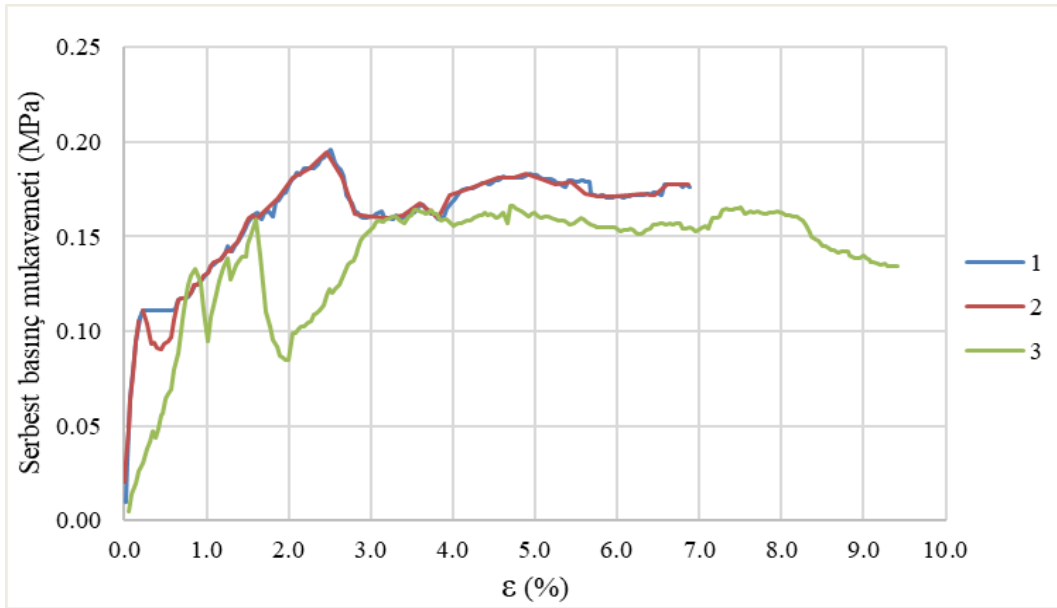
Şekil Ek 1 4. 2 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği



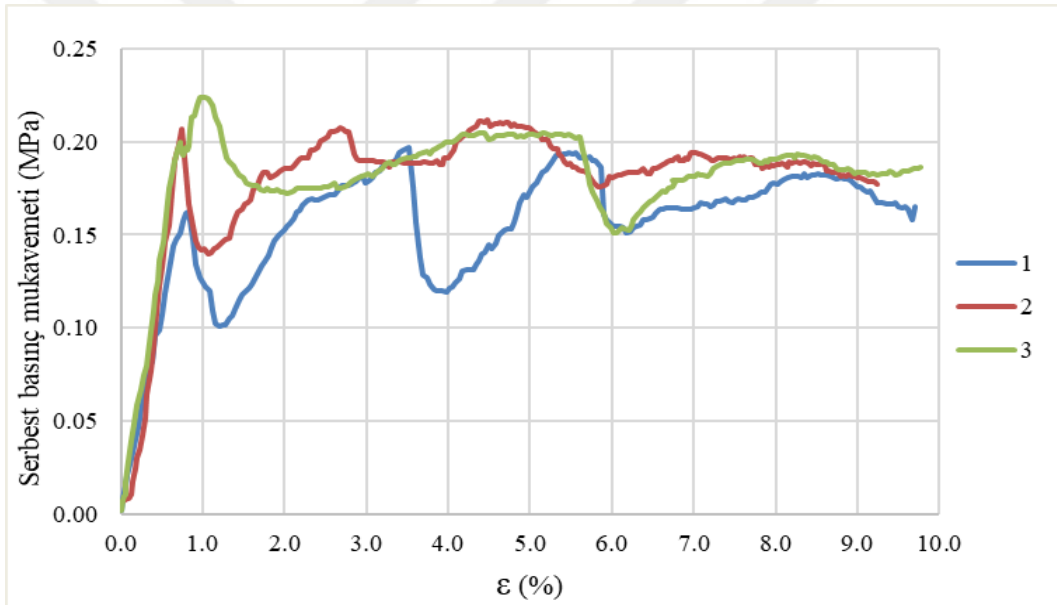
Şekil Ek 1 5. 4 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



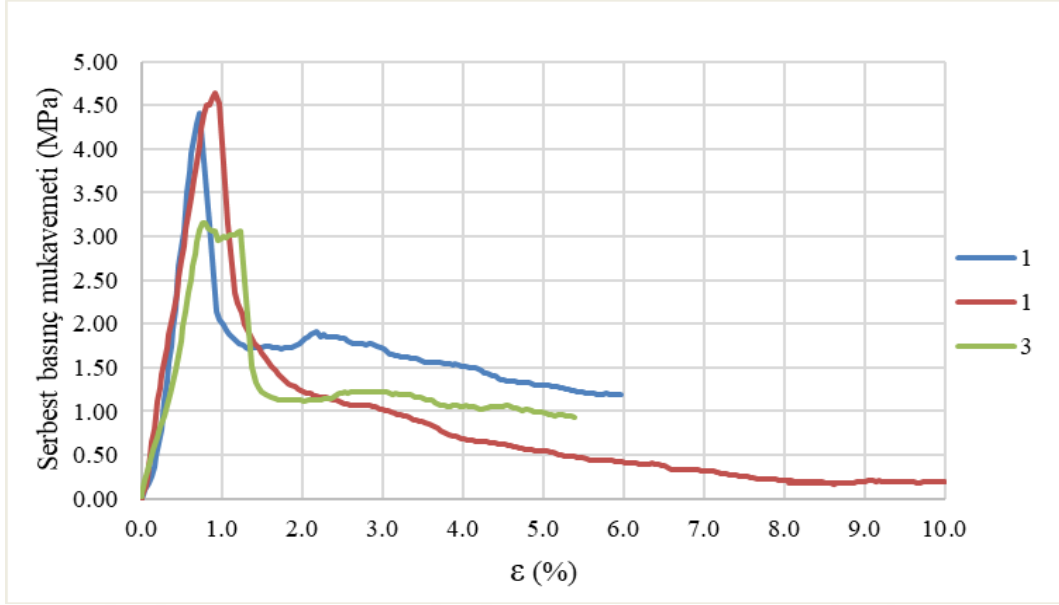
Şekil Ek 1 6. 4 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



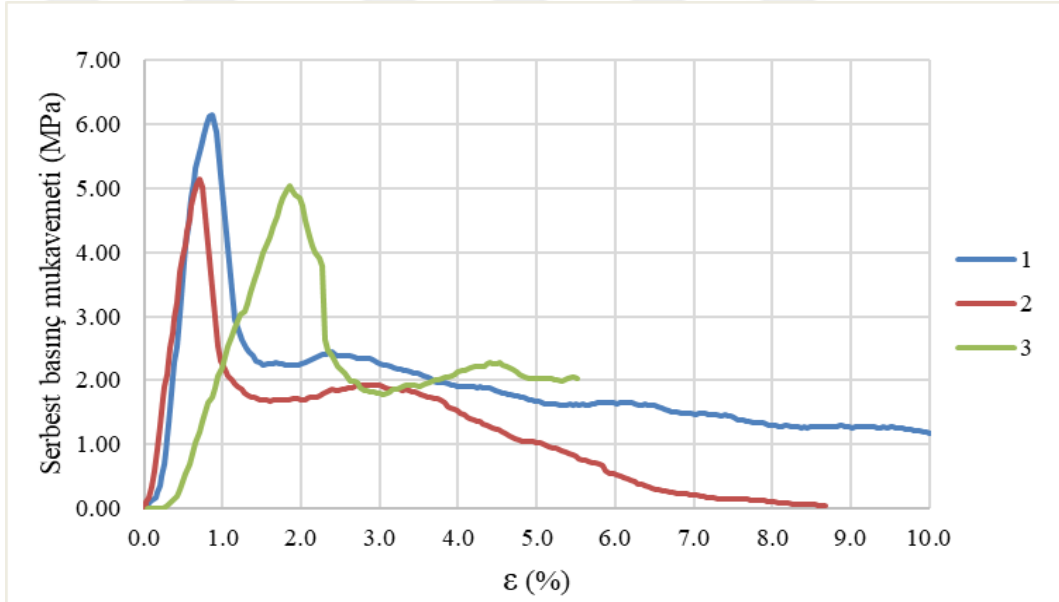
Şekil Ek 1 7. 5 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği



Şekil Ek 1 8. 5 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği

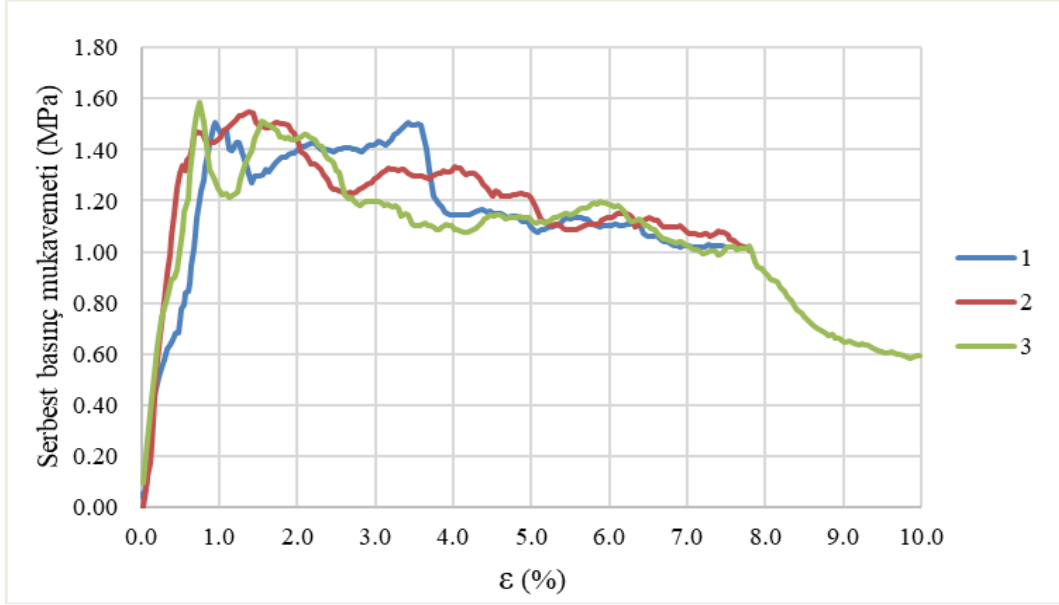


Şekil Ek 1 9. 6 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği

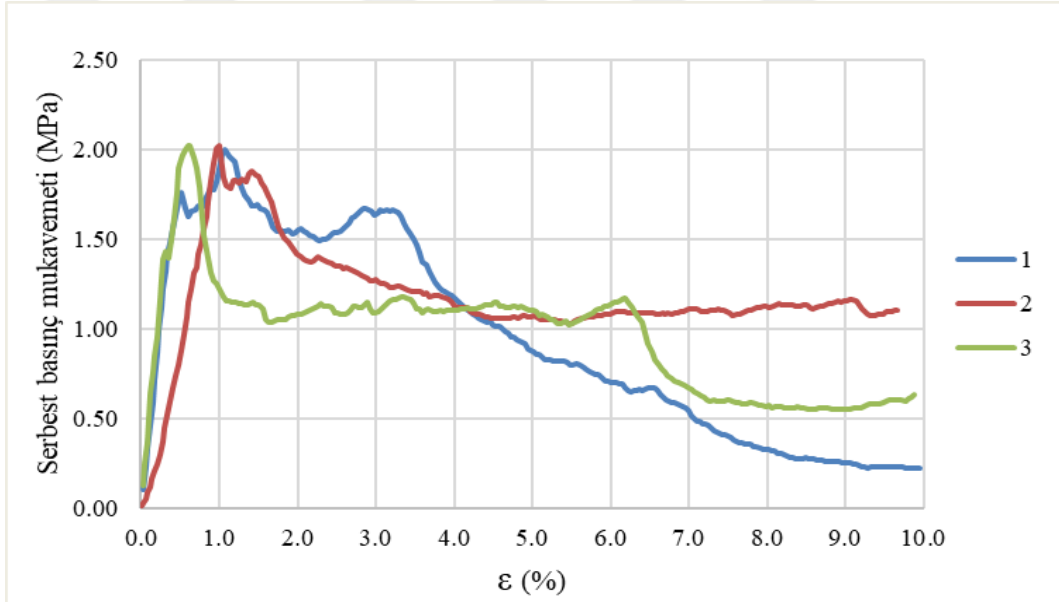


Şekil Ek 1 10. 6 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği

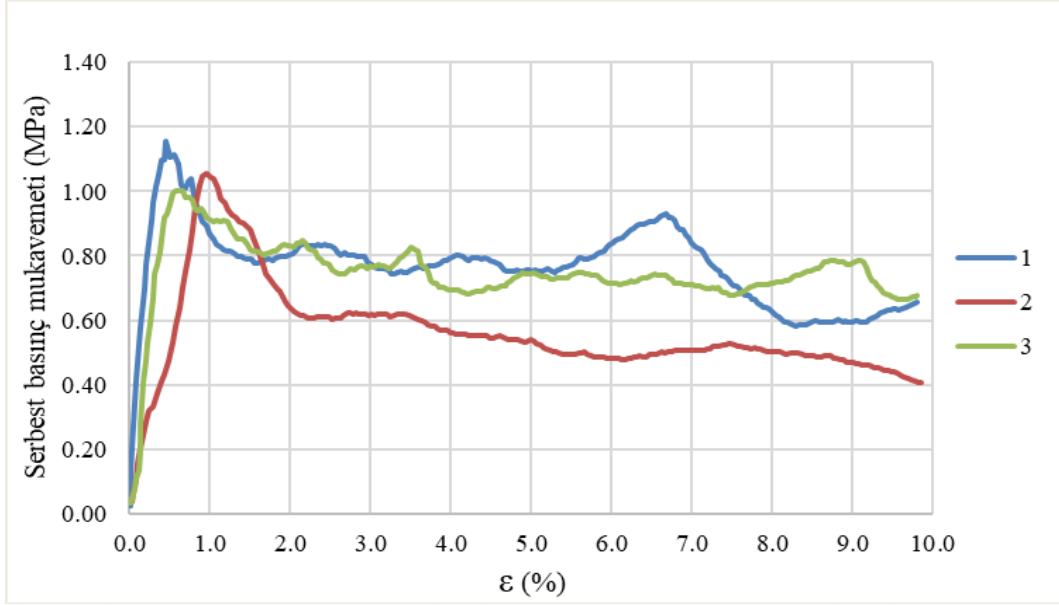




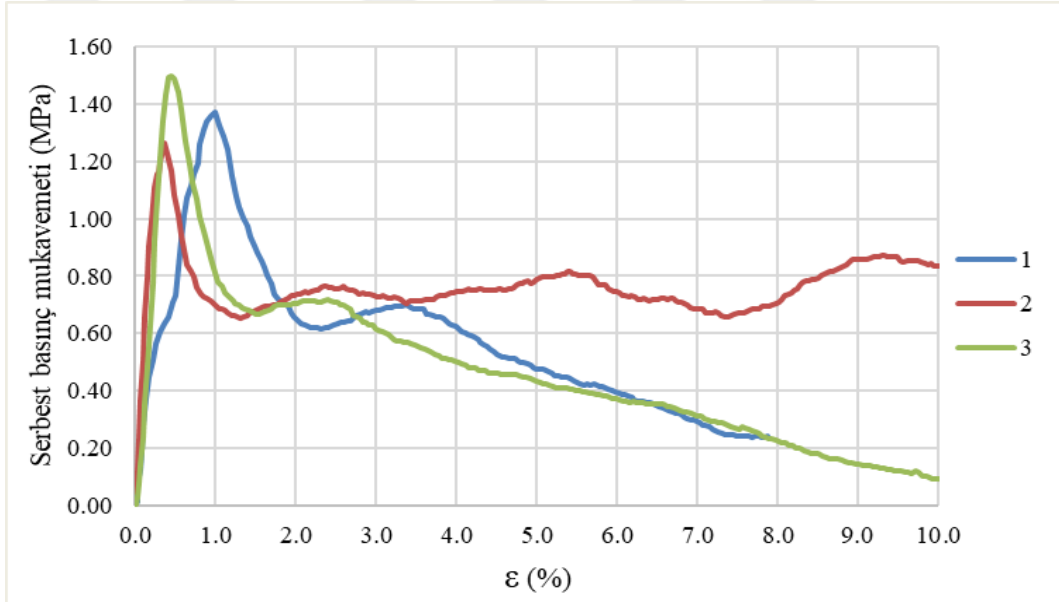
Şekil Ek 1 11. 7 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği



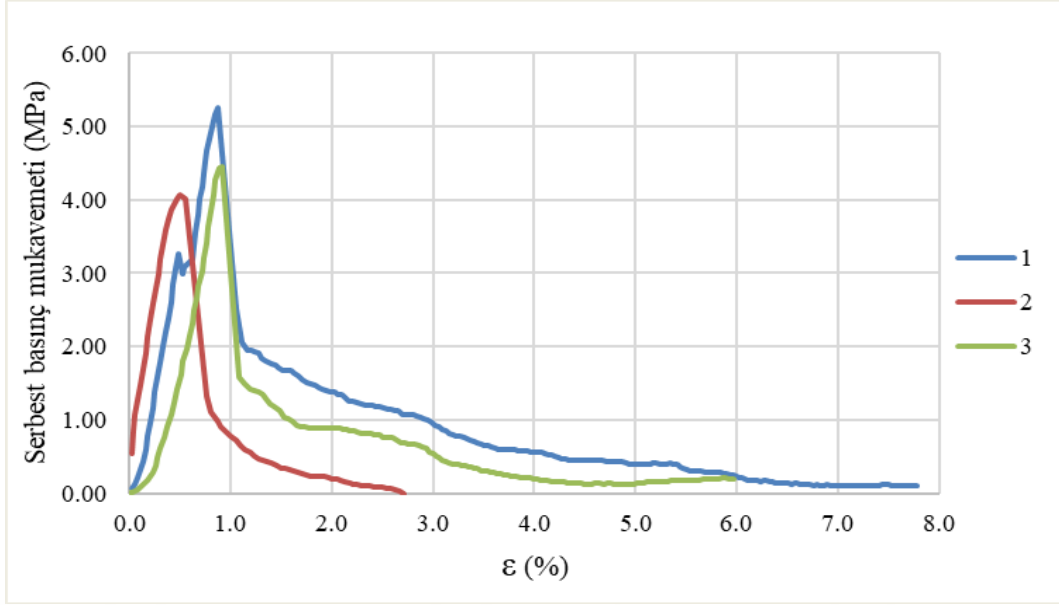
Şekil Ek 1 12. 7 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği



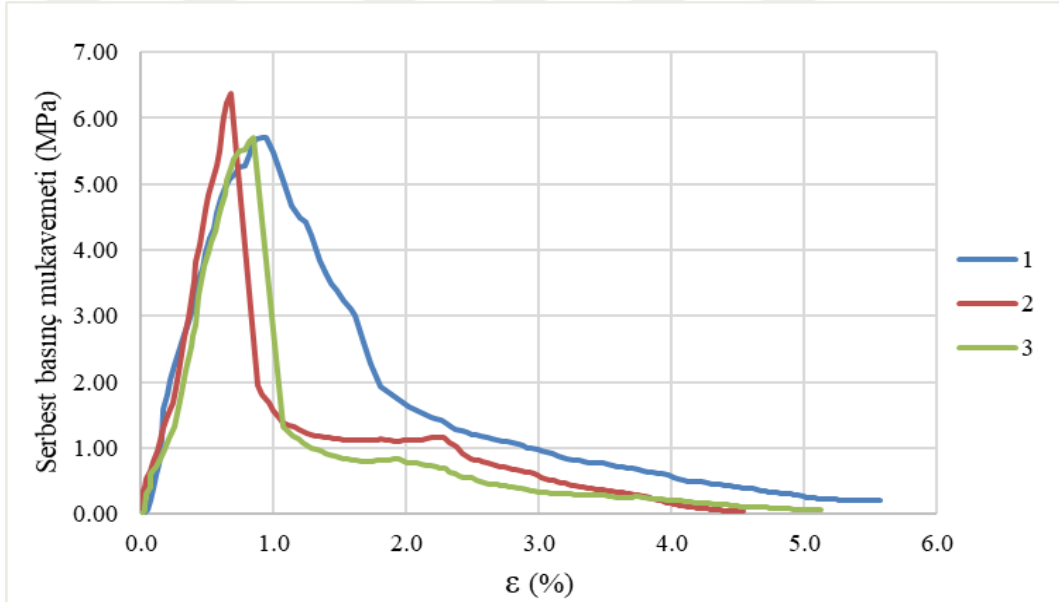
Şekil Ek 1 13. 8 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği



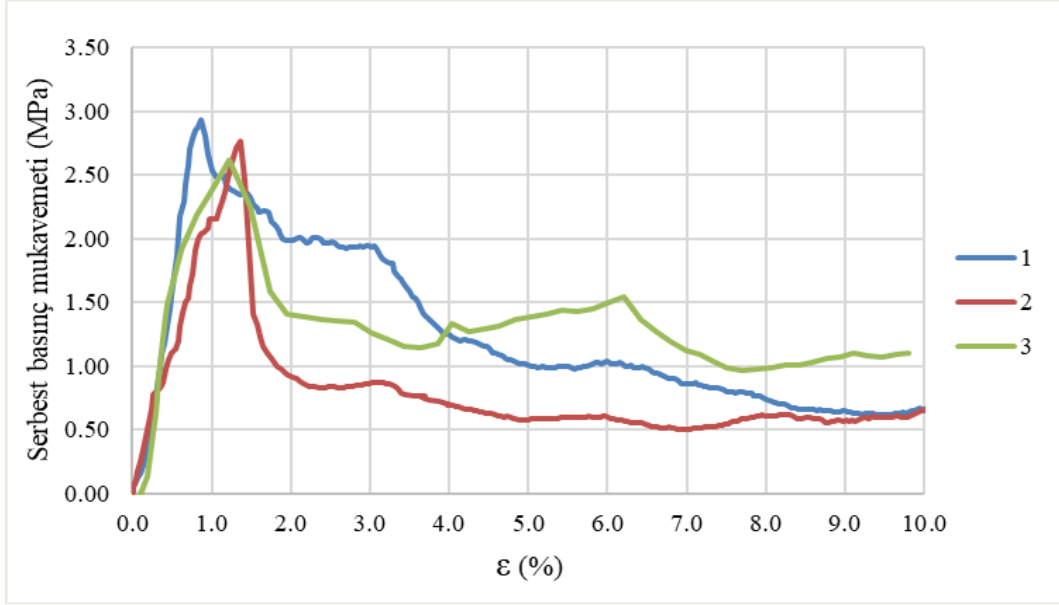
Şekil Ek 1 14. 8 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği



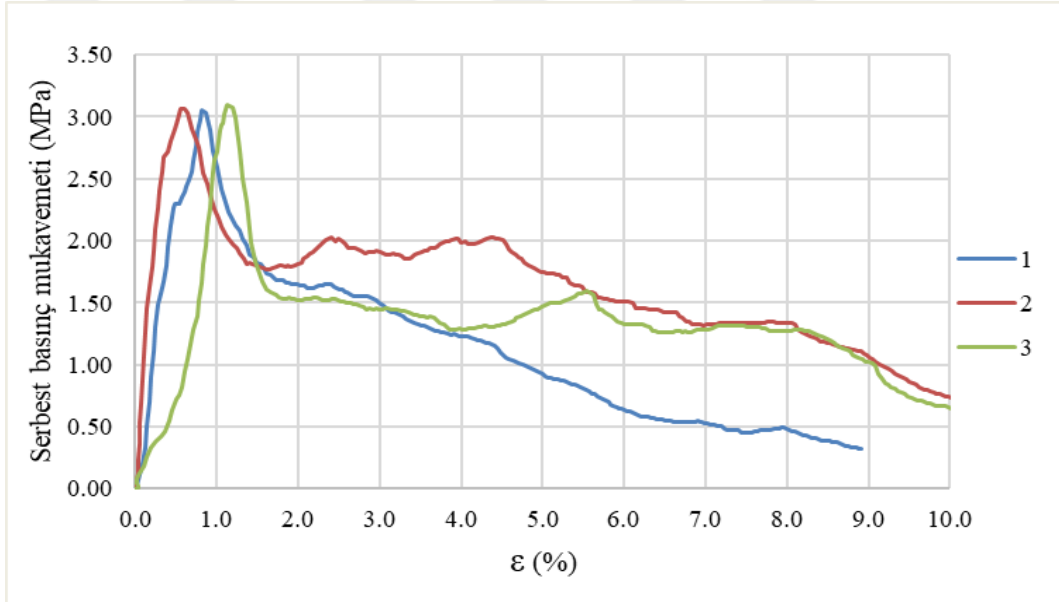
Şekil Ek 1 15. 11 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



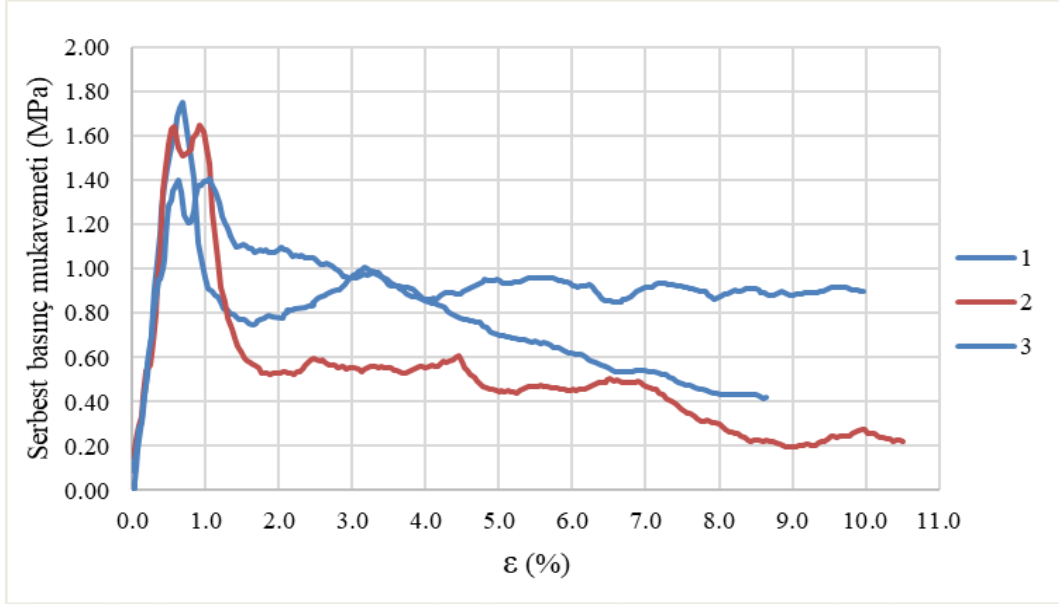
Şekil Ek 1 16. 11 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



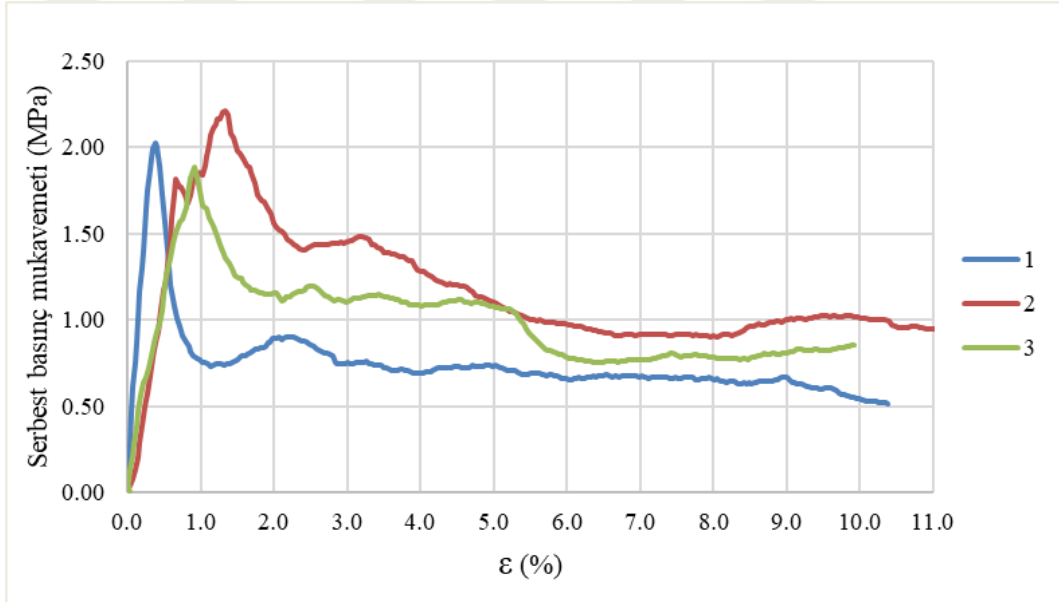
Şekil Ek 1 17. 12 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



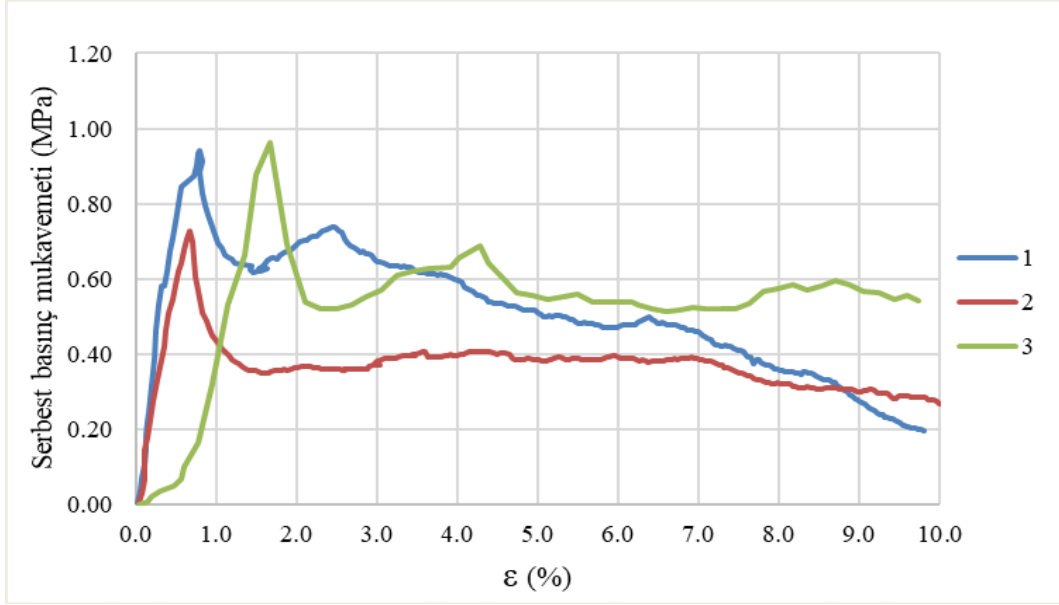
Şekil Ek 1 18. 12 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



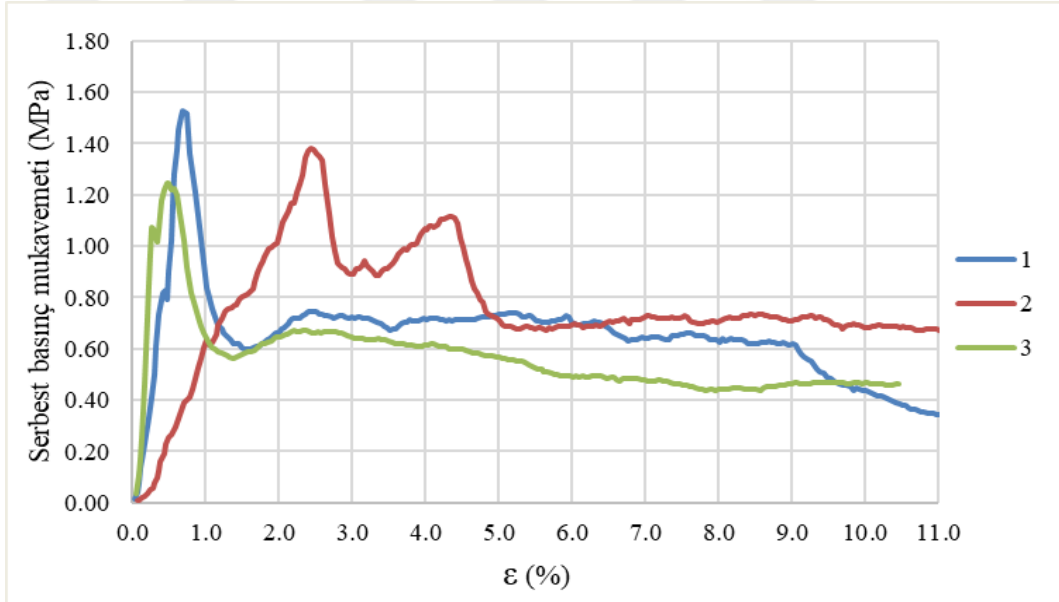
Şekil Ek 1 19. 13 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



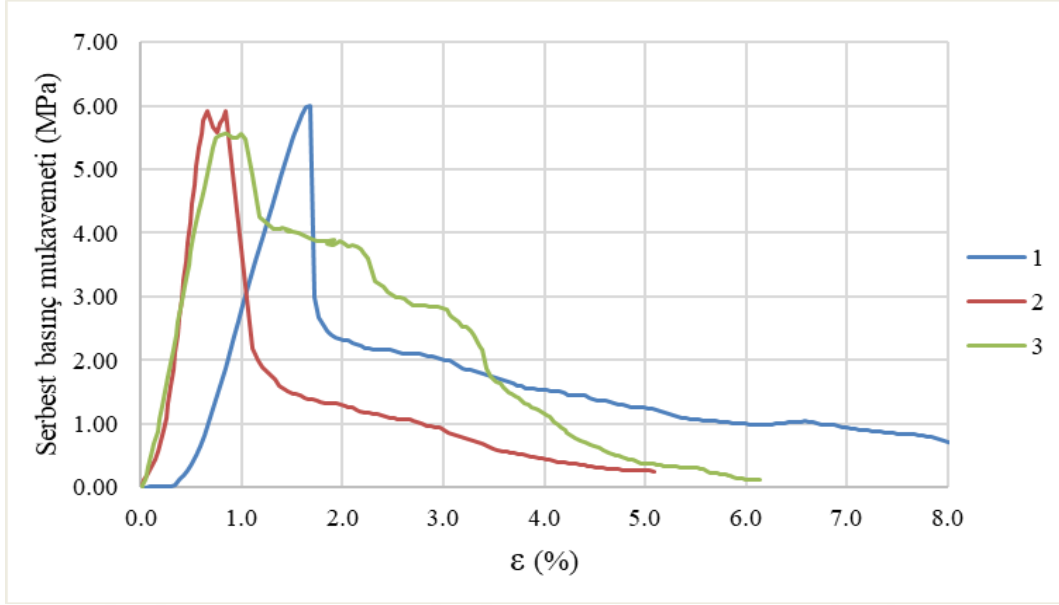
Şekil Ek 1 20. 13 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



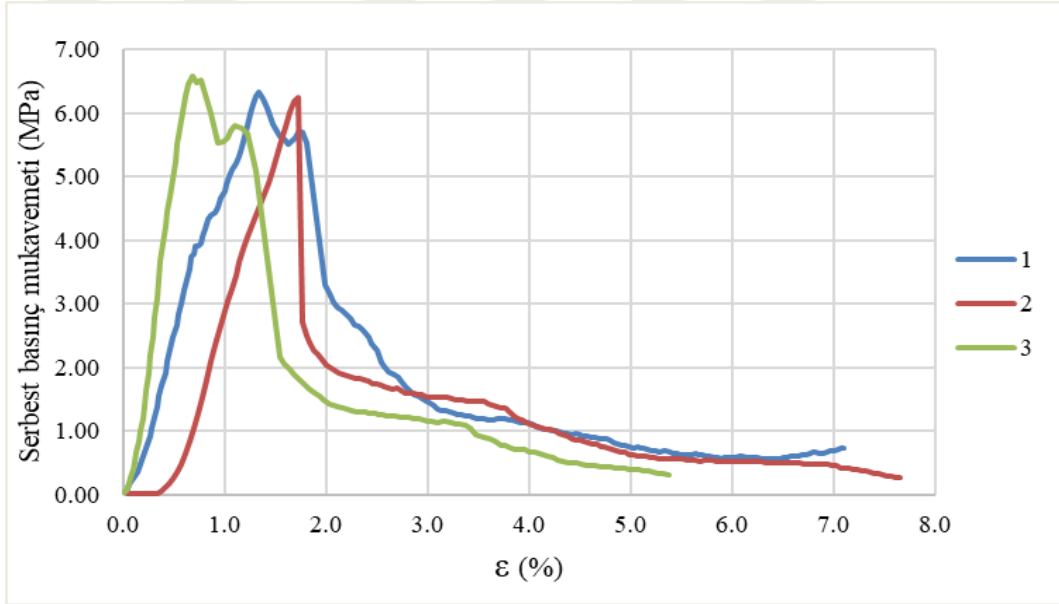
Şekil Ek 1 21. 14 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



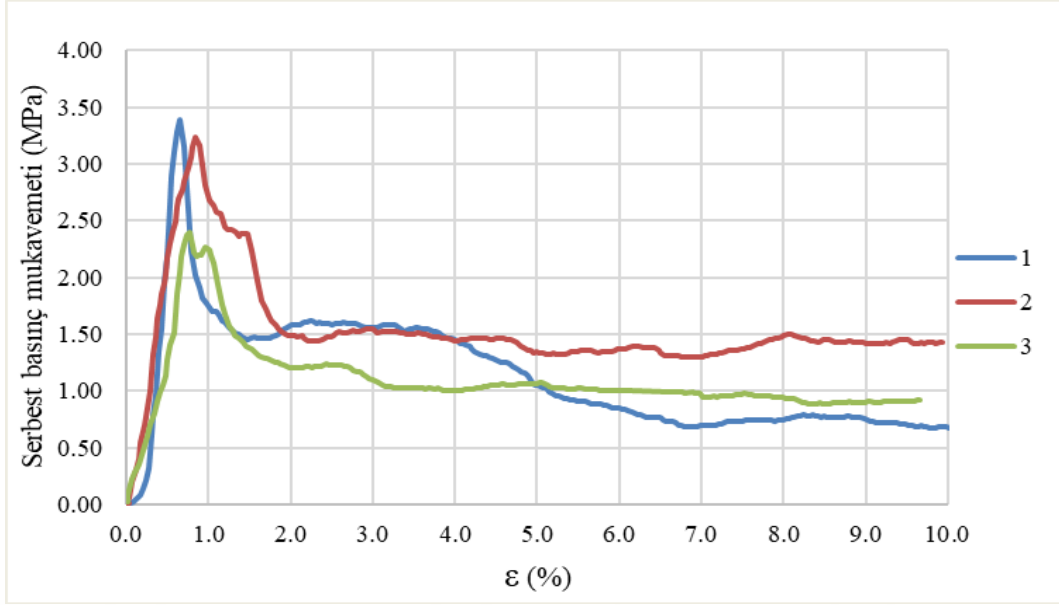
Şekil Ek 1 22. 14 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



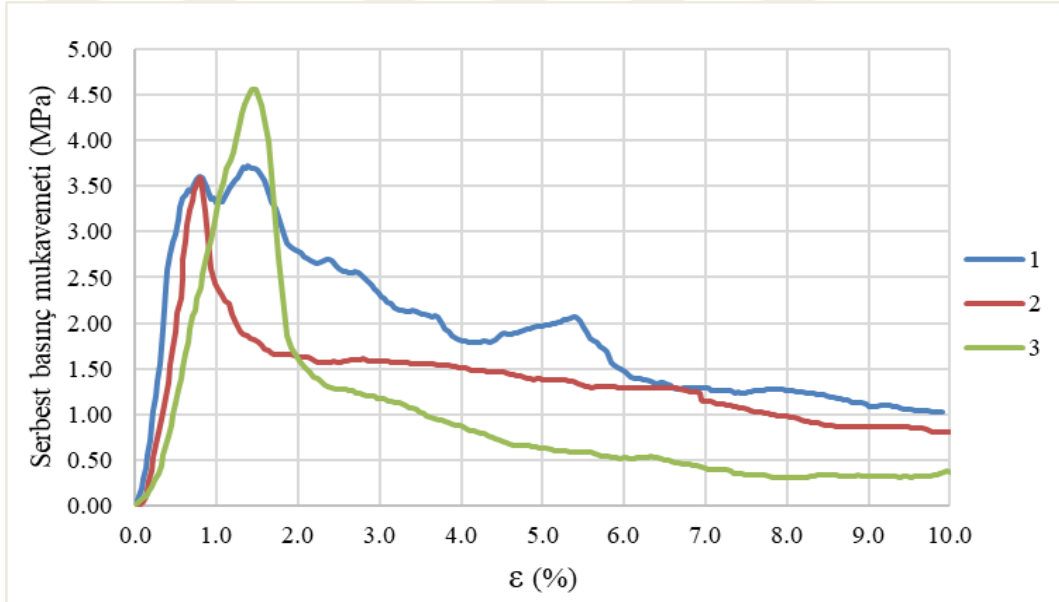
Şekil Ek 1 23. 16 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



Şekil Ek 1 24. 16 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği

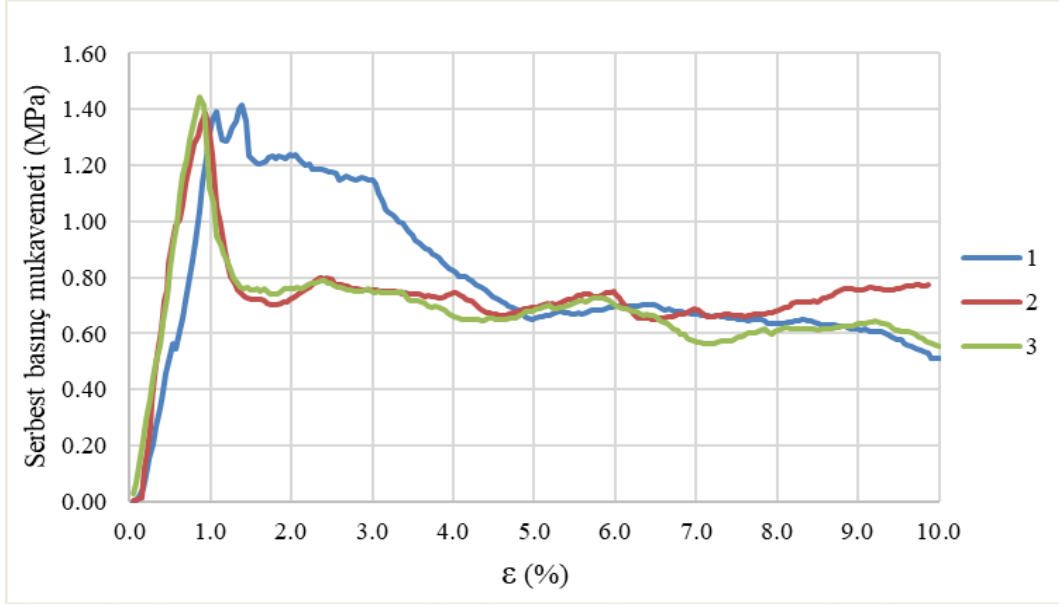


Şekil Ek 1 25. 17 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği

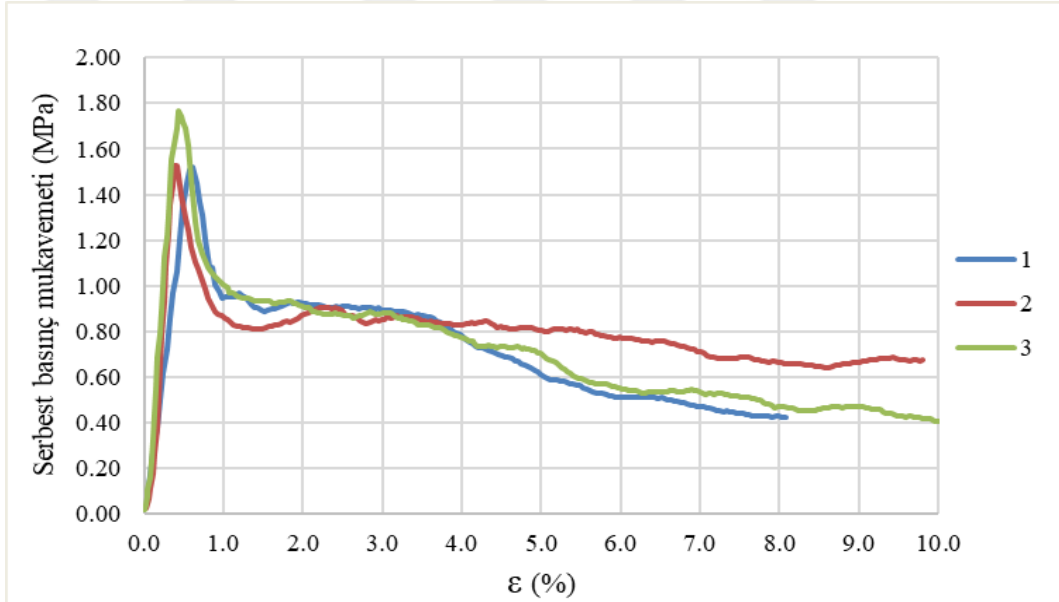


Şekil Ek 1 26. 17 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği

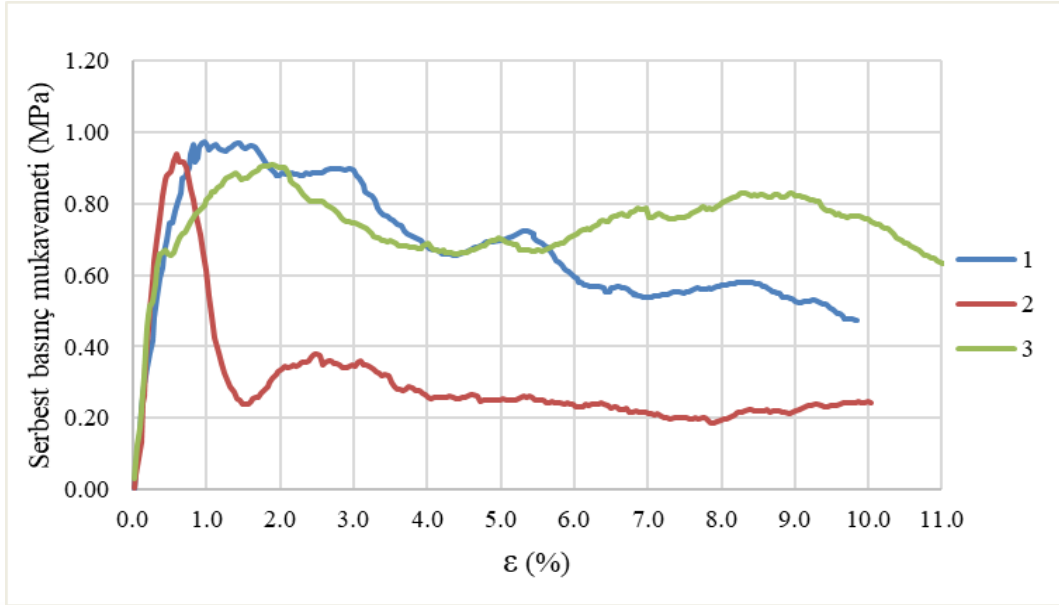




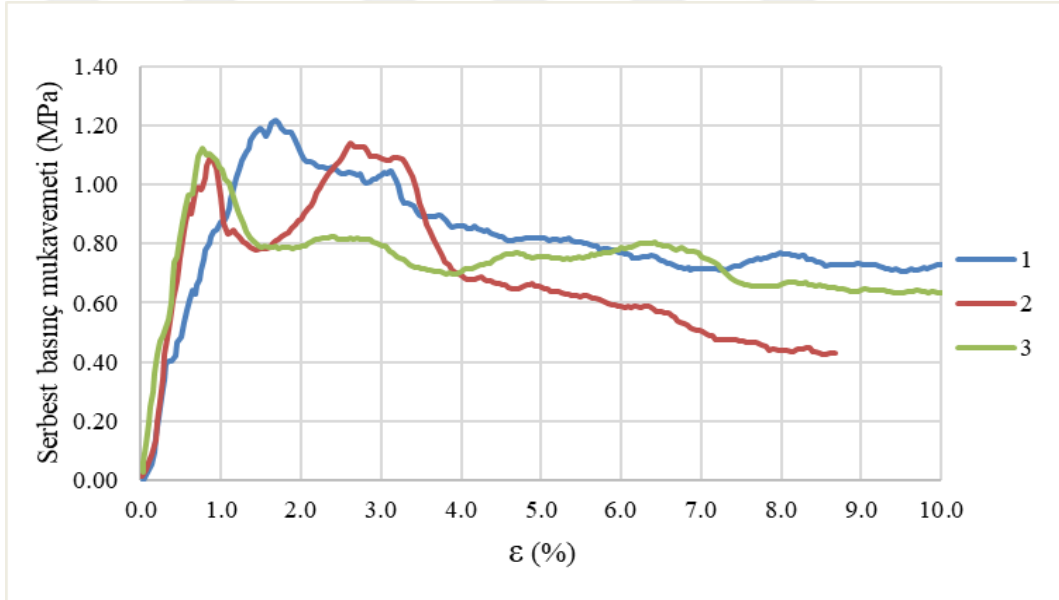
Şekil Ek 1 27. 18 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



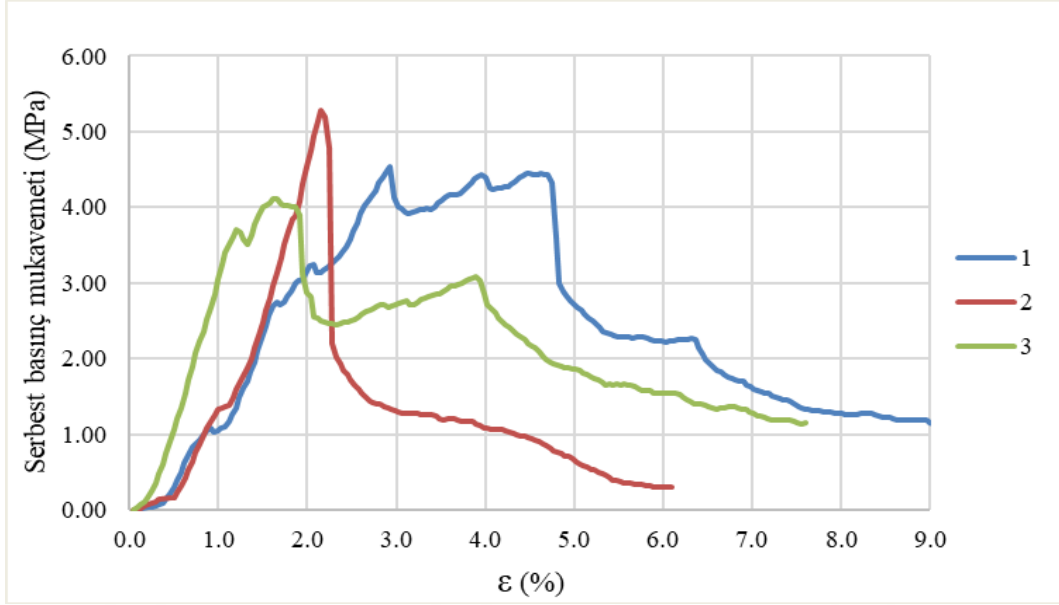
Şekil Ek 1 28. 18 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



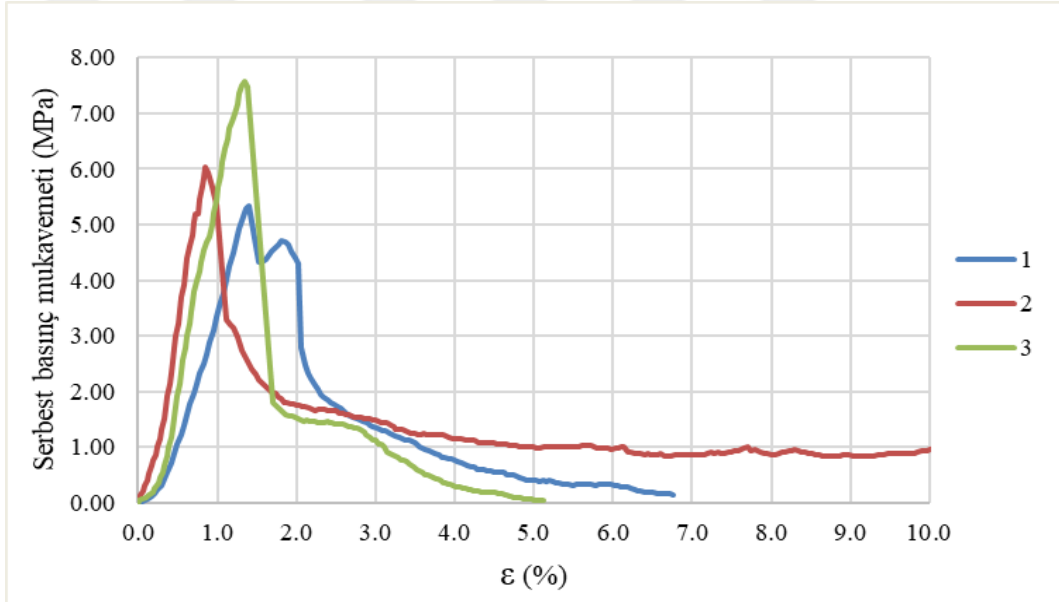
Şekil Ek 1 29. 19 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği



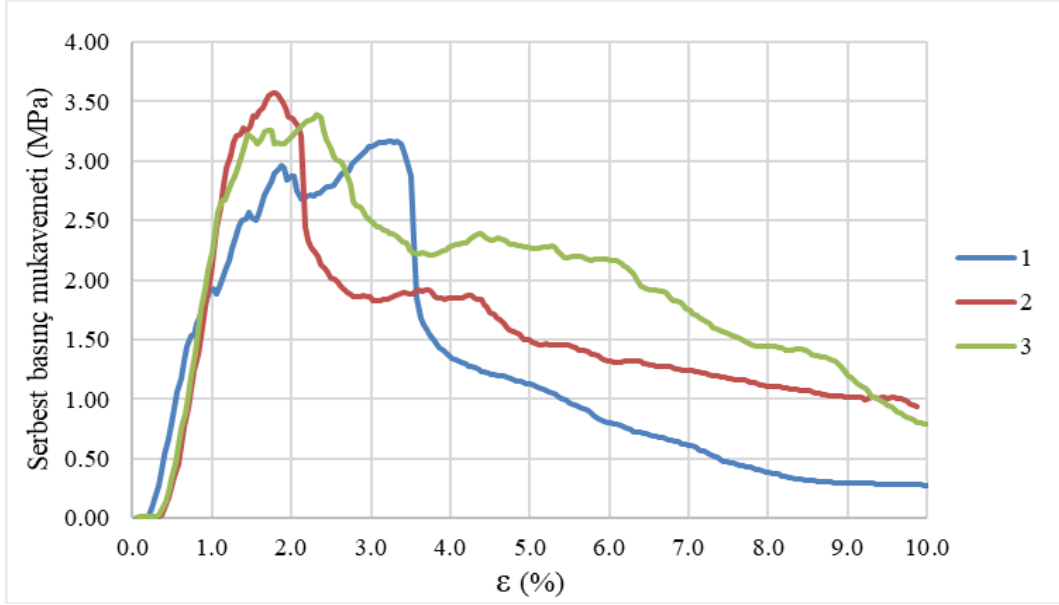
Şekil Ek 1 30. 19 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksenal birim deformasyon grafiği



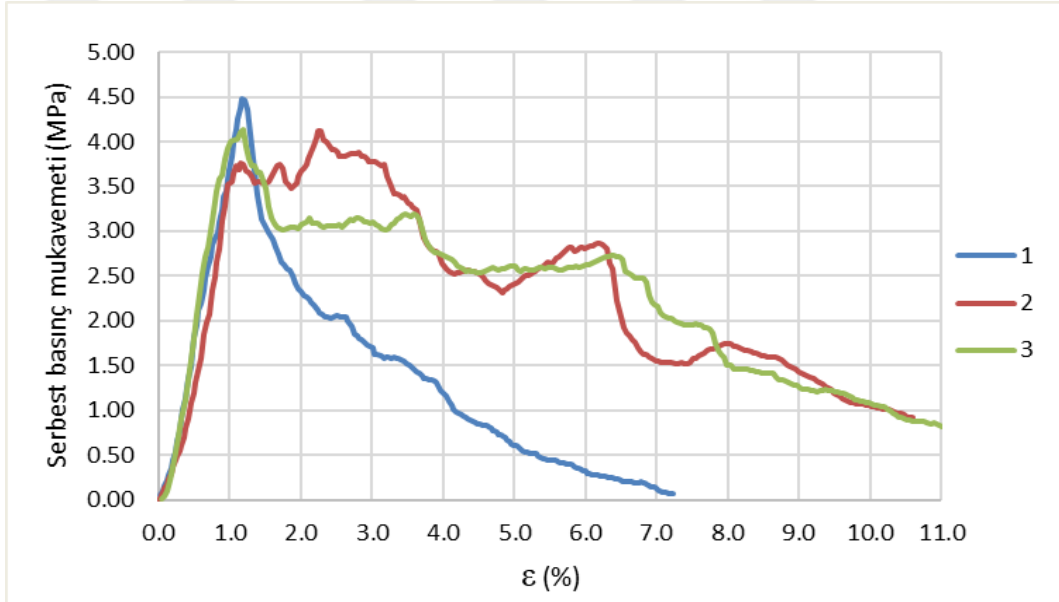
Şekil Ek 1 31. 21 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



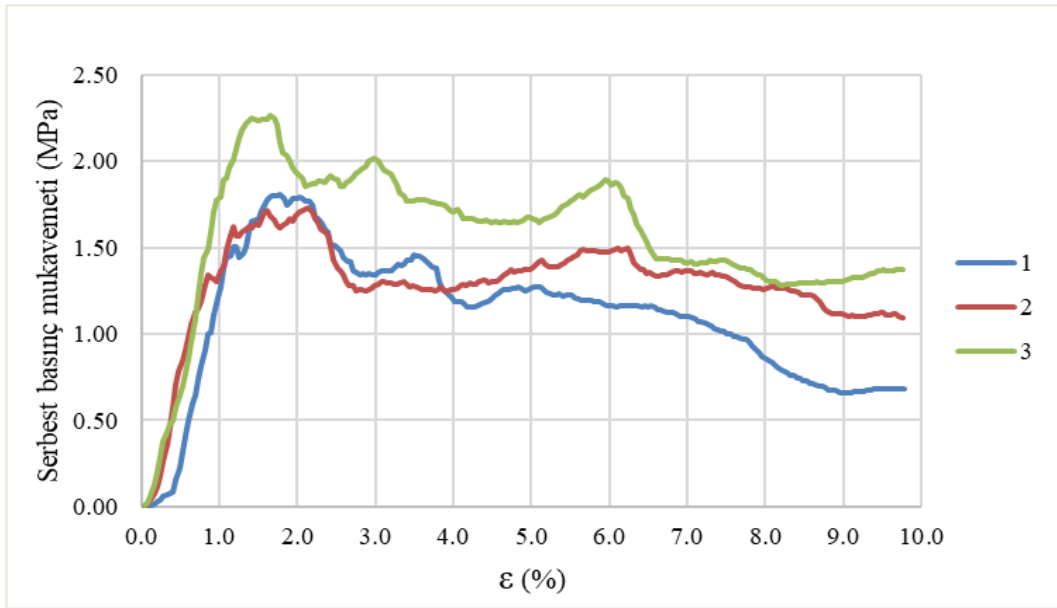
Şekil Ek 1 32. 21 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



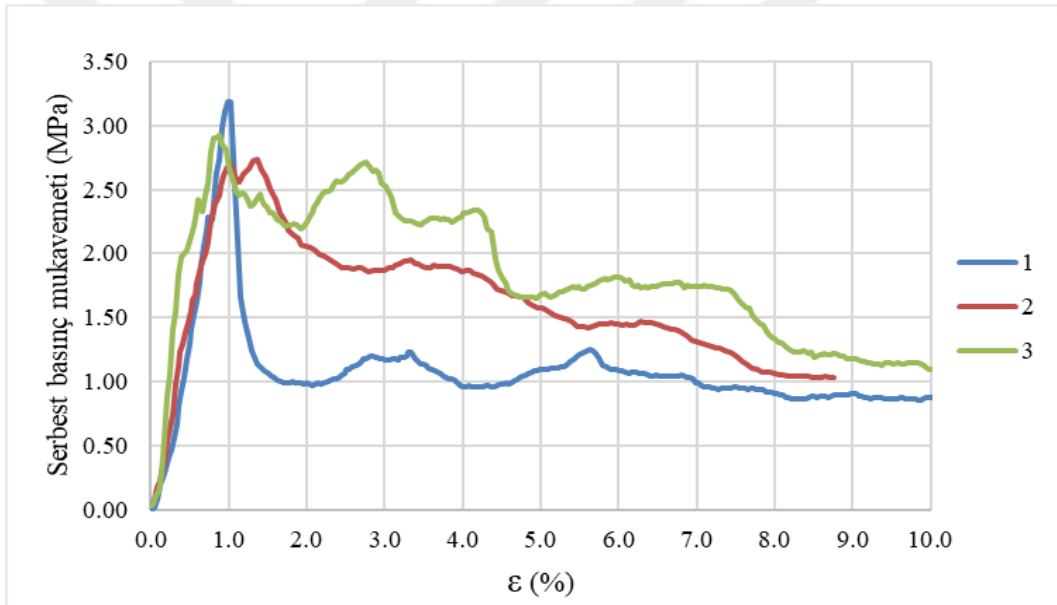
Şekil Ek 1 33. 22 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



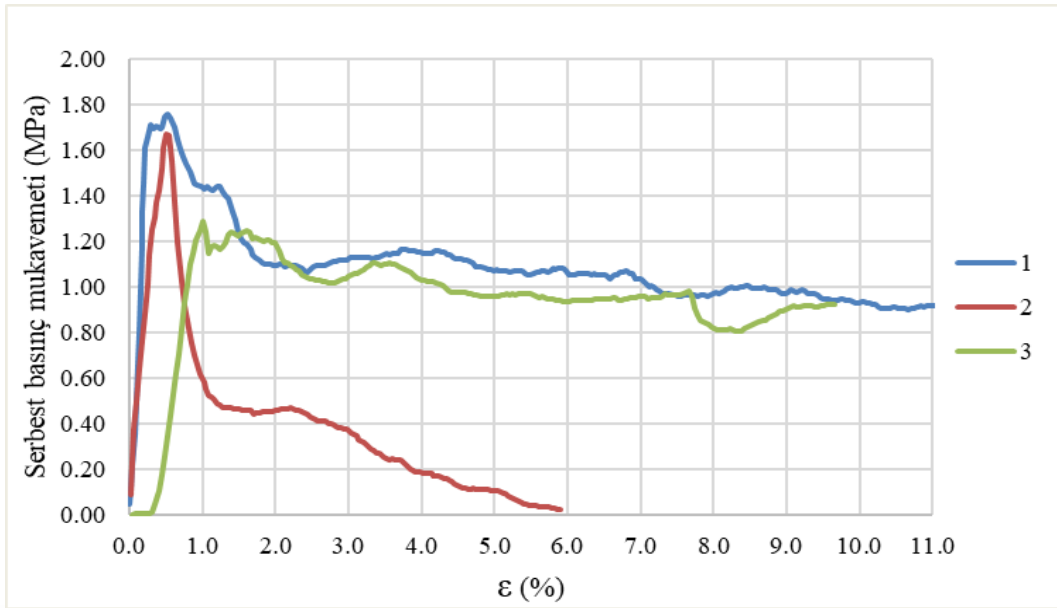
Şekil Ek 1 34. 22 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



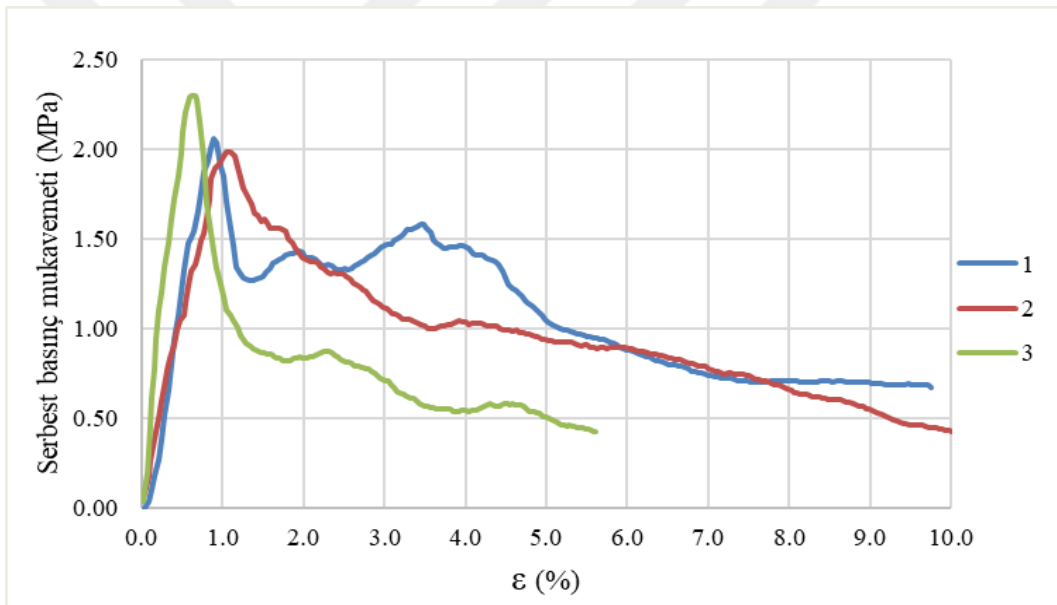
Şekil Ek 1 35. 23 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



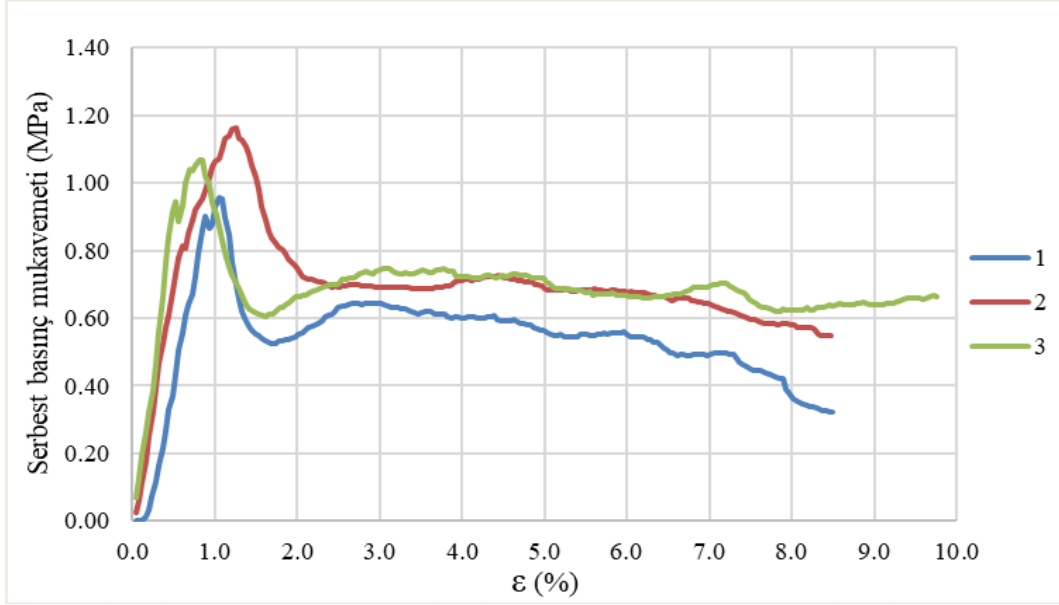
Şekil Ek 1 36. 23 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



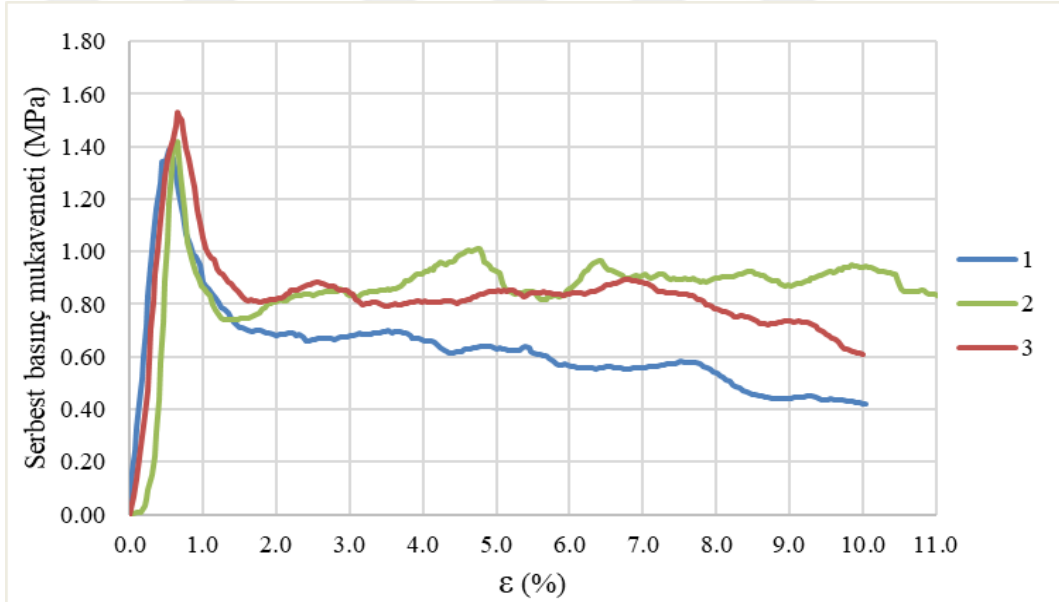
Şekil Ek 1 37. 24 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



Şekil Ek 1 38. 24 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği

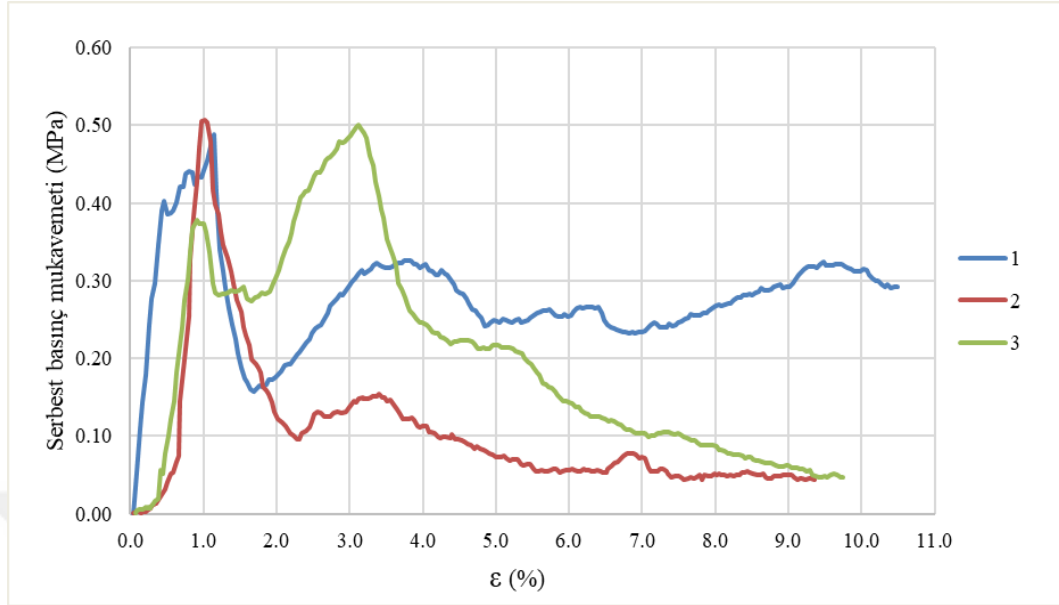


Şekil Ek 1 39. 25 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği

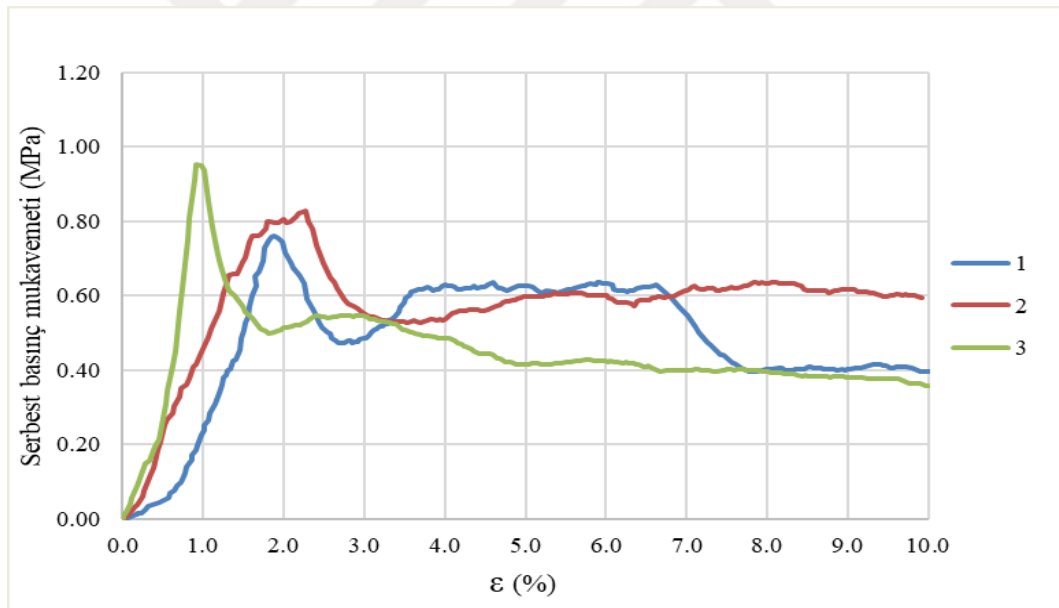


Şekil Ek 1 40. 25 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği

**EK-2 Donma Çözülme Sonucu Serbest Basınç Deneyi Normal Gerilme- Eksenel Birim Deformasyon Grafikleri**

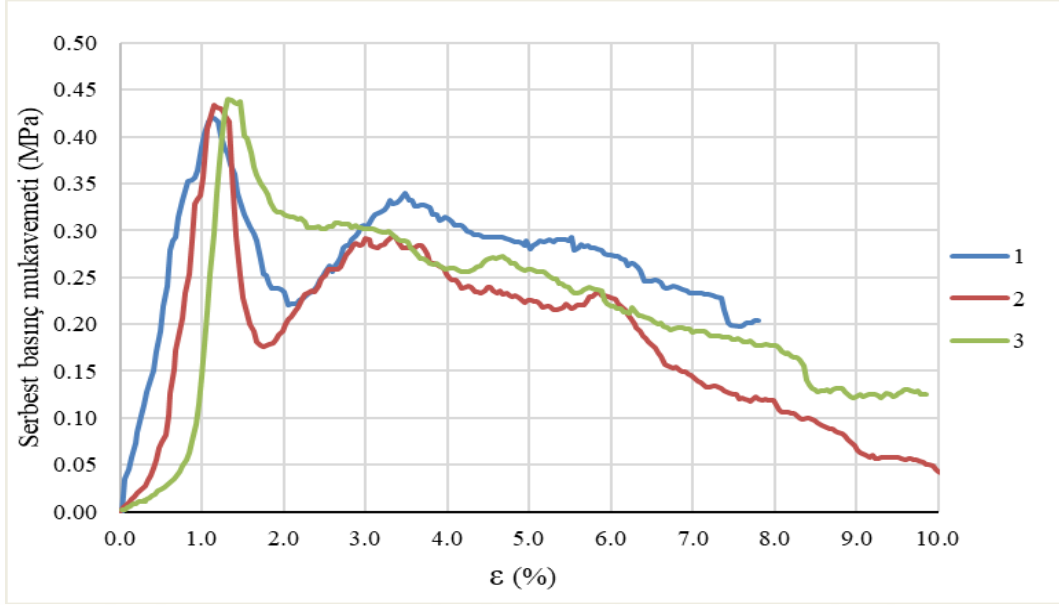


Şekil Ek 2 1. 3 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- eksenel birim deformasyon grafiği

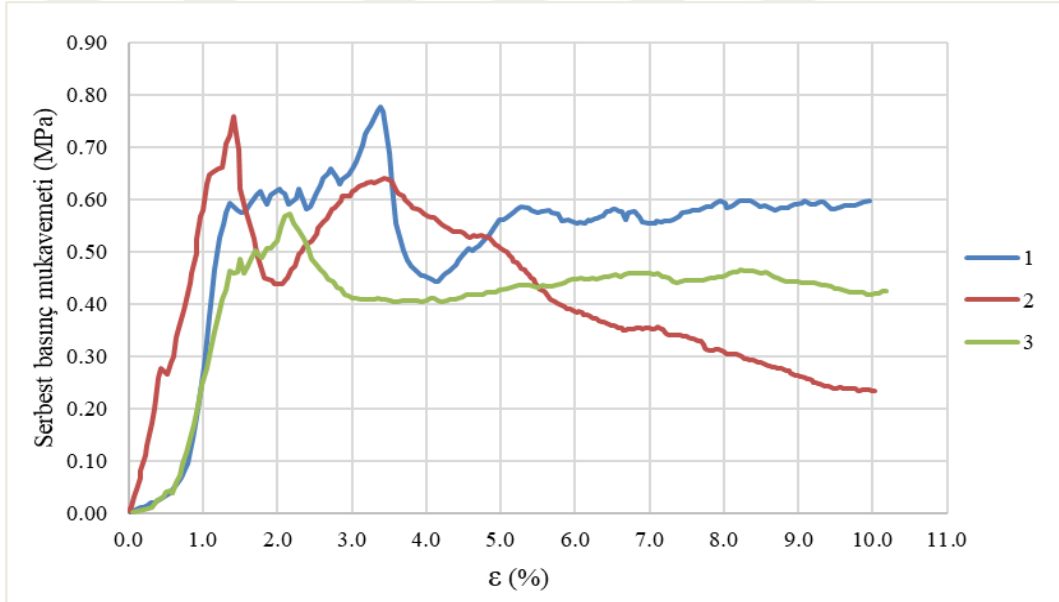


Şekil Ek 2 2. 3 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- eksenel birim deformasyon grafiği

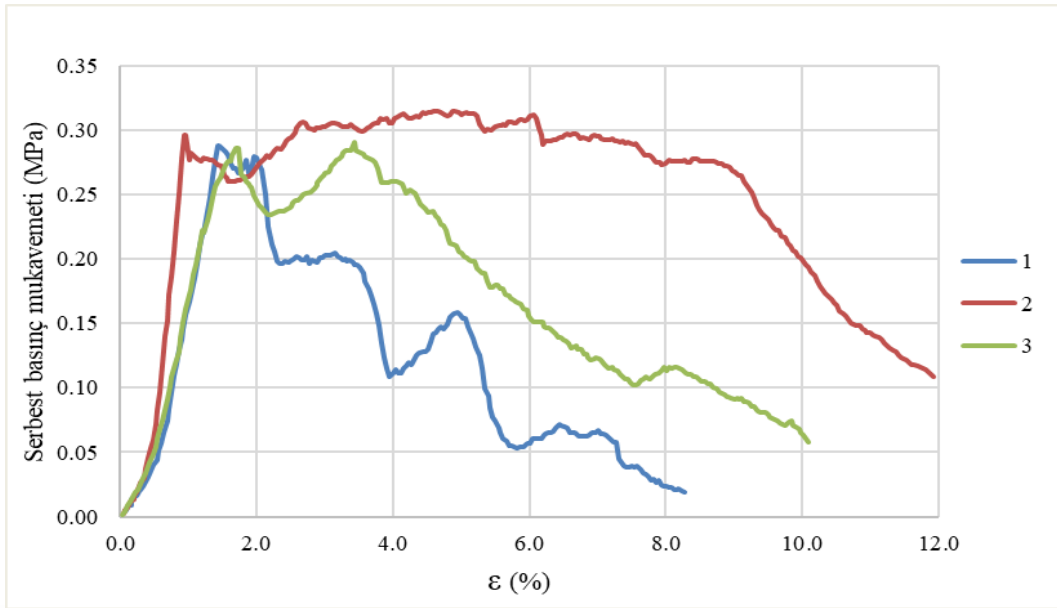




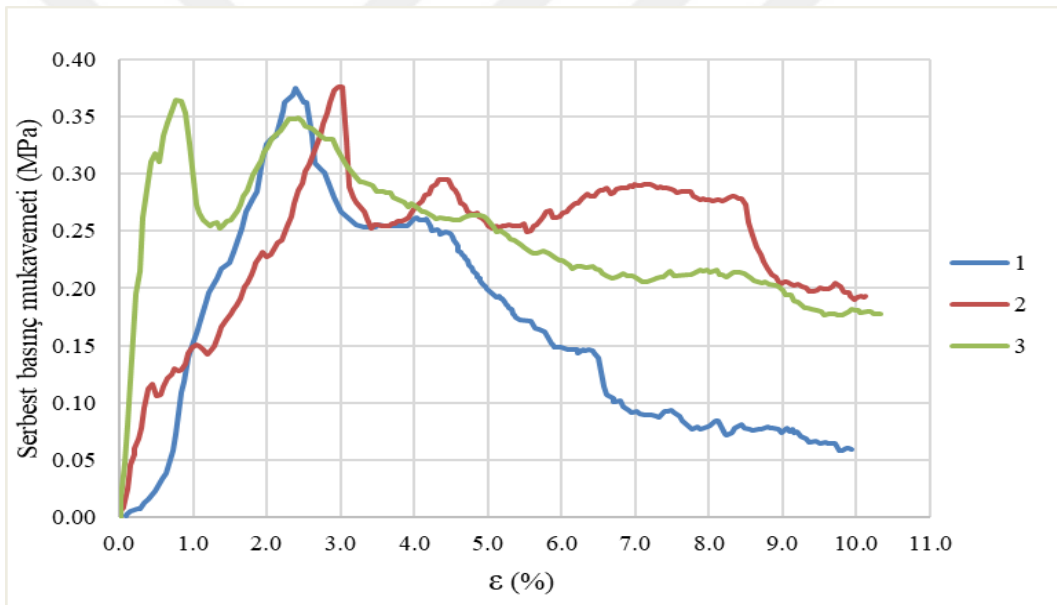
Şekil Ek 2 3. 9 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği



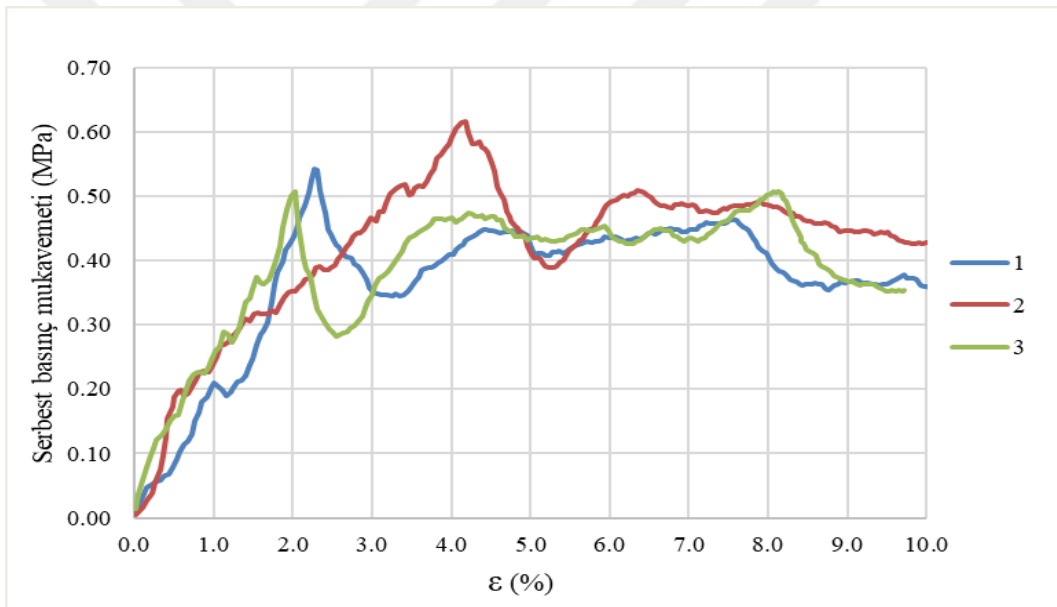
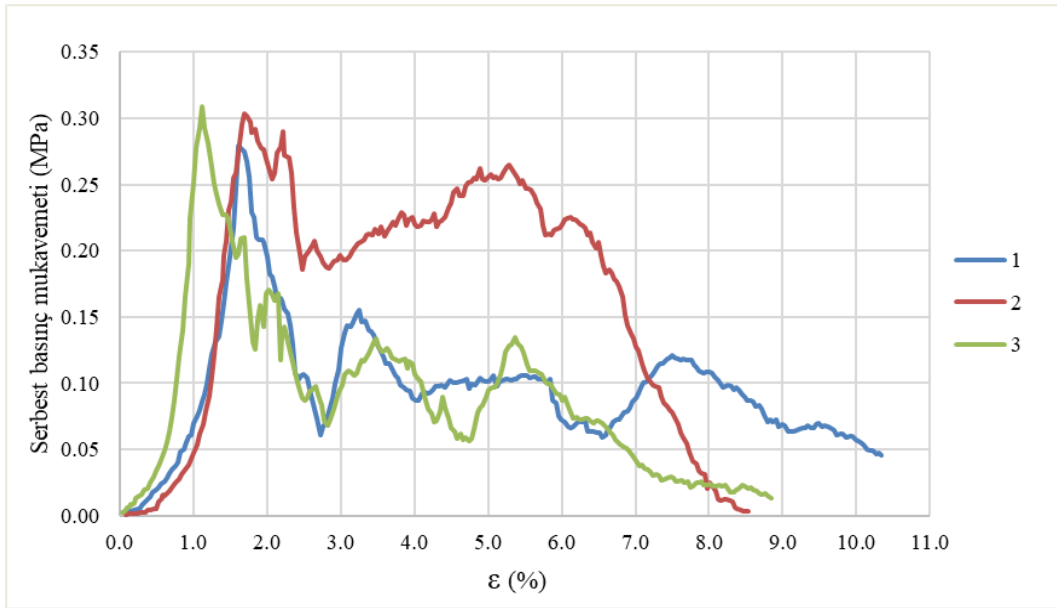
Şekil Ek 2 4. 9 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği

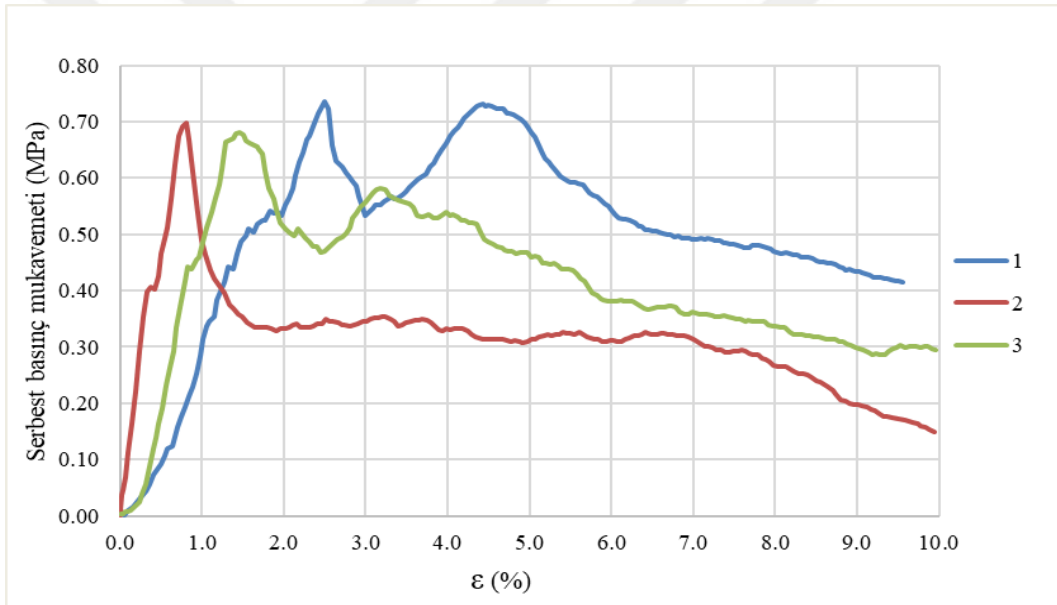
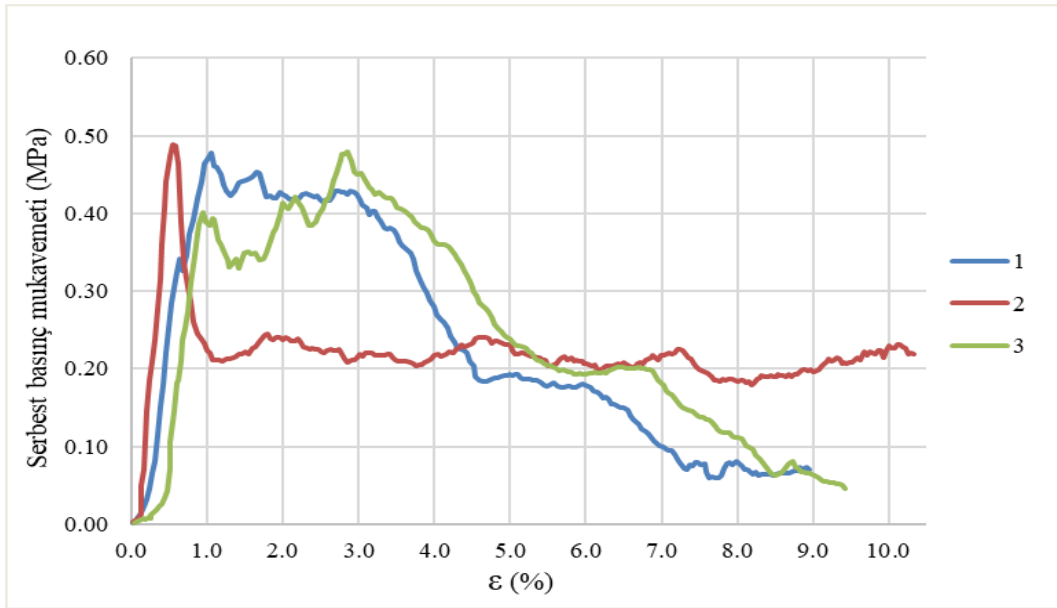


Şekil Ek 2 5. 10 No'lu tasarıma ait 7 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği

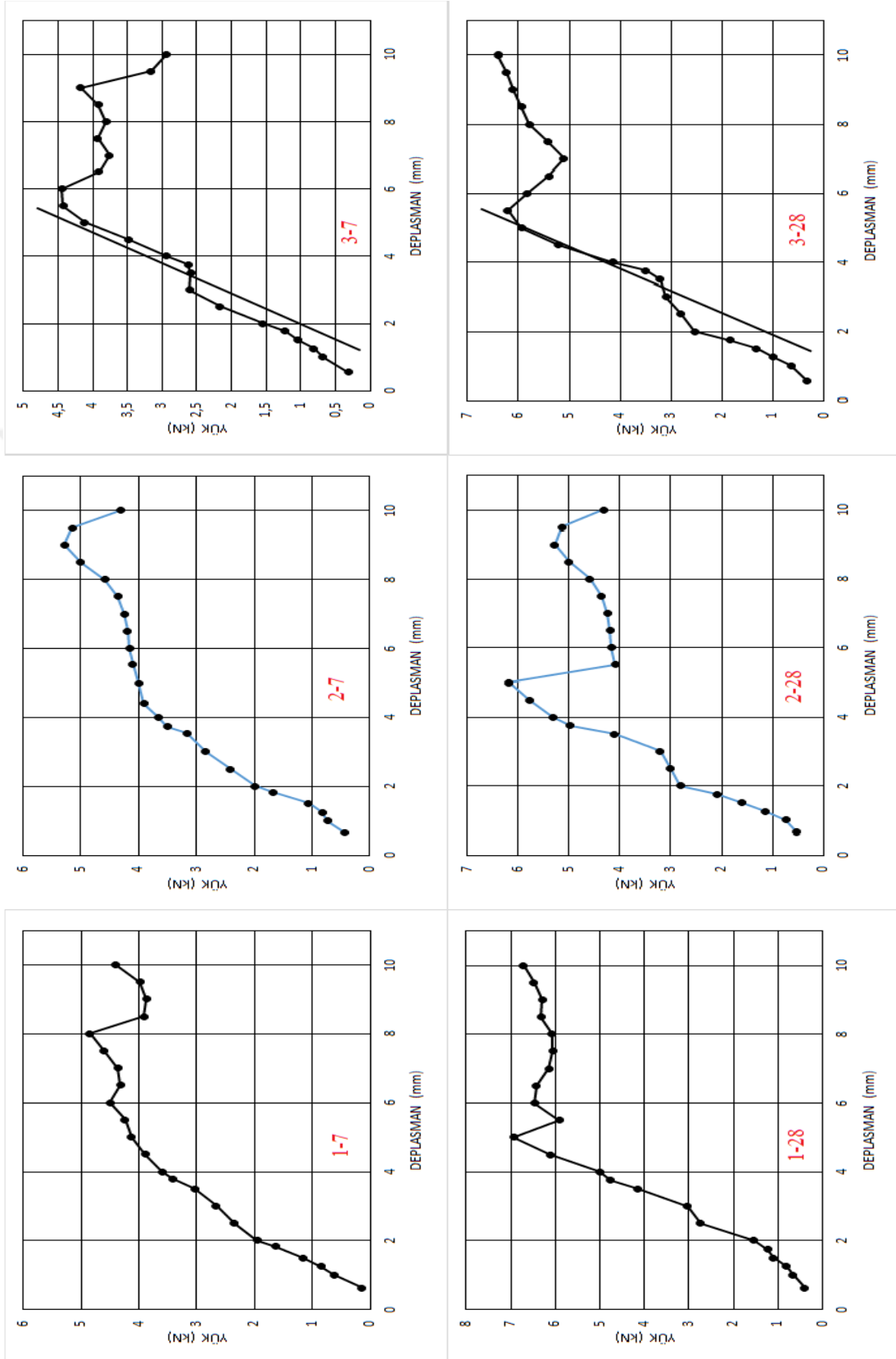


Şekil Ek 2 6. 10 No'lu tasarıma ait 28 günlük normal gerilme- aksel birim deformasyon grafiği

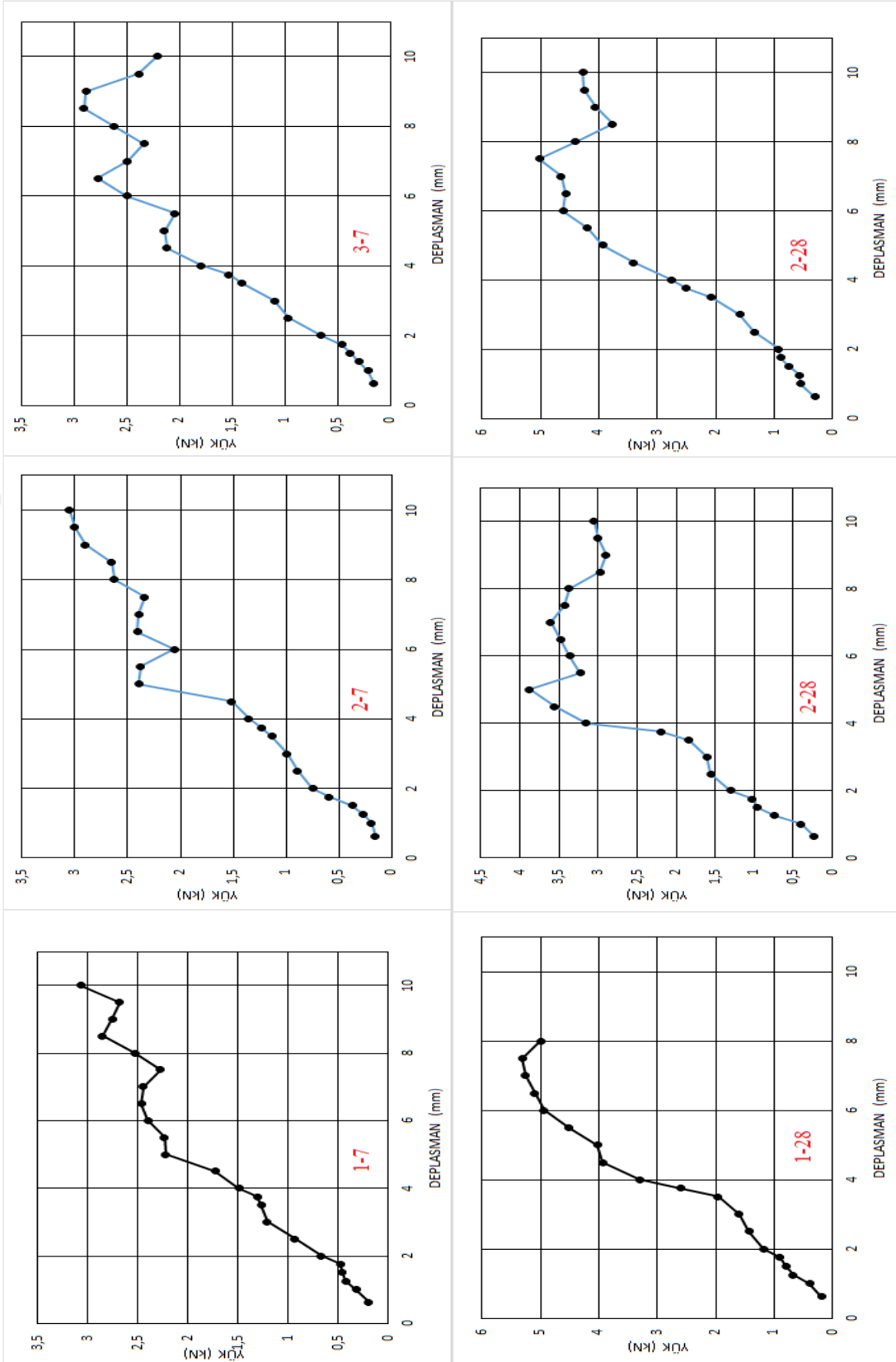




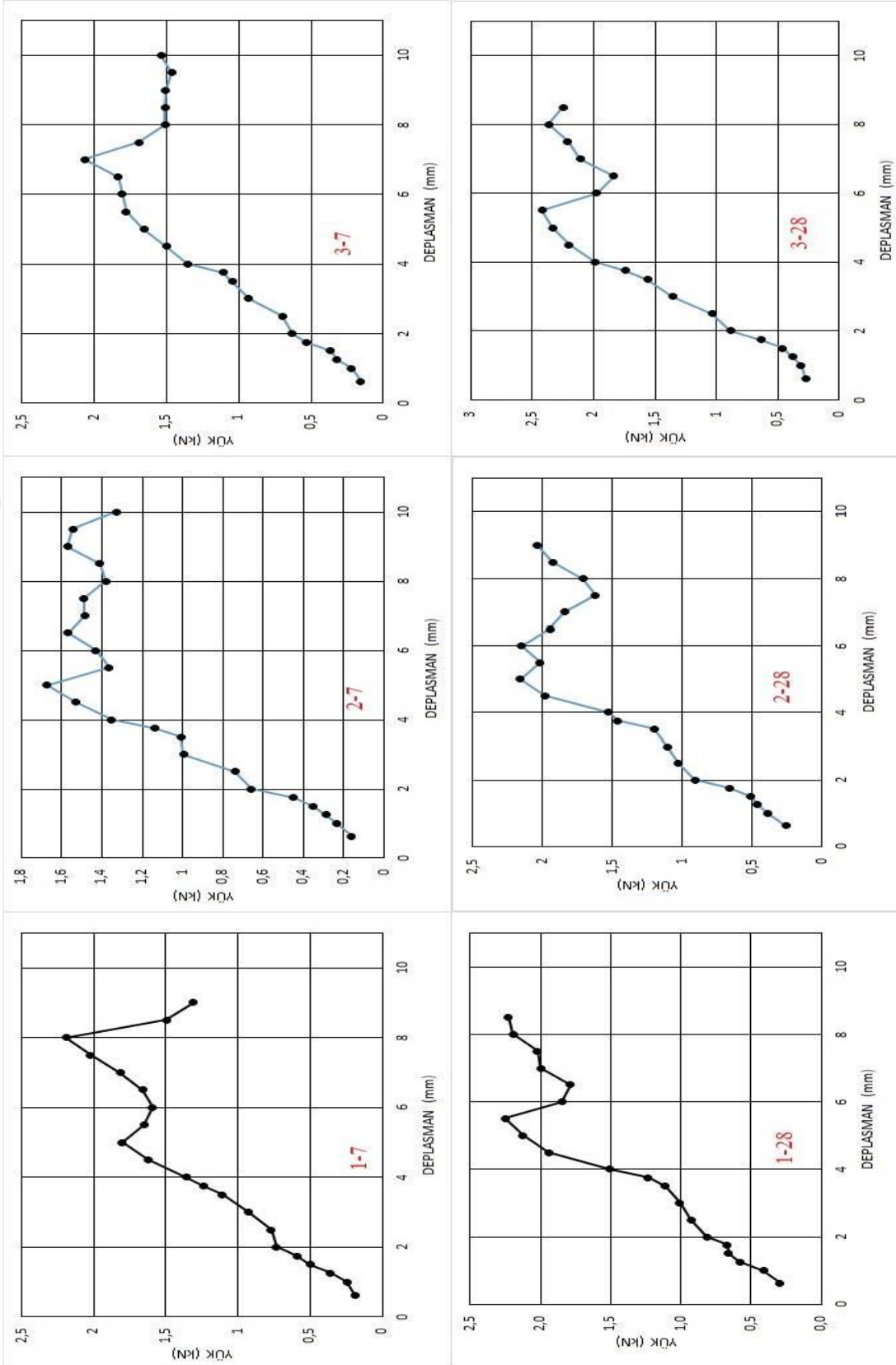
## EK-3 CBR Deney Grafikleri



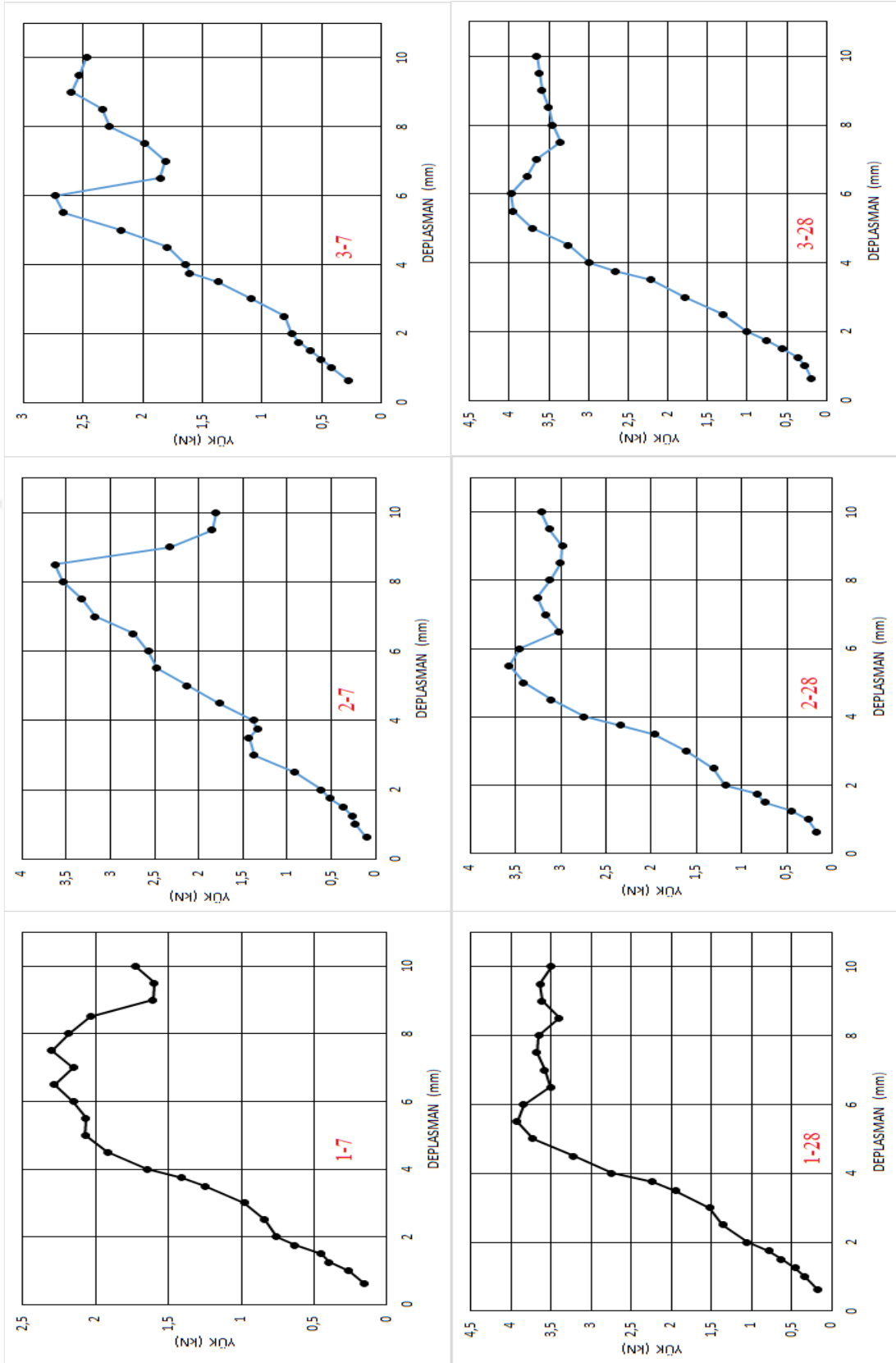
Şekil Ek 3 1. 3 No'lu tasarıma ait 7 ve 28 günlük yük – pentrasyon grafikleri



Şekil Ek 3 2. 9 No'lu tasarıma ait 7 ve 28 günlük yük – pentrasyon grafikleri

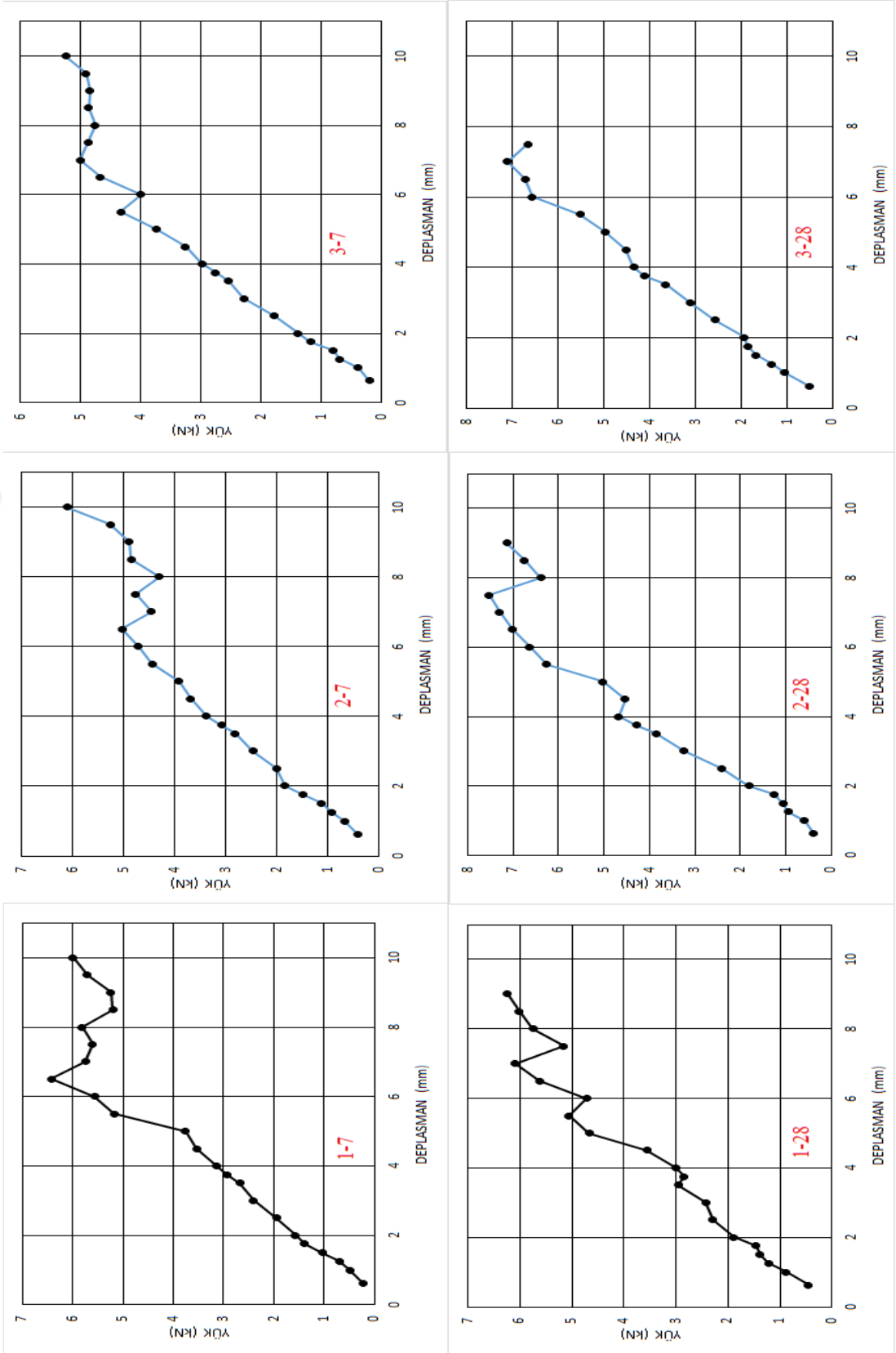


Şekil Ek 3 3. 10 No'lu tasarıma ait 7 ve 28 günlük yük – pentrasyon grafikleri



Şekil Ek 3 4. 15 No'lu tasarıma ait 7 ve 28 günlük yük – pentrasyon grafikleri





Şekil Ek 3 5. 20 No'lu tasarıma ait 7 ve 28 günlük yük – pentrasyon grafikleri