

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CAM KÖPÜĞÜ-ÇİMENTO-KUM KARIŞIMININ HAFİF DOLGU
MALZEMESİ OLARAK GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erman Yiğit TUNCEL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

OCAK, 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CAM KÖPÜĞÜ-ÇİMENTO-KUM KARIŞIMININ HAFİF DOLGU
MALZEMESİ OLARAK GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Erman Yiğit TUNCEL
(501091317)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Berrak TEYMÜR

OCAK, 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501091317 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Erman Yiğit TUNCEL**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**CAM KÖPÜĞÜ-ÇİMENTO-KUM KARIŞIMININ HAFİF DOLGU MALZEMESİ OLARAK GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Berrak TEYMÜR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : **19 Aralık 2011**
Savunma Tarihi : **25 Ocak 2012**

Aileme,

ÖNSÖZ

Zayıf ve problemlı zeminlerin kullanıma kazandırılmasının giderek önem kazandığı günümüzde atık maddelerin yeniden değerlendirilmesine olanak veren kompozit zemin dolguları geoteknik mühendisliğinde önemli bir yere sahiptir. İTÜ İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı kapsamında tarafımca hazırlanan bu tez çalışmasında, cam atıklardan elde edilen cam köpüğü malzemesi kullanılarak üretilmiş karışımların hafif dolgu malzemesi olarak bazı mühendislik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmanın cam köpüğünün yalıtım alanının dışında da kullanıma kazandırılması ve hafif dolgu malzemelerinin kullanımını gerektiren geoteknik uygulamalar için yeni bir alternatif olması bakımından yarar sağlamasını temenni eder, başta İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı ve İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarı çalışanları olmak üzere bu çalışmada emeği geçen herkese teşekkür ederim.

Aralık 2011

E. Yiğit TUNCEL

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY.....	xxvii
1. GİRİŞ	1
2. KONTROLLÜ DÜŞÜK DAYANIMLI MALZEMELER (KDDM)	7
2.1 KDDM Uygulamaları	9
2.1.1 Geri dolgular	9
2.1.2 Yapısal dolgular	10
2.1.3 Yalıtım ve izolasyon dolguları	10
2.1.4 Yol üst yapı temelleri	10
2.1.5 İletim hattı döşemeleri	11
2.1.6 Aşınma kontrolü	12
2.1.7 Boşluk doldurma	12
2.1.8 Nükleer tesisler.....	13
2.1.9 Köprü düzenlemeleri	13
2.2 Malzemeler	14
2.2.1 Çimento.....	14
2.2.2 Uçucu kül.....	14
2.2.3 Katkılar	14
2.2.4 Diğer katkıları	15
2.2.5 Su.....	15
2.2.6 Agregalar.....	15
2.2.7 Standart olmayan malzemeler	16
2.2.8 Köpük katkılı kontrollü düşük dayanımlı hafif malzemeler	17
2.2.8.1 Uygulamalar	17
2.2.8.2 Malzemeler.....	17
2.2.8.3 Özellikler.....	18
2.2.8.4 Karışım oranları.....	18
2.2.8.5 Yapım.....	19
Harmanlama	19
Karıştırma	19
Yerleştirme.....	19
2.2.9 Malzemelerin Karışım Oranları	20
2.3 Özellikler	21
2.3.1 Plastik özellikler	21
2.3.1.1 Akıcılık.....	21
2.3.1.2 Segregasyon.....	22

2.3.1.3 Çökelme	22
2.3.1.4 Sertleşme süresi.....	23
2.3.1.5 Pompalama.....	24
2.3.2 Kullanım özellikleri	24
2.3.2.1 Dayanım (Taşıma Gücü).....	24
2.3.2.2 Birim hacim ağırlığı	25
2.3.2.3 Oturma	25
2.3.2.4 Isıl yalıtım/iletkenlik	25
2.3.2.5 Permeabilite	26
2.3.2.6 Rötire	26
2.3.2.7 Kazılabilirlik (Hafriyat)	26
2.3.2.8 Kayma modülü.....	27
2.3.2.9 Korozyon potansiyeli.....	27
2.3.2.10 Plastiklerle uyumluluk	28
3. CAM KÖPÜĞÜ MALZEMESİ	29
3.1 Cam Köpüğü İmalatı	29
3.2 Cam Köpüğü Uygulamaları ve Avantajları	30
3.3 Cam Köpüğünün Geoteknik Mühendisliğindeki Uygulamalarına Örnekler	33
3.3.1 Değişik yoğunluktaki cam köpüğü malzemelerinin kompaksiyon özellikleri	33
3.3.2 Japonya, Higashimatsuura County'deki bir istinat dolgusu	34
3.3.3 Japonya, Karatsu kentindeki göçmüş bir şevin restorasyon çalışması.....	35
3.3.4 Norveç, National Road No 17 üzerindeki göçmüş bir şevin onarımı	35
3.3.5 Norveç, Stryn, Lodalen'de yaya/bisiklet yolundaki bir şev dolgusu	36
3.3.6 Norveç, National highway No 120 üzerindeki bir dolgu çalışması	37
4. CAM KÖPÜĞÜ KULLANILARAK ÜRETİLEN KONTROLLÜ DÜŞÜK DAYANIMLI HAFİF DOLGU MALZEMESİNİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	39
4.1 Karışımda Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	39
4.1.1 Çimento	39
4.1.2 Kum.....	40
4.1.3 Cam köpüğü.....	43
4.2 Karışımların Hazırlanması.....	44
4.3 Değişik Cam Köpüğü Granülometreleri İle Yapılan Çalışmalar	46
4.3.1 Karışımlar	47
4.3.2 Karışımların birim hacim ağırlıkları	48
4.3.3 Karışımların serbest basınç dayanımları	48
4.3.4 Karışımların elastisite ve kayma modülleri	53
4.4 Değişik Kum ve Çimento Oranları İle Yapılan Çalışmalar	54
4.4.1 Karışımlar	54
4.4.2 Karışımların birim hacim ağırlıkları	54
4.4.3 Karışımların serbest basınç dayanımları	56
4.4.4 Karışımların elastisite ve kayma modülleri	58
4.5 Belirlenen Çimento-Köpük-Kum Karışımı Üzerinde Yapılan Çalışmalar	60
4.5.1 Karışımlar	60
4.5.2 Karışımların birim hacim ağırlıkları	62
4.5.3 Serbest basınç dayanımları	62
4.5.4 Karışımları elastisite ve kayma modülleri	65
4.5.5 CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) deneyleri	65

4.5.6 Geçirimsizlik özellikleri.....	69
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	71
5.1 Cam Köpüğü Granülometrisinin Karışıma Etkisi	72
5.1.1 Cam köpüğü granülometrisinin karışımın birim hacim ağırlığına etkisi...	73
5.1.2 Cam köpüğü granülometrisinin karışımın serbest basınç dayanımına etkisi	74
5.2 Kum Oranının Karışıma Etkisi.....	74
5.2.1 Kum/cam köpüğü oranının karışımın birim hacim ağırlığına etkisi	76
5.2.2 Kum/cam köpüğü oranının karışımın serbest basınç dayanımına etkisi ...	77
5.2.3 Kum/cam köpüğü oranının karışımın elastisite ve kayma modülüne etkisi	79
5.3 Çimento Oranının Karışıma Etkisi	80
5.3.1 Çimento oranının karışımın birim ağırlığına etkisi	80
5.3.2 Çimento oranının karışımın serbest basınç dayanımına etkisi	82
6. SONUÇLAR.....	85
KAYNAKLAR.....	89
EKLER.....	93
ÖZGEÇMİŞ	139

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ACI	: American Concrete Institute
ASTM	: American Society for Testing and Materials
KDDM	: Kontrollü Düşük Dayanımlı Malzeme
CLSM	: Controlled Low Strength Material
CBR	: California Bearing Ratio
Ç.O.	: Çimento Oranı
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı
EPS	: Expanded Polystyrene
K.O.	: Kum Oranı
OUK	: Orhaneli Uçucu Külü
PÇ	: Portland Çimentosu
SEM	: Scanning Electron Microscopy
USCS	: Unified Soil Classification System
VMCM	: Volumetric measuring and continuous-mixing concrete equipment

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Türkiye katı atık kompozisyonu.	3
Çizelge 1.2 : Türkiye geri kazanılabilir atık kompozisyonu.	3
Çizelge 2.1 : Kontrollü düşük dayanımlı malzemelerin avantajları.....	8
Çizelge 2.2 : Hafif KDDM'lerin birim hacim ağırlıklarına göre genel dayanım özellikleri.	18
Çizelge 4.1 : Kullanılan portland çimentosunun fiziksel özellikleri	40
Çizelge 4.2 : Kullanılan portland çimentosunun dayanım özellikleri	40
Çizelge 4.3 : Kullanılan portland çimentosunun kimyasal özellikleri	41
Çizelge 4.4 : Akpınar kumunun geoteknik özellikleri.....	43
Çizelge 4.5 : Cam köpüğüne ait teknik özellikler.	44
Çizelge 4.6 : Farklı granülometrik bileşimli cam köpüğü kullanılarak üretilmiş KDDM karışımlarının birim ağırlıkları.	48
Çizelge 4.7 : Değişik cam köpüğü granülometrileri ile hazırlanan karışımların 7 günlük serbest basınç dayanımları.	50
Çizelge 4.8 : Değişik cam köpüğü granülometrileri ile hazırlanan karışımların elastisite ve kayma modülleri.....	53
Çizelge 4.9 : Değişik kum ve çimento oranlarıyla yapılan karışımlar.	55
Çizelge 4.10 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 1 olan numunelerin birim hacim ağırlık özellikleri.	56
Çizelge 4.11 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 2 olan numunelerin birim hacim ağırlık özellikleri.	56
Çizelge 4.12 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 3 olan numunelerin birim hacim ağırlık özellikleri.	57
Çizelge 4.13 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 1 olan numunelerin dayanım özellikleri.	57
Çizelge 4.14 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 2 olan numunelerin dayanım özellikleri.	58
Çizelge 4.15 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 3 olan numunelerin dayanım özellikleri.	58
Çizelge 4.16 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 1 olan numunelerin elastisite ve kayma modülleri	59
Çizelge 4.17 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 2 olan numunelerin elastisite ve kayma modülleri	59
Çizelge 4.18 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 3 olan numunelerin elastisite ve kayma modülleri	60
Çizelge 4.19 : 7 günlük birim hacim ağırlık değerleri.....	62
Çizelge 4.20 : 28 günlük birim hacim ağırlık değerleri.....	62
Çizelge 4.21 : 7 günlük numunelerin serbest basınç deney sonuçları.	63
Çizelge 4.22 : 28 günlük numunelerin serbest basınç deney sonuçları.	64
Çizelge 4.23 : 7 ve 28 günlük numunelerin elastisite ve kayma modülleri.....	66
Çizelge 4.24 : CBR deneyinde kullanılan standart birim gerilmeler	67

Çizelge 4.25 : CBR değerlerinin sınıflandırılması.....	67
Çizelge 4.26 : 7 ve 28 günlük CBR değerleri.	68
Çizelge 4.27 : Zeminlerin permeabilite ve drenaj karakteristikleri	70
Çizelge 4.28 : Zeminlerin permeabilite katsayılarına göre sınıflandırılması	70
Çizelge 4.29 : Numunelerin geçirimsizlik özellikleri.	70
Çizelge 5.1 : Cam köpüğü granülometrilerine ait incelik modülleri.	73
Çizelge 6.1 : Cam Köpüğü – Kum – Çimento kullanılarak üretilmiş KDDM karışımının diğer hafif dolgu malzemeleri ile karşılaştırılması.....	87

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : KDDM'nin kepçe ile kazılması.....	27
Şekil 3.1 : Cam köpüğünün imalat süreci.....	30
Şekil 3.2 : Cam köpüğünün üç ana çeşidi.....	30
Şekil 3.3 : Süreksiz boşluklara sahip cam köpüğünün görünümü ve mikroyapısı.....	31
Şekil 3.4 : Sürekli boşluklara sahip cam köpüğünün görünümü ve mikroyapısı.....	31
Şekil 3.5 : Cam köpüğünün geoteknik uygulamalarda kullanımı	33
Şekil 4.1 : Akpınar kumunun tane boyutu dağılımı.	41
Şekil 4.2 : Akpınar kumunun %50 sıklıktaki kayma gerilmesi-yanal deplasman ilişkisi.	42
Şekil 4.3 : Akpınar kumuna ait normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi.	42
Şekil 4.4 : Cam köpüğünün tane boyutu dağılımı.	43
Şekil 4.5 : Kayma gerilmesi – yanal deplasman arasındaki ilişki.	45
Şekil 4.6 : Normal gerilme ile kayma gerilmesi arasındaki ilişki.	45
Şekil 4.7 : Numune kalıpları (Çap: 50 mm, Yükseklik: 100 mm).	47
Şekil 4.8 : Kalıp sökümü sonrası numuneler.	47
Şekil 4.9 : Farklı cam köpüğü granülometrisi ile üretilmiş numuneler	48
Şekil 4.10 : Serbest basınç dayanımı.....	49
Şekil 4.11 : Serbest basınç deney düzeneği	50
Şekil 4.12 : 1 no'lu cam köpüğü granülometrisi ile üretilen numunelerin serbest basınç dayanımı eğrileri.	51
Şekil 4.13 : 2 no'lu cam köpüğü granülometrisi ile üretilen numunelerin serbest basınç dayanımı eğrileri.	51
Şekil 4.14 : 3 no'lu cam köpüğü granülometrisi ile üretilen numunelerin serbest basınç dayanımı eğrileri.	52
Şekil 4.15 : Numunelerin serbest basınç deneyi sonrasındaki görünümü	52
Şekil 4.16 : %50 Kum - %50 Köpük kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme-eksenel şekil değiştirme davranışları	61
Şekil 4.17 : Serbest basınç deneyinden önce numunenin görünümü	63
Şekil 4.18 : 7 günlük numunelerin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışları.	64
Şekil 4.19 : 28 günlük numunelerin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışları.	65
Şekil 4.20 : CBR deneyi, numunenin deney öncesi ve sonrasındaki görünümü.	67
Şekil 4.21 : Karışımın 7. gündeki yük – penetrasyon davranışı.	68
Şekil 4.22 : Karışımın 28. gündeki yük – penetrasyon davranışı.	68
Şekil 4.23 : Sabit seviyeli permeabilite deney düzeneğinin şematik gösterimi	69
Şekil 5.1 : Karışımın birim hacim ağırlığının incelik modülü ile değişimi	74
Şekil 5.2 : Karışımın serbest basınç dayanımının incelik modülü ile değişimi.	75
Şekil 5.3 : Kum oranı artışı ile beraber meydana gelen ayrışma problemi.....	76
Şekil 5.4 : Karışımın birim hacim ağırlığının kum oranıyla değişimi.....	77
Şekil 5.5 : Karışımın serbest basınç dayanımının kum oranıyla değişimi.....	78

Şekil 5.6 : Çimento/(kum+cam köpüğü oranı) = 2 olan karışımların elastisite modüllerinin kum oranıyla değişimi	79
Şekil 5.7 : Çimento/(kum+cam köpüğü oranı) = 2 olan karışımların kayma modüllerinin kum oranıyla değişimi	80
Şekil 5.8 : Karışımın birim hacim ağırlığının çimento oranıyla değişimi.....	81
Şekil 5.9 : Karışımın serbest basınç dayanımının çimento oranıyla değişimi.....	83
Şekil A.1 : 1-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	95
Şekil A.2 : 1-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	95
Şekil A.3 : 1-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	96
Şekil A.4 : 2-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	96
Şekil A.5 : 2-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	97
Şekil A.6 : 2-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	97
Şekil A.7 : 3-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	98
Şekil A.8 : 3-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	98
Şekil A.9 : 3-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	99
Şekil A.10 : 1-1-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	100
Şekil A.11 : 1-1-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	100
Şekil A.12 : 1-1-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	101
Şekil A.13 : 1-2-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	101
Şekil A.14 : 1-2-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	102
Şekil A.15 : 1-2-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	102
Şekil A.16 : 1-2-4 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	103
Şekil A.17 : 1-3-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	103
Şekil A.18 : 1-3-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	104
Şekil A.19 : 1-3-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	104
Şekil A.20 : 1-4-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	105
Şekil A.21 : 1-4-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	105
Şekil A.22 : 1-4-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	106

Şekil A.23 : 1-4-4 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	106
Şekil A.24 : 1-5-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	107
Şekil A.25 : 1-5-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	107
Şekil A.26 : 2-1-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	108
Şekil A.27 : 2-1-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	108
Şekil A.28 : 2-1-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	109
Şekil A.29 : 2-2-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	109
Şekil A.30 : 2-2-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	110
Şekil A.31 : 2-2-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	110
Şekil A.32 : 2-3-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	111
Şekil A.33 : 2-3-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	111
Şekil A.34 : 2-3-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	112
Şekil A.35 : 2-4-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	112
Şekil A.36 : 2-4-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	113
Şekil A.37 : 2-4-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	113
Şekil A.38 : 2-5-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	114
Şekil A.39 : 2-5-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	114
Şekil A.40 : 2-5-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	115
Şekil A.41 : 3-1-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	115
Şekil A.42 : 3-1-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	116
Şekil A.43 : 3-1-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	116
Şekil A.44 : 3-2-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	117
Şekil A.45 : 3-2-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	117
Şekil A.46 : 3-2-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	118
Şekil A.47 : 3-3-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	118

Şekil A.48 : 3-3-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	119
Şekil A.49 : 3-3-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	119
Şekil A.50 : 3-4-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	120
Şekil A.51 : 3-4-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	120
Şekil A.52 : 3-4-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	121
Şekil A.53 : 3-5-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	121
Şekil A.54 : 3-5-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	122
Şekil A.55 : 3-5-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	122
Şekil A.56 : %100 köpük kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 1).....	123
Şekil A.57 : %75 köpük - %25 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 1)	123
Şekil A.58 : %50 köpük - %50 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 1)	124
Şekil A.59 : %25 köpük - %75 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 1)	124
Şekil A.60 : %100 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 1)	125
Şekil A.61 : %100 köpük kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 2).....	125
Şekil A.62 : %75 köpük - %25 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 2)	126
Şekil A.63 : %50 köpük - %50 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 2)	126
Şekil A.64 : %25 köpük - %75 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 2)	127
Şekil A.65 : %100 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 2)	127
Şekil A.66 : %100 köpük kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 3).....	128
Şekil A.67 : %75 köpük - %25 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 3)	128
Şekil A.68 : %50 köpük - %50 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 3)	129
Şekil A.69 : %25 köpük - %75 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 3)	129
Şekil A.70 : %100 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 3)	130
Şekil A.71 : 7-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	131
Şekil A.72 : 7-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı.....	131

Şekil A.73 : 7-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	132
Şekil A.74 : 7-4 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	132
Şekil A.75 : 7-5 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	133
Şekil A.76 : 7-6 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	133
Şekil A.77 : 7-7 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	134
Şekil A.78 : 7-8 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	134
Şekil A.79 : 28-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	135
Şekil A.80 : 28-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	135
Şekil A.81 : 28-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	136
Şekil A.82 : 28-4 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	136
Şekil A.83 : 28-5 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	137
Şekil A.84 : 28-6 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	137
Şekil A.85 : 28-7 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	138
Şekil A.86 : 28-8 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı	138

CAM KÖPÜĞÜ-ÇİMENTO-KUM KARIŞIMININ HAFİF DOLGU MALZEMESİ OLARAK GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ

ÖZET

Malzemelerin belirli bir amaca yönelik olarak bir araya getirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemeler, üst yapı ihtiyacının giderek arttığı ve çok katlı yüksek binaların popülerleştiği günümüzde problemli zeminlerin kullanıma kazandırılması amacıyla gerçekleştirilen geoteknik uygulamalarda da sıklıkla başvurulmuş bir çözüm yolu olmuştur. Kompozit zeminlerde hammadde olarak çevresel ve endüstriyel atık malzemelerin kullanılması, ucuz yollu hammadde temini ile daha ekonomik yapısal çözümler sağlamakla birlikte atıkların kullanıma geri kazandırılmasına yardımcı olarak çevrenin korunmasına da yardımcı olur.

Atık malzemelerin bileşen olarak kullanımına olanak veren kompozit zemin oluşumlarından bir tanesi de kontrollü düşük dayanımlı malzemelerdir. Kontrollü düşük dayanımlı malzeme (KDDM) genelde sıkıştırılmış dolguya alternatif olarak geri dolgu biçiminde kullanılan kendiliğinden yerleşen, çimentolu bir malzemedir. Kontrollü düşük dayanımlı malzemeler basınç dayanımı 8,3 MPa'ı geçmeyen malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Güncel KDDM uygulamalarının çoğunda serbest basınç dayanımı 2,1 MPa'ı aşmamaktadır. Düşük dayanım kriteri malzemenin gelecek zamanlarda olası bir kazı işlemine elverişli olması bakımından gereklidir.

Kontrollü düşük dayanımlı malzeme karışımlarında kullanılacak bileşenlerin seçimi kullanılacak malzemenin kolay bulunabilirlik, maliyet, uygulamanın amacına uygunluk, karışımdan beklenen akıcılık, dayanım, hafiflik, kazılabilir olma gibi olmazsa olmaz özellikleri sağlama durumuna bağlı olup üretilen karışımların amaca uygunluğu yapılan deneylerle desteklendiği takdirde standart dışı malzemeler de KDDM karışımlarında kullanılabilir.

Tüm gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde katı atıklar sosyal, ekonomik ve çevresel sorunların en büyüğünü oluşturmaktadır. Bu atıkların bir bölümü geri kazanılabilir atıklar olup çeşitli işlemlerle tekrar kullanıma sunulabilirler. Ülkemizde bu tür atıkların önemli bir bölümünü cam atıklar oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, katı cam atık maddelerin geri kazanılmasıyla elde edilen malzemelerden bir tanesi olan cam köpüğünün kontrollü düşük dayanımlı hafif malzeme üretiminde hammadde olarak kullanılabilirliği irdelenmiş, çeşitli laboratuvar deneyleri ile cam köpüğü kullanılarak üretilmiş kompozit zeminlerin dayanım ve hafiflik özellikleri araştırılmıştır. Gözenekli veya köpük cam, temel olarak cam veya cam benzeri malzeme eriyiklerine bir takım gazlar veya gaz oluşturuucu maddeler eklenerek oluşturulmuş yüksek kabarcık içeriğine sahip camdır. Sonuç olarak ortaya çıkan gözenekli cam çok hafif olmakla birlikte yüksek basınç dayanımına ve boyutsal stabiliteye sahiptir. Genel olarak termal ve akustik yalıtım malzemesi olarak kullanılan cam köpüğünün boşluklu ve hafif yapısı bu malzemeyi

hafifliğin ön planda olduğu geoteknik uygulamalar için potansiyel bir dolgu malzemesi haline getirmektedir.

Hafif dolgu malzemeleri geoteknik mühendisliğinde çok yumuşak zeminler üzerinde hafif dolgular oluşturarak oturma ve taşıma gücü problemlerinin çözümünde, heyelan ve kayma potansiyeli yüksek şevler üzerinde dolgu teşkil edilmesinde dayanma yapılarına gelen itkilerin azaltılmasında kullanılmaktadır. Hafif dolgu malzemesi olarak ponza taşı gibi çeşitli hafif agregalar, ağaç kabuğu, talaş gibi orman ürünleri sanayii atıkları, kullanılmış oto lastiği parçaları, polistren köpük ve termik santral külü hâlihazırda kullanılagelen malzemelerdir. Endüstriyel ve çevresel atıkların değerlendirilmesi ve depolama problemlerinin azaltılması bakımından inşaat sektöründe, özellikle geoteknik uygulamalarda hammadde olarak bu tip malzemelerin kullanılması hem ekonomik hem de çevresel anlamda ülkeye önemli katkılar sağlamaktadır.

Çalışma esnasında karışımlarda kullanılan cam köpüğünün tek başına kullanıldığı takdirde sürtünme etkisine olan dayanıksızlığı nedeniyle bu malzemenin çimento ile desteklenerek kullanılması yoluna gidilmiştir. Bu yönüyle de cam köpüğünün kontrollü düşük dayanımlı malzeme karışımlarında bileşen olarak kullanılmasının uygun olacağı düşünülmüştür.

Kompozit zemin karışımının bir haftalık dayanımının 0,7 MPa'nın üzerinde olması hedeflenmiş öte yandan gelecek zamanlarda kompozit zemin üzerinde gerçekleştirilecek olası bir kazı işlemi de hesaba katılarak 28 günlük dayanım değerinin de 1,0 MPa'ı geçmemesi amaçlanmıştır. Karışımın birim hacim ağırlık değerinin 9,81 kN/m³ olması uygun görülmüştür.

Hedeflenen karışımın elde edilmesine yönelik çalışmalara paralel olarak kullanılan cam köpüğü granülometrisinin ve cam köpüğünün yanında karışımlarda belli oranlarda kum kullanmanın karışımın birim ağırlık ve dayanım özelliklerine olan etkisi de araştırılmıştır. Bu bağlamda deneyler üç ana aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada cam köpüğü granülometrisinin oluşturulan kompozit malzemenin yoğunluğu ve serbest basıncı üzerindeki etkisi araştırılmış kaba malzeme kullanılarak üretilen karışımların daha hafif olduğu gözlemlenmiştir. İkinci aşamada çimento – cam köpüğü karışımlarına belirli oranlarda kum eklenmiş ve kum miktarının birim ağırlığa ve serbest basınç dayanımına olan etkisi gözlemlenmiştir. Aynı deneyler farklı çimento oranları ile tekrarlanarak ağırlıkça çimento/cam köpüğü oranının etkisi de belirlenmiştir. Son olarak bir önceki aşamadaki deney sonuçları ışığında belirli bir karışım seçilip buna göre üretilen numuneler üzerinde birim hacim ağırlık, serbest basınç, permeabilite ve CBR deneyleri yapılarak cam köpüğü kullanılarak üretilmiş kontrollü düşük dayanımlı hafif malzemenin bazı mühendislik özellikleri belirlenmiştir.

Karışım dizaynları oluşturulurken uygun karışım oranlarının belirlenmesi amacıyla ilk önce deneme karışımları yapılarak üretilen karışımların birim hacim ağırlıklarına bakılmıştır. Geleneksel beton karışım hesaplarında olduğu gibi çimento dozajı belirlenerek hacimsel hesaplamalara gidilerek yapılan dizaynlar cam köpüğü partiküllerinin üretim sırasında ufalanarak hacimsel değişikliğe uğramasından dolayı tutarlı ve tekrarlanabilir sonuçlar vermemiş bu nedenle dizaynlarda bileşenlerin ağırlıkça oranları göz önüne alınmıştır. Buna göre bağlayıcı olarak kullanılan çimento ile boşluklu bir yapı elde etmek için kullanılan ve karışımdaki en yüksek hacim oranına sahip ana bileşen niteliğinde olan cam köpüğü malzemesi kütleli

olarak değişik oranlarda karıştırılmış ve birim hacim ağırlığı bakımından istenen hafiflikte numuneler elde edilmeye çalışılmıştır.

Değişik kum oranları kullanılarak üretilen karışımların 7 günlük deney sonuçları incelendiğinde optimum sonuçları çimento/(kum+köpük) oranı 2 olan ve granüler malzeme olarak yarı yarıya cam köpüğü ve kum içeren numunelerin verdiği gözlemlenmiştir. Yukarıda açıklanan fazla su içeriği kaynaklı ayırışma problemini gidermek amacıyla su/çimento oranı 0,70'ten 0,45'e çekilmiş bu değişiklik ile karışımın dayanımı da bir miktar arttırılarak amaçlanan dizayna ulaşılmıştır.

Yapılan modifikasyonlar sonucunda elde edilen karışımın ortalama doygun birim hacim ağırlığı $8,83 \text{ kN/m}^3$, 7 günlük ortalama serbest basınç dayanımı 0,75 MPa, 28 günlük ortalama serbest basınç dayanımı ise 0,91 MPa olarak elde edilmiştir. Elastisite modülleri 7 günlük numunelerde 131,2 MPa, 28 günlük numunelerde ise 205,3 MPa olarak ölçülmüştür. Kayma modülleri ise 50,4 ve 79,0 MPa olarak hesaplanmıştır. Karışımın 7 günlük CBR değeri 38,4; 28 günlük CBR değeri ise 78,9'dur. Bu değerler literatüre göre yorumlandığında karışımın 7 günlük CBR değerlendirmesinin "iyi", 28 günlük CBR değerlendirmesinin ise "çok iyi" olduğu sonucuna ulaşılmış olup karışımın temel veya alt temel uygulamaları için yeterli olduğu söylenebilir. Karışım permeabilite katsayısı, k, yapılan sabit seviyeli permeabilite deneyleri ile 7 günlük numunelerde $7,28 \times 10^{-3} \text{ cm/sn}$, 28 günlük numunelerde $7,05 \times 10^{-3} \text{ cm/sn}$ olarak belirlenmiştir. Bu değerler üretilen numunelerin orta düzeyde bir geçirimliliğe sahip olduğunu göstermektedir.

Cam köpüğü – kum – çimento kullanılarak üretilmiş KDDM karışımı, çok yumuşak ve konsolidasyonu devam eden zeminler üzerinde hafif dolgular oluşturularak oturma ve taşıma gücü problemlerinin çözümünde, kayma potansiyeli yüksek şevler üzerinde dolgu teşkil edilmesinde, dayanma yapılarına gelen itkilerin azaltılmasında kullanılabilir. Bu karışımın kullanıldığı uygulamalarda yanıl basınçlar, karışımın hafifliği katılaştıktan sonra kendisini tutabilme özelliği sayesinde azalacaktır. Karışımın birim hacim ağırlığı doğal zeminlerin birim hacim ağırlığının yarısından daha az olduğu için dolgu olarak kullanılması halinde alttaki zeminde oluşacak düşey basıncı doğal dolgu malzemelerine göre yarıya indirecektir. Ayrıca cam köpüğünün gözenekli yapısının karışımına kazandırmış olduğu drenaj özelliği cam köpüğü kullanılarak üretilmiş KDDM karışımlarının sürekli olarak yağmur ve kar suları ile karşı karşıya kalan kaldırım ve yol alt yapılarında kullanımını da avantajlı hale getirmektedir.

GEOTECHNICAL PROPERTIES OF GLASS FOAM – CEMENT – SAND MIXTURES AS A LIGHTWEIGHT FILL MATERIAL

SUMMARY

Today, with the rapid increase in the need for superstructure and popularity of the multi-storey high-rise buildings, composite materials are used to improve weak soils. The use of environmental and industrial waste materials as raw material in composite soils helps protect environment with the recycling of these materials while providing more economic solutions.

One of the formations in which the waste materials can be used as a component is controlled low strength material (CLSM). Controlled low strength material is a self-compacting cementitious material that is generally used as back-fill as an alternative to compacted-fill. Controlled low strength material is identified as materials that have a compressive strength under 8.3 MPa. In most of the current CLSM applications, unconfined compression strength is under 2.1 MPa. A low strength criterion is required for the material as there can be an excavation in future.

With the high workability and easy deliverance, CLSM offers strong and durable performance for filling applications in geotechnical engineering with its versatile nature. It requires less inspection compared to traditional soil fills and reduces the equipment needs. Selection of materials that will be used in CLSM mixtures should be based on availability, cost, specific application, and the necessary characteristics of the mixture, including flow ability, strength, easiness of excavation and density. Nonstandard materials can be used to produce CLSM as long as the materials have been tested and found to satisfy the intended application.

In all developed and developing countries, solid waste is a social, economic and environmental issue. A portion of this waste constitutes of recyclable wastes, and with several processes, they may be used again. In Turkey, waste glass makes the significant part of solid wastes. One of the recycled glass product is glass foam. The basic principle of glass foam manufacture is to generate a gas in glass at a temperature between 700 and 900°C. The gas expands thus producing a structure of cells to form a porous body. Final production cellular glass has a high strength and dimensional stability with low density. Glass foam is generally used as thermal and acoustical isolation material. The cellular and lightweight structure of this material makes it a potential fill material for geotechnical applications where the lightness is important.

Lightweight fill materials can be used in geotechnical engineering for the consolidation and bearing capacity problems of very soft soils, for filling applications performed on potentially collapsible slopes generally. The use of lightweight fill materials can be summarized as below:

- Decreasing the pressures on the retaining structures,
- Constructing fills with low need of maintenance,
- Preventing construction deformations over nearby buildings,

- Reducing consolidation of sub base construction over weak soils,
- Preventing consolidation difference between fills and reducing lateral earth pressure over piles,
- Reducing consolidation of manmade islands and high quality seawalls,
- Lowering process time of constructions over weak soils,
- Lowering topographical changes in mountain road constructions,
- Stabilizing slopes over mountain road constructions.

Various lightweight aggregates like pumice stone, forest products sourced industrial wastes like tree shells and sawdust, used tire pieces, polystyrene foam and fly ash are the regular lightweight fill material. With regards of recycling of the industrial and environmental waste and reducing the storage problems, the use of these materials in civil engineering industry, especially in the geotechnical applications as raw materials, contributes to the economy and the environment.

In this study, the availability of glass foam as a component for CLSM production was investigated, some geotechnical properties including strength and unit weight characteristics of glass foam used-composite soils were explored using several laboratory tests. Glass foam was used with cement to make it more durable against friction.

In terms of allowable bearing pressure, 0.3 to 0.7 MPa strength is aimed as it is equivalent to a well-compacted fill. 7-day compressive strength of the designed composite soil fill was aimed to be over 0.7 MPa. On the other hand, for the possibility of an excavation in the composite soil, the upper strength limit was chosen as around 1.0 MPa. From the studies found in literature, the unit weight of the mixture was deemed appropriate around 9.81 kN/m^3 .

The effect of glass foam granulometry on unit weight and unconfined compression strength was researched. Also research was done with mixture of sand and foam. Experimental work was carried out in three main stages. In the first stage, the effect of foam granulometry on unit weight and unconfined strength of the composites were investigated. It has been observed that the mixtures produced from coarse glass foam were lighter compared to the finer ones. In the second stage, certain amounts of sand were added to cement-glass foam mixtures and the effect of sand on unit weight and unconfined compression strength of the composites were determined. A certain mixture design and some engineering properties of this lightweight composite fill were determined by unconfined compression, permeability and California Bearing Ratio (CBR) tests.

To determine the proper mixture proportion, trial mixtures was produced and the unit weights of these trials were examined. Designs in that the cement dosage and volumetric calculations were used similar to conventional concrete mix design have not been successful due to the crushing of foam particles during production. Cement that was used as binder and glass foam material to obtain a cellular structure were mixed in various weight proportions and lightweight specimens were produced.

In the mixtures that were produced with different sand ratios, the water amount was determined according to the mixtures that consist of only glass foam and was kept constant. The reason for that is to prevent the effect of water/cement ratio on the test results. The reason for taking into account the mixtures those consist of only glass

foam for water amount is that the most water requirement was observed by these mixtures. When the sand ratios were increased in mixtures, the water amount has increased due to the high relative unit weight of the sand compared to glass foam and caused segregation problems. This must be considered in the cases that high sand ratios are used and water content must be adjusted. In consequences of these experiences, the mix design that will be used in later stage of the study was modified.

When the 7-day experimental results of the mixtures that were produced using different sand ratios was examined, it has been observed that the optimum results were exhibited by the specimens which has equal sand and glass foam quantity and cement over foamed sand mixture ratio is two. To solve the segregation problem which caused by excess water content, the water/cement ratio was decreased from 0.70 to 0.45 and with this modification, the strength of the mixture was increased and the target design was achieved.

The results of the tests performed on the final mixtures can be summarized as below:

- The average value of the saturated unit weight of the mixture after modifications done was found as 8.83 kN/m^3 .

- The average value of the typical 7-day unconfined compression strength of the mixture was determined as 0.75 MPa while the average of the 28-day unconfined compressive strength was 0.91 MPa.

- The average value of the modulus of elasticity of the 7-day-specimens was determined as 131.2 MPa while it was 205.2 MPa for 28-day-specimens.

- The shear modulus of the mixture was determined as 50.4 MPa and 79.0 MPa for 7-day and 28-day specimens respectively.

- The CBR value of the 7-day mixtures was observed as 38.4 while this value was 78.9 for 28-day mixtures. CBR tests showed that the glass foam-sand-cement mixtures have enough bearing capacity to be used as a subbase material.

- The permeability coefficient of the mixtures was found as $7.28 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ for 7-day specimens and $7.05 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ for 28-day specimens. These values showed that specimens have an intermediate permeability level.

As a result, by producing lightweight fills with CLSM mixture produced using glass foam-sand-cement can be a solution for consolidation and bearing capacity problems of very soft soils which continually consolidate, constitution of geotechnical fills on potentially sliding slopes and reducing the stress distribution on retaining structures. Subsequent to the setting, with the immediate progression in cohesion of the lightweight mixture, lateral stresses can be reduced in the applications. In consequence of the high drainage ability arising from the cellular structure of foam glass, CLSM mixtures produced using glass foam are a convenient material for pavement and highway structures exposed to regular rain and snow waters. With this superior drainage performance, it has precedence over other fill materials.

1. GİRİŞ

Eski çağlardan günümüze inşaat sektöründe, özellikle malzeme alanında hızla ilerleyen teknolojik gelişmelerin bir sonucu olarak yapısal problemlerin çözümünde kompozit malzeme kullanımı hızla yaygınlaşmış, kompozit malzemeler proje gerekliliklerini yerine getirirken maliyetin de düşük seviyede tutulmasına olanak vererek daha ekonomik tasarımların yapılmasını sağlamıştır. Giderek artan üstyapı ihtiyacı ile çok katlı yüksek binaların popülerleşmesi, zayıf ve problemli zeminlerin kullanıma kazandırılmasını kaçınılmaz kılmış, zemin iyileştirme metotları da buna bağlı olarak hızla gelişim göstermiştir. Çevresel atıkların kompozit malzemelerde ham madde olarak kullanılması hem atıkların değerlendirilerek çevre kirliliğinin azaltılmasına olanak vermiş hem de üretilen kompozit malzemenin daha ucuza mal edilmesini sağlamıştır. Bu bağlamda kompozit zeminlerin kullanımı hem çevre dostu hem de ekonomik bir zemin iyileştirme çözümü olarak öne çıkmıştır.

Kompozit malzemeler; belirli bir amaca yönelik olarak en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle meydana gelen malzeme grubudur. Üç boyutlu nitelikteki bu bir araya getirmede amaç, bileşenlerin hiç birinde tek başına mevcut olmayan bir özelliğin elde edilmesidir. Diğer bir deyişle, amaçlanan doğrultuda bileşenlerin daha üstün özelliklere sahip bir malzeme üretilmesi hedeflenmektedir.

Uygulamada, kompozit malzeme üretiminde genellikle aşağıdaki özelliklerden birinin veya bir kaçının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu özellikler;

Mekanik dayanım, basınç, çekme, eğilme, çarpma dayanımı,

Yorulma dayanımı, aşınma direnci,

Korozyon direnci,

Kırılma tokluğu,

Yüksek sıcaklığa dayanıklılık,

Isı iletkenliği veya ısı direnci,

Elektrik iletkenliği veya elektriksel direnci,

Akustik iletkenlik, ses tutuculuğu veya ses yutuculuğu,

Rijitlik,

Ağırlık,

Görünüm,

olarak sıralanabilir. Ayrıca dolaylı olarak malzemenin birim maliyeti de düşürölmektedir. Bu amaca yönelik olarak kompozit malzeme üretiminde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Hepsinde değışmeyen temel ilke, bileşenlerin zayıf yönlerinin amaç doğrultusunda iyileştirilerek daha nitelikli bir yapının elde edilmesidir.

Sanayileşme ile beraber refah artışı olarak nitelendirilen hayat seviyesinin yükselmesi, birtakım sorunları da beraberinde getirmiştir. Tüketim artışına bağlı olarak oluşan katı atıkların miktarı da artarak çevreyi kirletici boyutlara ulaşmıştır. Tüm gelişmiş ve gelişmekte olan ölkelerde katı atıklar sosyal, ekonomik ve çevresel sorunların en büyüğünü oluşturmaktadır. Son yıllarda, özellikle büyük kentlerde atıkların denetim ve kontrol altına alınmasına yönelik çalışmalar hızlandırılmıştır. Bu amaçla üzerinde önemle durulan konulardan birisi de kentsel katı atıkların geri kazanılarak, ekonomiye bir katkı sağlanmasıdır (DPT, 2001a).

Çizelge 1.1'e göre evsel atıkların % 12,05'i geri kazanılabilir nitelikte olup bunun da % 18,46'sı camdır (Çizelge 1.2). Geri kazanılabilir atık miktarı yıllık 2-2,5 milyon ton iken bunun yaklaşık 360-450 bin tonu da cam atıklardan oluşmaktadır. Birçok yerleşim yeri için çok büyük problem teşkil eden katı atıkların önemli bir miktarını oluşturan cam atıklar, bazı durumlarda kaynağında özel olarak ayrılırken, bir miktarı da çöplüklerden ayırt edilmek suretiyle yeniden değerlendirme için toplanmaktadır. Bu atıkların önemli bir bölümü cam eşya üretiminde değerlendirilmektedir. Özellikle büyük kentlerde katı atıkların kaynağında ayrı ayrı toplanması için bir takım çalışmalar yürütölmüş ve halen bu amaç doğrultusunda çalışılmaktadır. Çünkü katı atıkların yeniden değerlendirilmesi çalışmalarının başarısı büyük ölçüde bu çalışmalara bağlıdır.

Ölkemizde de tüm dünyada olduğu gibi katı atıkların büyük bir oranını cam atıklar oluşturmaktadır. Günümüzde cam, birçok değışik alanda kullanılmakla beraber inşaat, otomobil ve mutfak eşyası alanlarında yoğunlaşmıştır. Cam sektörü

ürünleriyle inşaat, otomotiv, beyaz eşya, gıda, içki, meşrubat, ilaç, kozmetik, turizm, mobilya, boru, elektrik ve elektronik gibi birçok sektöre ve ev kesimine girdi vermektedir (DPT, 2001b). Gerek kullanım sırasında gerekse değişik nedenlerle sanayide ve evlerde çok miktarda katı cam, atık madde olarak atılmaktadır.

Çizelge 1.1 : Türkiye katı atık kompozisyonu (DPT, 2001a).

Atık Cinsi	(%)
Organik atık (mutfak, park, bahçe)	65,45
Kül, cüruf, taş, toprak	22,48
Geri kazanılabilir malzeme	12,05

Çizelge 1.2 : Türkiye geri kazanılabilir atık kompozisyonu (DPT, 2001a).

Atık Cinsi	(%)
Kâğıt, karton	45,48
Metal	8,62
Cam	18,46
Plastik	13,19
PET, PVC	6,15
Lastik, kauçuk	3,35
Tekstil	4,88

Katı cam atık maddelerin geri kazanılmasıyla elde edilen malzemelerden bir tanesi de cam köpüğüdür. Gözenekli veya köpük cam, temel olarak cam veya cam benzeri malzeme eriyiklerine bir takım gazlar veya gaz oluşturuıcı maddeler eklenerek oluşturulmuş yüksek kabarcık içeriğine sahip camdır. Sonuç olarak ortaya çıkan gözenekli cam çok hafif olmakla birlikte yüksek basınç dayanımına ve boyutsal stabiliteye sahiptir. Bu özelliği cam köpüğünün bilhassa termal ve akustik yapısal yalıtım malzemesi olarak kullanımına olanak verir (Mineral Strategies Pty Ltd., 2005). Bu çalışmada çok hafif bir granüler malzeme olan cam köpüğünün geoteknik uygulamalarda hafif dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği üzerinde durulmuştur.

Hafif dolgu malzemeleri geoteknik mühendisliğinde çok yumuşak zeminler üzerinde hafif dolgular oluşturarak oturma ve taşıma gücü problemlerinin çözümünde, heyelan ve kayma potansiyeli yüksek şevler üzerinde dolgu teşkil edilmesinde dayanma yapılarına gelen itkilerin azaltılmasında kullanılmaktadır. Hafif dolgu malzemesi olarak ponza taşı gibi çeşitli hafif agregalar, ağaç kabuğu, talaş gibi orman ürünleri sanayii atıkları, kullanılmış oto lastiği parçaları, polistren köpük ve termik santral külü kullanılan malzemelerdir. Endüstriyel ve çevresel atıkların değerlendirilmesi ve

depolama problemlerinin azaltılması bakımından inşaat sektöründe, özellikle geoteknik uygulamalarda hammadde olarak bu tip malzemelerin kullanılması hem ekonomik hem de çevresel anlamda ülkeye önemli katkılar sağlamaktadır. Hafif dolgu teşkilinde bu malzemeler yerel zemin ile karıştırılarak klasik sıkıştırma yöntemleri ile kompozit zeminler oluşturulabileceği gibi literatürde kontrollü düşük dayanımlı malzemeler olarak bilinen çimentolu karışımlar da uygulama kolaylığı bakımından tercih edilebilir.

Kontrollü düşük dayanımlı malzeme (KDDM) genelde sıkıştırılmış dolguya alternatif olarak geri dolgu biçiminde kullanılan kendiliğinden yerleşen, çimentolu bir malzemedir. Kontrollü düşük dayanımlı malzemeler ACI 116R raporu kapsamında basınç dayanımı 8,3 MPa'ı geçmeyen malzemeler olarak tanımlanmıştır. Güncel KDDM uygulamalarının çoğunda serbest basınç dayanımı 2,1 MPa'ı aşmamaktadır. Düşük dayanım kriteri malzemenin gelecek zamanlarda olası bir kazı işlemine elverişli olması bakımından gereklidir.

0,3 ila 2,1 MPa arasında değişen dayanım değerleri betonla karşılaştırıldığında düşük kalmaktadır. Bir zeminin üzerindeki bir yükü taşıyabilme kapasitesini ölçmede ortak bir kriter olan izin verilebilir taşıma gücü bağlamında 0,3 ila 0,7 MPa'lık dayanım iyi sıkıştırılmış bir dolguya eşittir.

Geleneksel KDDM karışımları genellikle su, portland çimentosu, uçucu kül veya benzeri malzemeler, ince veya iri agregalar veya her ikisinin beraber kullanıldığı karışımlardan oluşur. Genel olarak KDDM karışımlarında kullanılan malzemeler ASTM standartlarının gereksinimlerini yerine getirir nitelikte olsa da her zaman karışımlarda standart malzemelerin kullanılması gerekli değildir. Malzeme seçimi kullanılacak malzemenin kolay bulunabilirlik, maliyet, uygulamanın amacına uygunluk, karışımdan beklenen akıcılık, dayanım, hafiflik, kazılabilir olma gibi özellikleri sağlama durumuna bağlıdır.

Bu çalışmada, cam köpüğünün kontrollü düşük dayanımlı hafif malzeme üretiminde hammadde olarak kullanılabilirliği irdelenmiş, çeşitli laboratuvar deneyleri ile cam köpüğü kullanılarak üretilmiş kompozit zeminlerin dayanım ve hafiflik özellikleri araştırılmıştır. Karışımda kullanılan malzemelerin genel mühendislik özelliklerini belirlemeye yönelik bazı temel deneylerin yapılmasının ardından kompozit malzemeye ait deneyler üç ana aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada cam

köpüğü granülometrisinin oluşturulan kompozit malzemenin yoğunluğu ve serbest basıncı üzerindeki etkisi araştırılmış kaba malzeme kullanılarak üretilen karışımların daha hafif olduğu gözlemlenmiştir. İkinci aşamada çimento – cam köpüğü karışımlarına belirli oranlarda kum eklenmiş ve kum miktarının birim ağırlığa ve serbest basınç dayanımına olan etkisi gözlemlenmiştir. Aynı deneyler farklı çimento oranları ile tekrarlanarak ağırlıkça çimento/cam köpüğü oranının etkisi de belirlenmiştir. Son olarak bir önceki aşamadaki deney sonuçları ışığında belirli bir karışım seçilip buna göre üretilen numuneler üzerinde birim hacim ağırlık, serbest basınç, permeabilite ve CBR deneyleri yapılarak cam köpüğü kullanılarak üretilmiş kontrollü düşük dayanımlı hafif malzemenin bazı mühendislik özellikleri belirlenmiştir.

İkinci bölümde kontrollü düşük dayanımlı malzemeler detaylı bir biçimde incelenmiş, bu malzemelerle ilgili daha önce yapılan araştırmalardan yararlanılarak bu malzemelerin uygulama alanları ve özellikleri anlatılmıştır. Üçüncü bölümde çalışmada kullanılan cam köpüğü malzemesinin üretimi ve özellikleri ile uygulama alanları açıklanarak, dördüncü bölümde deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Beşinci bölümde bir önceki bölümde verilen deneysel veriler karşılaştırmalı olarak yorumlanarak bu incelemeler sonucunda elde edilen pratik amaçlar doğrultusunda kullanılabilecek bağıntılar ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Yapılan deney sonuçlarından elde edilen veriler regresyon analizleri ile değerlendirilmiştir. Altıncı bölümde çalışma kısaca özetlenerek genel sonuçlar literatürdeki diğer hafif dolgu malzemeleriyle karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur.

2. KONTROLLÜ DÜŞÜK DAYANIMLI MALZEMELER (KDDM)

Kontrollü düşük dayanımlı malzeme (KDDM) genelde sıkıştırılmış dolguya alternatif olarak geri dolgu biçiminde kullanılan kendiliğinden yerleşen, çimentolu bir malzemedir. Literatürde akıcı dolgu, büzülme yapmayan dolgu, kontrollü yoğunluklu dolgu, akışkan harç, plastik zemin-çimento, zemin-çimento bulamacı isimleriyle de bilinir.

Kontrollü düşük dayanımlı malzemeler ACI 116R raporu kapsamında basınç dayanımı 8,3 MPa'ı geçmeyen malzemeler olarak tanımlanmıştır. Güncel KDDM uygulamalarının çoğunda serbest basınç dayanımı 2,1 MPa'ı aşmamaktadır. Düşük dayanım kriteri malzemenin gelecek zamanlarda olası bir kazı işlemine elverişli olması bakımından gereklidir.

KDDM terimi çeşitli uygulamalarda kullanılan karışımları tanımlamada kullanılabilir. Örnek olarak, 8,3 MPa üst sınırı bu malzemenin kazılma olasılığı düşük, binaların altındaki yapısal dolgular gibi uygulamalarda kullanılmasına izin verir. KDDM karışımlarında köpük kullanımı bu karışımların tipik KDDM karışımlarına göre daha düşük birim hacim ağırlığa sahip olmasını sağlamıştır. İleride korozyon önleyici dolgular, termal dolgular, kalıcı kaldırım temelleri gibi kontrollü düşük dayanımlı malzemeler geliştirilebilir.

KDDM düşük dayanımlı betonun bir tipi olarak nitelendirilmemelidir. Daha çok sıkıştırılmış dolgu yerine kullanılan kendiliğinden yerleşen geri dolgu malzemesi olarak tanımlanabilir. KDDM karışımları genel olarak donmaya ve çözünmeye, aşındırıcı kuvvetlere veya saldırgan kimyasallara dirençli olarak tasarlanmamıştır. Standart olmayan malzemeler de test edilip istenilen koşulları sağladığı belirlendiği takdirde KDDM üretiminde kullanılabilir.

Ayrıca, ACI 230.1R raporunda belirtildiği üzere, KDDM sıkıştırılmış zemin-çimento karışımları ile de karıştırılmamalıdır. KDDM genellikle kompaksiyon veya herhangi bir kür uygulanmadan arzu edilen dayanıma ulaşır. Çoğu uygulamada sıkıştırılmış zemin-çimento karışımlarının uzun süreli basınç dayanımı değerleri KDDM için üst koşul olarak belirlenmiş 8,3 MPa değerini aşmaktadır.

0,3 ile 2,1 MPa arasında değişen dayanım değerleri betonla karşılaştırıldığında düşük kalmaktadır. Bir zeminin üzerindeki bir yükü taşıyabilme kapasitesini ölçmede ortak bir kriter olan izin verilebilir taşıma gücünün 0,3 ile 0,7 MPa'lık dayanıma sahip olması iyi sıkıştırılmış bir dolgu anlamına gelmektedir.

KDDM m³ başına çoğu zemine veya granüler malzemeye göre pahalı olmasına rağmen birçok avantajı sayesinde kullanıldığı yerlerde daha ekonomik sonuçlar vermektedir. Bazı uygulamalar için KDDM uygun tek dolgu malzemesidir (Adaska, 1994; Ramme, 1997; Adaska, 1997). Çizelge 2.1'de KDDM kullanımının avantajları sıralanmıştır (Smith, 1991).

Çizelge 2.1 : Kontrollü düşük dayanımlı malzemelerin avantajları (Smith, 1991).

Hazır ve kolay bulunma	Hazır beton üreticileri proje şartnamesine uygun KDDM karışımını mevcut olan yerel malzemeleri kullanarak kolaylıkla üretebilir.
Kolay taşınabilme	İhtiyaç olan miktarda malzeme transmikserler tarafından çalışma alanına istenilen miktarda ulaştırılabilir.
Kolay yerleştirilebilme	Doldurulacak olan boşluğun tipine ve yerine göre KDDM, oluk, konveyör, pompa veya kova yardımı ile yerleştirilebilir. KDDM kendiliğinde yerleşme özelliğine sahip olduğundan çok az bir yayma veya sıkıştırma yeterlidir. Bu da işin hızlanmasını ve işgücü gereksiniminin düşmesini sağlar.
Çok yönlü	KDDM karışımları özel dolguların ihtiyacını karşılatırılmak üzere ayarlanabilir. Akışkanlık, dayanım, priz süresi, yoğunluk, geçirimsizlik ve diğer performans karakteristikleri kullanılan malzemeler ve katkılar yardımı ile düzenlenebilir.
Güçlü ve dayanıklı	KDDM'nin yük taşıma kapasitesi tipik sıkıştırılmış zemin veya granüler dolgudan daha yüksektir. Daha az geçirgen olup erozyona karşı daha dirençlidir. Kalıcı dolgu olarak kullanılacak durumlarda 28 günlük dayanımın 8,3 MPa'a en yakın olacak şekilde tasarlanabilir.
Hızlı onarılma	KDDM'nin çabuk yerleştirilebilme ve trafik yüklerini saatler içerisinde taşıyabilir duruma gelme özelliği sayesinde kaldırım onarımı sırasındaki aksaklık süresi en aza indirilir.
Oturma yapmaz	KDDM yerleştirme sırasında boşluk oluşturmaz ve yük altında oturma yapmaz. Dolgunun kaldırım eki ile kaplanacağı durumlarda bu özellik daha da önem kazanır.
Kazılabilir	0,3 ila 0,7 MPa'lık dayanıma sahip KDDM dolguları geleneksel kazı aletleri ile kolayca kazılabilirdiği gibi dolgulardan beklenen birçok özelliği de karşılayabilecek güçtedir.
Düşük ekipman ihtiyacı	Zemin ve granüler malzemenin aksine KDDM loder, silindir veya tokmak kullanılmaksızın yerleştirilebilir.
Düşük kazı maliyeti	Kompaksiyon ekipmanı için gereken genişletilmiş hendeklere ihtiyaç olmadığından KDDM daha dar hendeklere izin verir.
Yüksek işçi güvenliği	İşçiler KDDM'yi yerleştirmek için hendek içine girmek zorunda kalmadıkları için herhangi bir çöküntüye maruz kalma olasılıkları da düşer.

Çizelge 2.1 (Devam): Kontrollü düşük dayanımlı malzemelerin avantajları.

Her türlü hava şartında inşa edilebilirlik	KDDM hendek içinde bulunan yağmur veya kar suyunu bulunduğu yerden çıkartır. Soğuk havalardaki KDDM uygulamalarında malzeme hazır beton için uygulanan ısıtma teknikleri uygulanarak ısıtılabilir.
Daha az denetim gerektirir	Yerleştirme sırasında zemin dolguları her kompaksiyon işlemi sonrasında test edilmelidir. KDDM kendiliğinden yerleşme özelliğine sahip olduğundan ayrıca bir kontrol mekanizmasına ihtiyaç duymaz.
Depolama gerektirmez	KDDM istenilen miktarda hazır beton transmikserleri ile şantiyeye ulaştırıldığından dolgu malzemesinin şantiye alanında depolanmasına gerek kalmaz. Bunun yanında nakliyesi gerekli artık dolgu malzemesi de kalmaz.
Atık malzeme kullanımı	Uçucu kül gibi endüstri atıkları KDDM üretiminde kullanılabildiğinden KDDM atık malzemelerin yeniden kullanıma kazandırılması ile çevreye yarar sağlar.

2.1 KDDM Uygulamaları

Genel olarak sıkıştırılmış dolguya alternatif biçimde yapısal dolgu veya geri dolgu olarak kullanılan KDDM, kompaksiyon gerektirmeden kolay yerleşme özelliği sunduğundan yerleştirme ve sıkıştırmanın zor olduğu sınırlı erişime sahip dar alanlar için ideal bir malzemedir. İleri zamanlarda malzemenin kazılıp kaldırılması öngörülüyorsa nihai basınç dayanımının genel olarak 2,1 MPa'ı aşmaması gerekmektedir (Sullivan, 1997).

2.1.1 Geri dolgular

KDDM herhangi bir hendeğe, çukura veya boşluğa kolayca yerleştirilebilir. Kompaksiyon gerektirmez ve bunun sonucu olarak hendek genişliği veya kazı boyutu düşürülebilir. Granüler veya zemin kazısından yapılan geri dolgular gereken katman kalınlığı göz önüne alınarak dikkatli bir şekilde sıkıştırılsa dahi KDDM'nin uniformluğuna ve yoğunluğuna erişemez (Sullivan, 1997).

İstinat duvarlarının arkası doldurulurken KDDM tarafından istinat duvarına uygulanan yanal basınç dikkate alınmalıdır. Yanal akışkan basıncının problem teşkil ettiği durumlarda KDDM tabakalar şeklinde yerleştirilebilir. Tabakalı döküm tekniği her katmanın kendisinden sonraki tabaka dökülmeden önce sertleşmesine olanak tanır.

III. Peoria şehrindeki hendeklerdeki zemin dolgularında görülen şiddetli oturma problemlerinin akabinde 1988 yılında alternatif dolgu malzemesi olarak KDDM

denenmiş; 2,7 m derinlikteki hendekler KDDM ile doldurulmuştur. Taze halde akışkan olan malzeme 2 ila 3 saat içerisinde bir insanın ağırlığını taşıyacak sertliğe ulaşmıştır. Çok az ölçüde rötre çatlakları gözlemlenmiştir. Kaldırım kaplamasının 3 – 4 saat içerisinde onarılabilmesi üzerine deneyler gerçekleştirilmiş, deneylerin bir tanesinde kanalizasyon hendeği KDDM ile doldurulduktan hemen sonra kaldırım başarılı bir şekilde tamir edilmiştir. Başlangıç testlerinin ardından Peoria şehri geri dolgu ile ilgili prosedürlerini KDDM kullanımını gerektirecek şekilde değiştirmiştir (Smith, 1991).

2.1.2 Yapısal dolgular

Dayanım gereksinimlerine bağlı olarak KDDM temel takviyelerinde kullanılabilir. Uygulamaya göre basınç dayanımı 0,7 ile 8,3 arasında değişebilir. Zayıf zeminler söz konusu olduğunda yapının yükünü daha geniş bir alana aktarır. KDDM, temellerin altında düzensiz ve üniform olmayan zemin tabakalarının bulunması durumunda düz ve üniform bir zemin elde edilmesini sağlar. Basınç dayanımları proje gereksinimlerine göre değişim gösterir. Dayanımından dolayı KDDM, ihtiyaç duyulan dolgu kalınlığını ve temel gereksinimlerini azaltır. Boone yakınlarında Iowa’da bulunan bir tahıl ambarının temeli için gereken taşıma kapasitesini sağlamak üzere 2141 m³ KDDM kullanılmıştır ve uygulama başarıyla tamamlanmıştır (Larsen, 1988).

2.1.3 Yalıtım ve izolasyon dolguları

Bu tür uygulamalar için genelde hafif KDDM karışımları tercih edilmektedir. Köpük kullanılarak oluşturulmuş hafif KDDM malzemeleri hakkında ayrıntılı bilgi 2.2.8. kısımda verilecektir.

2.1.4 Yol st yapı temelleri

KDDM karışımları yol st yapılarında temel, alt temel veya temel altı malzemesi olarak kullanılabilir. Karışım mikserden direkt olarak mevcut bordürler arasındaki temel tabanı üzerine yerleştirilebilir. Esnek yol st yapı tasarımlarında yapısal katsayılar KDDM dayanımına göre değişir. Çimento ile işlem görmüş temeller ile ilgili yapılan çok sayıda değişik çalışmadan elde edilmiş verilere göre KDDM tabakasına ait yapısal katsayılar 2,8 ile 8,3 MPa’lık dayanımlar için 0,16 ile 0,28 olarak tahmin edilebilir.

KDDM'nin yol altı malzemesi olarak kullanılacağı durumlarda bordürler, oluklar, sağanak kanalları ve uygun tabakalardan oluşan iyi bir drenaj gereklidir. Temel malzemesinin suya doygun halde donmaya maruz kaldığı durumlarda donma-çözünme hasarları yetersiz durabilite özelliklerinin ortaya çıkmasına neden olur. KDDM'nin aşınma direnci düşük olduğundan aşınma yüzeyine ihtiyacı vardır.

2.1.5 İletim hattı döşemeleri

KDDM boru, elektrik, telefon ve benzeri nakil hat yatakları için benzersiz bir malzemedir. KDDM'nin akıcı karakteri boruların altındaki boşlukların düzgün bir şekilde doldurulmasını sağlar ve üniform bir taşıyıcı sistem oluşturulmuş olur.

Birleşik Devletler Islah Bürosu (The U.S. Bureau of Reclamation, USBR), 1964 yılında 518 km'lik Kanada Nehri Su Kemeri projesi kapsamındaki 380 ile 2400 mm'lik çaplara sahip beton boru hatlarının döşenmesi sırasında KDDM kullanmaya başlamıştır. USBR'nin bildirdiği üzere zemin-çimento bulamacı her 16 km'de bir güzergah üzerinde ilerleyen merkezi bir portatif karıştırıcıda üretilmiştir. Zemin-çimento bulamacı daha sonra hazır beton kamyonları kullanılarak döküm yerlerine taşınmıştır. Karışımda yerel kazılardan elde edilen kum zemin kullanılmıştır. Çimento-zemin karışımı kullanımı maliyeti %40 oranında azaltmıştır. Boru imalatı vardiya başına 120 m'den 300 m'ye çıkmıştır (Lowitz ve Defroot, 1968).

KDDM boru hattı altında erozyona karşı direnç sağlamak amacıyla da tasarlanabilir. 1970'li yılların ortalarından itibaren Iowa'daki bazı vilayet büroları KDDM yataklarının üstüne menfezler yerleştirmektedirler. Bu uygulama yalnızca üniform bir yatak oluşturmakla kalmayıp yatak ile boru arasına su girişini önleyerek takviyenin aşınmasını da engellemektedir (Larsen, 1990).

Tüm iletim hattının KDDM içine yerleştirilmesi ilerleyen zamanlarda hattın hasar görmesini de engeller. İleri bir tarihte hattın etrafındaki alanın kazılması durumunda KDDM ile onu çevreleyen zemin veya geleneksel granüler dolgu arasındaki bariz malzeme farkı kolayca anlaşılabilecek ve kazı bölgesinde iletim hattının varlığını haber verecektir. Renklendiriciler de KDDM'nin kolayca tanınabilmesi açısından karışım içerisinde kullanılabilir.

2.1.6 Aşınma kontrolü

Arazideki performansının yanında laboratuvar çalışmaları da göstermiştir ki KDDM'nin aşınma direnci diğer dolgu çeşitlerine göre çok daha iyidir. Deney sonuçları da göstermiştir ki KDDM birçok kum ve kil dolgu ile karşılaştırıldığında 0,52 m/s şiddetindeki su hızlarına maruz kaldığında malzeme kaybı bakımından diğer malzemelerden üstündür (Krell, 1989).

KDDM kaldırım koruması için anroşmanlarda ve barajlarda su savaklarının altındaki kaya parçalarını bir arada tutmak ve aşınmayı önlemek için sık sık kullanılmaktadır. KDDM aşınmayı kontrol etmek üzere kaldırım boyunca esnek malzeme matrislerini doldurup dayanımı ve ağırlığı arttırmak amacıyla kullanılır. Menfez altındaki aşınma direncini arttırma dışında doğal zeminin veya kohezif olmayan granüler dolguların aşınmaya maruz kaldığı yol üst yapıları, kaldırımlar, köprüler ve diğer yapılar altındaki boşlukların doldurulmasında KDDM rahatlıkla kullanılabilir.

2.1.7 Boşluk doldurma

Kullanılmayan tünelleri ve kanalizasyon kanallarını doldururken akıcı bir karışım kullanmak önemlidir. KDDM kullanımı akıcı malzeme elde edilmesini sağladığı gibi malzemenin daha uzak bölgelere iletilmesine de izin verir. KDDM Milwaukee'deki Menomonee Nehri altından geçen bir tüneli doldurma işleminde kullanılmıştır (Naik ve diğ, 1990).

Seattle'daki Mount Baker Ridge Tüneli inşa edilmeden önce 9,1 m uzunluğunda tüneller ile beraber 37 m derinliğinde, 3,7 m çapında bir keşif shaftı kazılmıştır. Keşif sonrası tünelin inşasından önce shaftın shaftın 601 m³'ü KDDM ile doldurulmuştur (Flechsig, 1990).

Kullanılmayan bodrumlar pompalama metodu veya pencere ve kapılardan karışımı taşımak suretiyle sık sık KDDM ile doldurulur. Illinois Hazır Beton Birliği'nin bildirdiği üzere Illinois, La Salle'deki bir endüstriyel restorasyon projesinde genişletme planlarının uygulanabilmesi için mevcut bodrum yapısının doldurulmasına ihtiyaç duyulmuştur. Granüler dolgu düşünülmüş fakat ulaşım sorunları KDDM'yi daha cazip hale getirmiştir. Bir günde yaklaşık 300 m³ malzeme dökülmüştür. Daha sonra 200 mm kalınlığında bir beton döşeme direkt olarak KDDM karışımının üstüne yerleştirilmiştir (1991).

KDDM kullanılmayan yeraltı stok tanklarının doldurulmasında da kullanılmaktadır. Yakıt ve kimyasal tankların kapatılmasına dair yapılan düzenlemeler sonucunda kullanımına süresiz olarak son verilen yeraltı stok tanklarının yeraltından tamamen temizlenmesi ya da inert bir katı ile doldurulması gerekmektedir. Iowa Doğal Kaynaklar Departmanı stok tanklarının kaldırılması ile ilgili genel olarak akıcı dolgu malzemelerinden bahseden bir kılavuz dokümanı yayınlamıştır.

Kullanılmayan madenler erişimi engellemek, göçmeyi önlemek, zararlı gazları frenlemek, yangına neden olacak oksijen teminini durdurmak ve asit drenajının önüne geçmek amacıyla KDDM ile doldurulur. Sabit bir noktadan dökülen akışkan bir karışımın kullanılması hem yayılımı sağlamak hem de enjeksiyon noktalarını en aza indirmek açısından önemlidir (Celis III, 1997). KDDM maden boşluklarını tamamen doldurmada ya da göçme tehlikesi veya çeşitli zararlı asit ve benzeri tehlikeli madde sızıntısının olma ihtimaline sahip belirli bölgelerin doldurulmasında kullanılabilir. Doğu Amerika'daki terk edilmiş yeraltı kömür madenleri çeşitli kömür yanığı ürünleri kullanılarak üretilmiş KDDM ile doldurulmaktadır (Howard ve Hitch, 1997; Celis III, 1997; Dolance ve Giovannitti, 1997).

2.1.8 Nükleer tesisler

KDDM nükleer tesislerde daha önceden bahsedilen geleneksel uygulamalarda kullanılır. Uzaktan yerleştirilebilme özelliği sayesinde personelin radyoaktiviteye maruz kalmasını önleyerek geleneksel dolguya karşı kayda değer bir üstünlük sağlar. Atık stabilizasyonu, kullanımdan kaldırılmış boruların ve tankların enkapsülasyonu, atık imha bölgelerinin enkapsülasyonu ve yeni katı atık sahalarının inşası gibi uygulamalarda da KDDM eşsiz bir malzemedir (Rajendran ve Venkata, 1997; Langton ve Rajendran, 1995).

2.1.9 Köprü düzenlemeleri

KDDM köprü iyileştirmeleri için birçok bölgede kullanılmakta olup Iowa DOT görevlileri bu teknoloji kullanıldığında maliyetin dörtte bire indiğini bildirmişlerdir (Larsen, 1990; Buss, 1989; Golbaum ve diğ, 1997).

2.2 Malzemeler

Geleneksel KDDM karışımları genellikle su, portland çimentosu, uçucu kül veya benzeri malzemeler, ince veya iri agregalar veya her ikisinin beraber kullanıldığı karışımlardan oluşur. Bazı karışımlar sadece su, portland çimentosu ve uçucu külden oluşur. Özel olarak tasarlanan kontrollü düşük dayanımlı hafif malzemeler (H-KDDM) karışımları portland çimentosu, su ve köpükten oluşmaktadır.

Genel olarak KDDM karışımlarında kullanılan malzemeler ASTM standartlarının gereksinimlerini yerine getirir nitelikte olsa da her zaman karışımlarda standart malzemelerin kullanılması gerekli değildir. Malzeme seçimi kullanılacak malzemenin kolay bulunabilirlik, maliyet, uygulamanın amacına uygunluk, karışımdan beklenen akıcılık, dayanım, hafiflik, kazılabilir olma gibi olmazsa olmaz özellikleri sağlama durumuna bağlıdır.

2.2.1 Çimento

Çimento KDDM karışımlarında kohezyon ve dayanımı sağlar. Uygulamaların çoğunda ASTM C 150 standardına uygun olan Tip I ve Tip II portland çimentosu kullanılır. ASTM C 595'e uygun karışık harmanlanmış çimentolar gibi farklı çimentolar da öncü testler ile uygunluğu onaylandıktan sonra kullanılabilir.

2.2.2 Uçucu kül

Akıcılığı arttırmak amacıyla karışımlarda uçucu kül kullanılabilir. Uçucu kül kullanımı dayanımı arttırdığı gibi terleme, rötire ve permeabiliteyi de azaltır. Yüksek dozda uçucu kül içeren bileşimler yüksek agrega içeren bileşimlere göre daha hafiftir. KDDM'de kullanılan uçucu külün ASTM C 618 standardında belirtilen F Sınıfı veya C Sınıfı uçucu kül özelliklerini sağlamasına gerek yoktur. Karışımın istenen koşullara uyup uymadığını kontrol etmek amacıyla deneme karışımlarının üretilmesi gerekir (Naik ve diğ., 1991, Landwermyerve ve diğ., 1997).

2.2.3 Katkılar

Hava sürükleyici katkıları ile köpük oluşturan katkıları KDDM üretimi için önemli bileşenlerdir. KDDM içerisine hava sürüklemek işlenebilirliği arttırdığı gibi rötire, terleme, ayrışma gibi istenmeyen durumları da minimuma indirir. Daha düşük birim ağırlıklar ve kontrol edilebilir dayanımlar elde edilebilir. Yüksek hava içeriği

KDDM'nin ısı yalıtım ve donma-çözünme özelliklerinin gelişmesine de yardımcı olur. Su içeriği, hava sürükleyici katkıları kullanıldığı takdirde %50 oranında azaltılabilir. Bu tür katkıların kullanılması tipik KDDM karışımlarının modifikasyonunu gerektirebilir. Yüksek hava içeriğine sahip karışımlarda segregasyonun önüne geçmek için karışım kohezyonu artırıcı nitelikte olan ince malzeme ile desteklenmelidir. Çoğu hava sürüklenmiş KDDM karışımları pompalanabilir nitelikte olmakla birlikte pistonlu pompaların kullanılması durumunda daha yüksek pompa basınçlarına ihtiyaç duyulur. Priz alma süresinin uzamasını önlemek için ekstra çimento ilavesine veya priz hızlandırıcı katkılara ihtiyaç duyulabilir. Her türlü durumda uygunluğun kontrolü amacıyla ön deneylere ihtiyaç vardır (Howard ve Hitch, 1997; Hoopes ve Nmai, 1997; McNeal ve Martin, 1997).

2.2.4 Diğer katkıları

Atık stabilizasyonu gibi özel uygulamalarda KDDM karışımları basit dolgu malzemelerinin ötesinde özel amaçlara hizmet eden kimyasal ve mineral katkıları içerecek şekilde tasarlanabilir. Bazı örneklerde düşük permeabilite KDDM elde etmek amacıyla bentonit gibi şişen killeri kullanılmıştır. Su arıtma işlemlerinde belirli iyonların emilimi amacıyla analsim veya kabazit gibi zeolit bileşenleri kullanılabilir. Nükleer tesislerde radyasyon perdelemesini sağlamak amacıyla manyetit veya hematit eklenebilir (Rajendran ve Venkata, 1997; Langton ve Rajendran, 1995).

2.2.5 Su

Beton karışımları için kullanılabilir nitelikte olan sular KDDM karışımları için de kullanılabilir. ASTM C 94 standardında su kalitesi gereksinimleri ile ilgili bilgiler mevcuttur.

2.2.6 Agregalar

Çoğu uygulamada agregalar KDDM karışımlarının ana bileşenidir. Agregaların cinsi, tane dağılımı ve şekli akıcılık ve dayanım gibi fiziksel özellikleri etkiler. Genellikle beton üreticilerinin stoklarında bulunan ASTM C 33 ile uyumlu agregalar kullanılır.

Granüler kazılardan elde edilen ve beton agregalarından daha düşük kalitede olan agregalar da KDDM malzemesi olarak kullanılabilir. Karışımındaki malzemelerin fiziksel özelliklerindeki varyasyonlar karışımın performansı üzerinde kayda değer bir

öneme sahiptir. %20'si 75 µm'lik elekten geçen (No. 200) siltli kumlar tatmin edici sonuçlar vermiştir. Ayrıca geniş bir granülometri aralığına sahip zeminler de etkili sonuçlara sahiptir. Killi zeminler yetersiz karışma, karışımın yapışkan olması, fazla su ihtiyacı, rötre ve değişken dayanım gibi problemler yaratabilir. Bu tip zeminler genellikle KDDM uygulamalarında kullanılmaz. Başarılı bir şekilde kullanılabilen agregalar şöyle sıralanabilir (Tansley ve Bernard, 1981):

- ASTM C 33 şartnamesine uygun belirli tane dağılımına sahip agregalar;
- Kumlu ince çakıl;
- 19 mm altı kumlu agregalar;
- %10'dan fazlası 200 no'lu elekten geçen doğal kumlu zeminler
- Genellikle 10 mm altındaki taş ocağı atık malzemeleri

2.2.7 Standart olmayan malzemeler

Proje gereksinimleri göz önünde bulundurulmak koşuluyla daha kolay veya daha düşük maliyetle temin edilebilen malzemeler de KDDM karışımlarında kullanılabilir. Bu malzemeler kullanılmadan önce deneylerle kullanılabilirliklerinin test edilmesine ihtiyaç vardır.

Çeşitli kömür yanığı ürünleri, dökümhane kum atıkları, cam kırıkları, işlem görmüş beton yıkıntıları KDDM karışımlarında agrega yerine kullanılabilecek standart olmayan malzeme örnekleri arasında sayılabilir (Naik ve diğ, 1996, Naik ve Singh, 1997).

Kullanım esnasında genleşme reaksiyonları sonucunda şişen malzemelerin kullanımından kaçınılmalıdır. Ayrıca odun yongaları, odun külleri veya diğer organik malzemeler KDDM için uygun olmayabilir. Karbon içeriği %22'ye kadar olan uçucu küller KDDM karışımlarında başarıyla kullanılmaktadır (Ramme ve diğ, 1995).

Bütün durumlarda standart olmayan malzemenin karakteristik özellikleri belirlenmeli ve bu malzeme ile üretilmiş KDDM karışımlarının istenen özelliklere sahip olup olmadığı gerekli deneyler ile saptanmalıdır. Belirli durumlarda malzemenin veya KDDM karışımının çevresel düzenlemelere uygunluğunun önceden belirtilmesi gerekebilir.

2.2.8 Köpük katkıli kontrollü düşük dayanımlı hafif malzemeler

Bu bölümde bünyesinde belli oranlarda önceden şekillendirilmiş köpük bulunduran düşük birim ağırlığa sahip KDDM karışımları (hafif KDDM, H-KDDM) üzerinde durulmuştur. Önceden şekillendirilmiş köpük, köpük konsantrelerinden veya gaz oluşturan kimyasallardan meydana gelen hava gözeneklerinden oluşur. H-KDDM karışımlarında köpük kullanmak karışımın standart KDDM karışımlarına göre daha hafif olmasına olanak verir. Köpük, H-KDDM bileşimlerinde hamurun yanında sabit hava boşlukları veya gözenek yapıları elde etmek için kullanılır. H-KDDM karışımları hazır karışım santrallerinde veya özel olarak tasarlanmış şantiye santrallerinde hazırlanabilir. Köpük, H-KDDM karışımlarına hazır karışım tesislerinde karıştırma sırasında, çalışma alanındaki transmikserlere veya özel olarak tasarlanmış şantiye karıştırma tesislerinde harmanlama işlemleri esnasında direkt olarak mikserin içine katılabilir.

2.2.8.1 Uygulamalar

H-KDDM karışımları standart KDDM karışımlarının kullanımının uygun olduğu yerlerde alternatif olarak kullanılabilir. H-KDDM'ler genellikle birim hacim ağırlıklarına göre tasarlanırlar. Düşük birim hacim ağırlığına sahip karışımların elde edilebilmesi özellikle zayıf zemin koşulları ile karşılaşıldığında ve dolgunun ağırlığının minimize edilmesinin gerekli olduğu durumlarda avantajlıdır. H-KDDM yalıtım ve izolasyon dolgusu olarak da etkilidir. H-KDDM karışımlarına özgü hava boşluklu veya gözenekli yapı dolgu malzemesine termal yalıtım sağlar ve bazı şok emici özellikler kazandırabilir.

2.2.8.2 Malzemeler

Portland çimentosu çoğu H-KDDM karışımında kullanılan tipik bir bağlayıcıdır. Katkısız çimento hamurlu H-KDDM karışım esnasında hamura köpük eklemek suretiyle üretilebilir. Köpük ile sürüklenmiş hava H-KDDM karışımlarında başlıca yer kaplayan bileşendir. H-KDDM, uçucu kül, kum gibi mineral dolgular içerecek şekilde de tasarlanabilir. Karışımlarda standart olmayan bağlayıcılar veya mineral dolgu malzemeleri kullanılacaksa öncül deneylerin yapılması önerilmektedir.

Genellikle bütün köpükler köpük üretici olarak bilinen aletler ile üretilmektedir. Bu köpük üretim aletleri belirli bir köpük oluşturuvcu katkı ile kullanılmak üzere

yapılandırılabilirler. Özel köpük üretim tavsiyeleri için kullanılacak köpük üretici katkının imalatçısına danışılmalıdır.

Köpük oluşumunda kullanılan katkı maddesi, H-KDDM'nin karışım, yerleştirme ve sertleşme süreçlerinde oluşacak fiziksel ve kimyasal kuvvetlere karşı koyabilecek derecede istikrarlı hava gözenekleri oluşturma kapasitesine sahip kimyasal içerikte olmalıdır. Eğer karışımdaki hava boşluğu veya gözeneksel yapı stabil değilse malzemenin birim ağırlığı da üniform olmaz. Köpük katkılarıyla ilgili değerlendirmelerin prosedürleri ASTM C 796 ve ASTM C 869 standartlarında yer almaktadır.

2.2.8.3 Özellikler

H-KDDM'nin özellikleri genellikle yoğunluğa bağlıdır. Standart bileşenler kullanıldığında H-KDDM köpük imalatçısının belirttiği aralıklarda özelliklere sahip olur. Standart olmayan malzemeler kullanıldığında deneme üretimleri yapıp teorik tahminleri destekleyici deneyler gerçekleştirilmelidir.

H-KDDM'nin en belirgin özelliği kullanım birim hacim ağırlığıdır. Çizelge 2.2 kullanım birim hacim ağırlıklarını minimum basınç dayanım değerlerine göre uygun aralıklara bölmüştür. Sınıf VI ve VII özel uygulamalara göre daha küçük aralıklara da ayrılabilir.

Çizelge 2.2 : Hafif KDDM'lerin birim hacim ağırlıklarına göre genel dayanım özellikleri (ACI 229R).

Sınıf	Kullanım Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	Minimum Basınç Dayanımı (MPa)
I	290-380	0,1
II	380-480	0,3
III	480-580	0,6
IV	580-670	0,8
V	670-800	1,1
VI	800-1300	2,2
VII	1300-1900	3,4

2.2.8.4 Karışım oranları

H-KDDM karışım hesapları genellikle amaçlanan kuru birim hacim ağırlığının ve minimum basınç dayanımının belirlenmesi ile başlar. Bu parametrelerle karışım bileşenleri rasyonel bir temel üzerine tasarlanır. Temel H-KDDM karışımları

bağlayıcı olarak çimento, su ve köpükten oluşur. Bu temel bileşenlere ek olarak puzolan veya yoğunlaştırıcı malzeme olarak uçucu kül kullanılabilir. 800 kg/m³'üstünde birim ağırlıklar elde etmek için kum agregalar da kullanılabilir. Ortaya çıkacak malzemenin sahip olması istenen fiziksel özelliklere (yoğunluk, basınç dayanımı vs.) göre karışım oranlarının ayarlanmasından genellikle köpük konsantresinin imalatçısı sorumludur.

2.2.8.5 Yapım

Harmanlama

H-KDDM karışımlarının karıştırılma işlemi gerekli suyun tartılıp mekanik mikserle konması ile başlar. Portland çimentosu, uçucu kül veya agrega mikserle konulmadan önce ayrı ayrı tartılır. Bileşenler üniform bir kıvama geldiğinde gerekli miktarda köpük eklenir. Karışıma eklenecek köpük miktarı kalibrasyonu yapılmış olan enjeksiyon püskürtme ağzının yardımı ile veya hacmi bilinen bir kabın doldurulup tartılması suretiyle belirlenebilir. Köpük üreticinin ve karıştırma aparatının hassaslığı en son ortaya çıkacak olan karışımın birim ağırlığı ve tekrar üretilebilirliği açısından kritiktir.

Karıştırma

Köpük eklenmeden önce tüm bileşenler üniform karışım elde edinceye kadar karıştırılmalıdır. Karışım bileşenlerinin düzgün bir şekilde kombine etmek için yeterli karıştırma işlemi ve hızı uygulanmalıdır. Sade veya uçucu kül içeren çimento hamurlarının karışımı için güçlü karıştırma yetisine sahip yüksek hızlı pedallı mikserler tercih edilir. Kamyon mikserler H-KDDM karışımını kolayca karıştırıp köpük eklenmeye müsait kıvama getirebilirler. Sade çimento veya çimento-uçucu kül hamur karışımları hazırlanırken kamyon mikserler kullanılacaksa daha uzun karıştırma zamanları gerekli olabilir. Hacimsel karışım gibi diğer karışım süreçleri de uygulanabilir. Karıştırma prosedürleri ile ilgili özel önerilerden ve kabul edilebilir karıştırma ekipmanlarından köpük katkısının üreticisi sorumludur.

Yerleştirme

H-KDDM boşaltma kanalları, kovalar, kepçeler veya pompalar ile yerleştirilebilir. Yerleştirme metodu hava içeriğinin kaybolmasına neden olarak birim ağırlık değişimlerine sebebiyet vermemelidir. Genellikle sahada üretilmiş H-KDDM'ler kullanım yerine kadar pompalar ile iletilir. Titreşimsiz sabit bir akım sağlayan ve

mikser ile döküm yeri arasında hava hacmi kayıplarını minimuma indiren, kavite ilerlemeli pompalar kullanılabilir. Bu metotla H-KDDM 300 m'ye kadar pompalanabilir.

2.2.9 Malzemelerin Karışım Oranları

KDDM'nin oranlama işlemi büyük ölçüde, uygun özelliklere ulaşılan kadar deneme yanılma yöntemi ile gerçekleştirilir. Çoğu şartnamede bileşenlerin oranları gereklidir. Bazı şartnameler performans özelliklerine atıfta bulunur ve oranlama işlemini üreticiye bırakır (Fox, 1989).

Oranın belirli olmadığı durumlarda deneme karışımının dayanım, akıcılık ve yoğunluk hedeflerini ne oranda karşıladığına bakılır. Daha sonra, arzu edilen özelliklere ulaşmak için ayarlamalar yapılabilir.

KDDM üretiminde kullanılan malzemelere ilişkin şöyle bir özetleme yapılabilir:

Çimento: Çimento içeriği; istenen dayanım ve sertleşme süresine göre 30 ile 120 kg/m³ arasında değişebilir. Diğer bileşenler sabitken çimento dozajını arttırmak normal olarak dayanımı yükseltip sertleşme süresini düşürecektir.

Uçucu Kül: F sınıfı uçucu kül içeriği 0 ile 1200 kg/m³ (uçucu külün filler olarak kullanıldığı durumlar) arasında değişebilir. C sınıfı uçucu küller ise 210 kg/m³'e kadar kullanılmaktadır. Uçucu kül miktarı malzemenin kolay elde edilebilirliği ve projedeki gerekli akıcılık özellikleri göz önüne alınarak belirlenmelidir.

Gölet Külü/Havza Külü: Külün inceliğine bağlı olarak 300 ile 500 kg/m³ arasında kullanılır.

Agrega: Şartnamelerin çoğu ince malzeme kullanımını gerektirmektedir. İnce agreganın miktarı çimento, uçucu kül, su ve hava içeriği göz önüne alındıktan sonra doldurulması gereken hacme göre değişmektedir. Miktar, genel olarak 1500 ile 1800 kg/m³ arasında değişmektedir. Kaba agreganın genelde pek kullanılmasa da kullanıldığında da kaba agreganın içeriği yaklaşık ince agregaya kadardır.

Su: KDDM'de betondan daha fazla su kullanılır. Su, yüksek akışkanlık sağlar ve malzemelerin konsolidasyonunu sağlar. Agreganın içeren çoğu KDDM karışımlarında su içeriği 193 ile 344 kg/m³ arasında değişir. Sadece F sınıfı uçucu kül ve çimento kullanılmış karışımlarda akışkanlık sağlamak amacıyla su miktarı 590 kg/m³'e kadar çıkarılabilir. Su miktarı KDDM'de kullanılan malzemenin karakteristik özelliklerine

ve istenen akıcılık derecesine göre değişim gösterir. İnce malzeme oranı arttıkça su miktarı da artacaktır.

Katkılar: KDDM'nin birim ağırlığını düşürmek amacıyla hava sürükleyici katkıları kullanılabilir. KDDM'nin sertleşme sürecini arttırmak için priz hızlandırıcı katkıları kullanılabilir. Bu ürünler kullanılırken üreticinin kullanım tavsiyeleri izlenmelidir.

Diğer İlaveler: Zeolit, ağır mineraller ve kil gibi ilaveler tipik KDDM karışımlarına toplam karışımın %2'si ile %10'u arasında katılabilir. Diğer faktörler sabit tutularak uçucu kül veya çimento miktarı katılara göre ayarlanabilir (Rajendran ve Venkata, 1997; Langton ve Rajendran, 1995).

2.3 Özellikler

KDDM'nin özellikleri zemin ile beton arasındadır. KDDM beton üretiminde kullanılan malzemelerden üretilir ve beton döküm ekipmanları ile yerleştirilir. Buna karşın KDDM kullanım alanlarında zeminlerin karakteristik özelliklerini sergiler. KDDM'nin özellikleri karışımın bileşenlerinden ve bu bileşenlerin karışım içindeki oranlarından etkilenir. KDDM'yi etkileyen birçok faktör olduğundan birçok özellik için geniş aralıkta değerlerden söz edilebilir. Bu bölümde bu özellikler ele alınmıştır.

2.3.1 Plastik özellikler

2.3.1.1 Akıcılık

Akıcılık, KDDM'yi diğer malzemelerden ayıran özelliktir. Malzemenin kendiliğinden yerleşmesini sağlayıp boşlukların kolayca doldurulmasına olanak verir ve geleneksel yerleştirme ve sıkıştırma yöntemlerine gerek kalmadan malzemenin kendiliğinden sıkışmasına olanak sağlar. Bu özellik mekanik olarak yerleştirilip sıkıştırılan geleneksel dolgularla karşı KDDM'ye büyük avantaj sağlar. Plastik KDDM, plastik beton ve enjeksiyona benzer olduğundan akıcılık özelliğini en iyi şekilde beton ve enjeksiyon teknolojilerindeki terimlerle açıklanabilir.

Yüksek akıcılığa sahip KDDM kullanılırken üzerinde durulması gereken en önemli husus hidrostatik basınçtır. Akışkan basıncının problem olduğu durumlarda KDDM katmanlar halinde dökülebilir. Bu uygulamada ilk dökülen katmanın sertleşmesinin ardından sıradaki katmana geçilir. Çok katmanlı uygulamanın tercih edildiği örnekler

arasında sınırlı dayanıma sahip bölgeler ile KDDM içine enkapsüle edilmiş hareketli borular gösterilebilir.

Akıcılık gereksinimlere göre sertten akışkana kadar değişebilir. Akıcılık, ASTM D 6103 standardında önerilen 75 x 150 mm'lik bir açık uçlu silindir kullanılarak belirlenebileceği gibi standart beton slump konisi (ASTM C 143) veya akış konisi (ASTM C 939) kullanılarak da belirlenebilir.

ASTM D 6103 metodu kullanılarak segregasyon olmaksızın en az 200 mm'lik yayılma çapı sağlandığında iyi bir akıcılık elde edilmiş olur. Slump konisi ile elde edileb akıcılık değerleri ise şöyledir (Washington Agrega ve Beton Birliği, 1992):

- Düşük akıcılık: 150 mm'den az
- Normal akıcılık: 150 mm ile 200 mm arası
- Yüksek akıcılık: 200 mm'den daha fazla

6 mm'den küçük agregalar içeren akışkan karışımlarda akıcılık ASTM C 939 kullanılarak başarılı bir şekilde belirlenebilir.

2.3.1.2 Segregasyon

Yüksek akıcılık değerlerinde fazla su kullanımından dolayı karışımdaki bileşenlerde ayrışma gözlenebilir. Bu durum yüksek slump'lı betonların ayrışmasına benzetilebilir. Uygun karışım oranlarının kullanılması yüksek akıcılığa segregasyon olmaksızın ulaşılabilir. Segregasyona maruz kalmadan yüksek akıcılığa sahip KDDM üretmek için uygun kohezyonu elde etmek için yeterli düzeyde ince malzeme gereklidir. Siltli veya diğer kohezyonsuz ince malzemeler toplam agreganın %20'si oranında kullanılsa da genelde uçucu kül ince malzeme olarak kullanılır. Kil gibi plastik ince malzemeler rötre artması gibi istenmeyen sonuçlar doğurduğu için kullanılmaz. Akıcı karışımlarda su, çimento, kum ile birlikte 415 kg/m³ kadar F sınıfı uçucu kül kullanımı tatmin edici bir performans sağlar. Bazı bileşimler çakıl veya kum kullanılmadan tasarlanmıştır. Bu tür karışımlarda su ihtiyacı daha yüksek olsa da dikkate değer bir ayrışmaz olmaz.

2.3.1.3 Çökelme

Çökelme KDDM'nin oturmasıyla birlikte bünyesindeki suyu ve tutulmuş havayı bırakması ile meydana gelen hacim azalması ile ilgilidir. Akıcılık için gerekli

hidratasyon fazlası su genellikle ya çevredeki zemine geçer ya da terleme şeklinde yüzeyde birikir. Çökelmenin büyük kısmı yerleştirme süresince gerçekleşir ve çökelmenin derecesi bırakılan suya bağlıdır. Genellikle 10-20 mm/m değerlerinde çökelmeler bildirilmiştir (McLarenve Balsamo, 1986). Bu değerler genellikle yüksek su muhtevasına sahip karışımlarda elde edilmiştir. Daha az su muhtevasına sahip karışımlarda çökeltme çok daha az olup dayanım hesaplamaları için alınan silindir numunelerin boylarında silindirlerin doldurulmasından deney gününe kadar geçen süre içerisinde hiçbir değişim gözlemlenmemiştir.

2.3.1.4 Sertleşme süresi

Sertleşme süresi, KDDM'nin bir insanı taşıyabilecek yeterlilikte dayanım kazanarak plastik durumdan sertleşmiş duruma geçmesi için geçen yaklaşık süredir. Bu süreye terleme ile ortaya çıkan su miktarının etkisi büyüktür. Fazla olan bu su karışımı terk ettikten sonra katı daneler yakın temasa geçerek yeniden dizilirler ve karışım rijit bir hal alır. Sertleşme süresi geniş ölçüde KDDM içerisindeki çimentolaşmaya neden olan malzemenin cinsine ve miktarına bağlıdır.

Sertleşme süresine etki eden normal faktörler şöyle sıralanabilir:

- Çimento benzeri malzemenin tipi ve miktarı
- KDDM ile temas eden zeminin permeabilitesi ve doygunluk derecesi
- KDDM'nin nem oranı
- KDDM'nin malzeme oranları
- Karışım ve çevre sıcaklığı
- Nem
- Dolgu derinliği

Sertleşme süresi 1 saate kadar inebilir; ancak normal koşullarda genellikle 3 ile 5 saat kadardır. ASTM C 403'e göre gerçekleştirilen bir penetrasyon direnci testi KDDM'nin sertleşme süresini veya yaklaşık taşıma gücü kapasitesini belirlemek amacıyla kullanılabilir. Uygulamaya bağlı olarak uygun taşıma gücü kapasitesini sağlamak için normal olarak 500-1500 arası bir penetrasyon değeri gerekir (Ulusal Hazır Beton Birliği, 1989).

2.3.1.5 Pompalama

KDDM, konvansiyonel beton pompalama ekipmanı ile başarılı bir şekilde yerine ulaştırılabilir. Betonda olduğu gibi karışım oranları kritiktir. Basınç altında ayrışma olmaksızın malzemenin dağıtılabilmesi için boşluklar yeterli miktarda katı tane ile doldurulup yeterli kohezyon sağlanmalıdır. Malzemedeki boşlukların doldurulmasında yetersiz kalırsa pompa içerisinde ayrışma ve blokajlar oluşacaktır. Ayrıca pompa içerisinde devamlı bir akış elde etmek de önemlidir. Kesikli akımlar segregasyona neden olabileceği gibi kısıtlanmış akım ve tıkanmalar da ortaya çıkabilir.

Bir örnekte, yüksek ince içeriğine sahip yıkanmamış agregalar kullanılarak üretilmiş bir KDDM 127 mm'lik bir pompa sistemi ile 46 m³/s bir hızla pompalanmıştır (Rocky Mountain Construction, 1986). Başka bir uygulamada 51 mm gibi düşük bir slump değerine sahip KDDM karışımı ek bir konsolidasyon girişimine gerek kalmadan başarılı bir şekilde iletilmiştir (Fox, 1989).

Yüksek oranda sürüklenmiş hava içeriğine sahip KDDM'ler de pompa basınçlarının düşük tutulması şartıyla pompalanabilir. Yüksek pompalama basınçları hava içeriğinin kaybolmasına ve pompalanabilirliğin düşmesine neden olur.

Karışımındaki uygun boşluk yapısını sağlayan karışım oranları göz önüne alınarak pompalanabilirlik artırılabilir. Uçucu kül boşluk doldurmada bir mikroagrega görevi üstlenerek pompalanabilirliğe yardımcı olur. Bu amaçla karışıma çimento da eklenebilir. Çimento benzeri hangi malzeme eklenirse eklensin ileride kazı yapılması söz konusu ise maksimum dayanım limitine dikkat edilmelidir.

2.3.2 Kullanım özellikleri

2.3.2.1 Dayanım (Taşıma Gücü)

Serbest basınç mukavemeti KDDM'nin yük taşıma kabiliyetinin bir ölçütüdür. 0,3 ile 0,7 MPa (50-100 psi) arasındaki bir KDDM dayanımı, iyi sıkıştırılmış bir zeminin izin verilebilir taşıma gücüne eşittir.

Düşük seviyede dayanımlar elde etmek, daha sonra kazı işlemi gerektirecek projelerde temel hedeftir. Erken yaş dayanımları kabul edilebilir seviyede olan bazı KDDM karışımları ilerleyen zamanlarda dayanım kazanmaya devam ettiklerinden

ileriye dönük kazılar zor bir hal alabilir. Kazılabilirlik hakkında detaylı bilgi 2.3.2.7. kısımda verilmiştir.

2.3.2.2 Birim hacim ağırlığı

Normal bir KDDM karışımının kullanım alanındaki ıslak birim hacim ağırlığı 1840 ile 2320 kg/m³ (18,05-22,75 kN/m³) arasındadır. Bu değer çoğu sıkıştırılmış malzemenin birim hacim ağırlığından büyüktür. Sadece uçucu kül, çimento ve sudan oluşan bir KDDM'nin birim hacim ağırlığı 1440 ile 1600 kg/m³ arasında (14,13-15,70 kN/m³) olmalıdır (Naik ve diğ., 1990). Kuru birim hacim ağırlıkların su kaybından dolayı daha hafif olması beklenir. Hafif agrega kullanılarak ve hava sürüklenme teknikleriyle daha hafif birim hacim ağırlıklar elde edilebilir. Ayrıntılı bilgi 2.2.8. kısımda verilmiştir.

2.3.2.3 Oturma

Sıkıştırılmış dolgular kompaksiyon prosedürleri yerine getirilse bile oturma yapabilir. Buna karşın KDDM sertleşmesini tamamladıktan sonra oturmaz. Büyük bir KDDM dolgusu üzerinde yerleştirildikten aylar sonra alınan ölçümler herhangi bir ölçülebilir oturma veya rötrenin olmadığını göstermiştir (Flechsigt,1990). Seattle'daki bir projede 37 m derinliğe sahip bir shaftı doldurmak üzere 601 m³ malzeme kullanılmıştır. Yerleştirme işlemi 4 saat sürmüştür ve 3 mm toplam oturma meydana geldiği bildirilmiştir (Fox, 1989).

2.3.2.4 Isıl yalıtım/iletkenlik

Geleneksel KDDM karışımları iyi bir yalıtım malzemesi olarak bilinmezler. Hava sürüklenmiş geleneksel karışımlar birim hacim ağırlığını düşürüp yalıtım değerini yükseltir. Dip külü gibi hafif agregalar yoğunluğu azaltmak amacıyla kullanılabilir. Köpükler veya hücreli karışımlar düşük yoğunluğa sahip olup üst düzey yalıtım özellikleri gösterir (Bölüm 2.2.8).

Yer altındaki güç kabloları gibi yüksek termal iletimin istendiği yerlerde yüksek birim hacim ağırlık ve düşük porozite (katı daneler arasında maksimum yüzey teması) arzu edilir. Su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığın yükselmesiyle ısı iletkenlik de yükselir. Daha düşük öneme sahip diğer parametreler arasında mineral içeriği, dane şekli ve büyüklük dağılımı, granülometri karakteristikleri, organik içerik

ve özgül ağırlık gösterilebilir (Ramme ve diğ, 1995; Steinmanis, 1981; Parmar, 1992).

2.3.2.5 Permeabilite

Çoğu kazılabilir KDDM'nin permeabilitesi sıkıştırılmış dolgulara benzer. Tipik değerler 10^{-4} - 10^{-5} cm/s aralığındadır. Daha yüksek dayanımlı ve daha fazla ince malzeme içeriğine sahip KDDM karışımları 10^{-7} gibi düşük permeabilite değerlerine ulaşabilirler. Permeabilite, çimento benzeri malzemelerin azalıp agrega içeriği arttırıldığında artış gösterir (Smith, 1991). Bentonit kili ve diyatumlu zeminler gibi normalde permeabiliteyi düşürmek amaçlı kullanılan malzemeler diğer özelliklere de etki edebilir ve kullanılmadan önce test edilmelidir.

2.3.2.6 Rötire

Rötire ve rötire çatlakları KDDM'nin performansına etki etmez. Birçok rapor KDDM'nin dakikalık rötireler yaptığını bildirmiştir. Nihai lineer rötire %0,02 ile %0,05 arasındadır. (Naik ve diğ, 1990; Tansleyve Bernard, 1981; McLaren ve Balsamo, 1986).

2.3.2.7 Kazılabilirlik (Hafriyat)

KDDM'nin kazılabilme özelliği birçok projede önemli bir faktördür. Genel olarak 0,3 MPa ve daha düşük basınç dayanımına sahip KDDM'ler elle kazılabilir. 0,7 ile 1,4 MPa arasındaki dayanımlar için kepçe gibi mekanik ekipmanlar kullanılır (Şekil 2.1). Kazılabilirlik limitleri yaklaşık değerlere sahip olup belirli bir kesinlik yoktur. İri taneli agrega içeriği yüksek KDDM'ler düşük dayanıma sahip olsalar dahi el ile kazılmaları zordur. Dolgu agregası olarak ince kum veya tek başına uçucu kül kullanılan karışımlar 2,1 MPa'lık dayanımlara kadar kepçe ile kazılabilir (Krell, 1989).

Yeniden kazılabilme söz konusu olduğunda çimento ve türevi malzemelerin tipi ve karışımdaki oranı önem kazanır. Kabul edilebilir uzun vadeli performanslar 24 ile 59 kg/m³ arasındaki çimento içeriği ve 208 kg/m³ F sınıfı uçucu kül ile sağlanabilir. %10'dan fazla kireç (CaO) içeriğine sahip uçucu küller uzun vadede dayanım artışının istenmediği durumlarda arzu edilmez (Tansley ve Bernard, 1981).



Şekil 2.1 : KDDM'nin kepçe ile kazılması (ACI 229R).

KDDM'nin dayanımı tipik olarak 28 günlük deney sürecinin devamında da artmaya devam edeceği için fazla çimento kullanımının söz konusu olduğu karışımlarda ileriki dönemlerde kazılabilirlik açısından ileriye dönük deneylerin yapılması önerilir.

Basınç dayanımını düşük seviyelerde tutmak için düşük dozajda çimento kullanımının yanında hava sürüklemeye tekniği de kullanılabilir.

2.3.2.8 Kayma modülü

Birim kayma gerilmesinin birim kayma şekil değiştirmesine oranı olan kayma modülü değeri normal birim hacim ağırlıklı KDDM karışımlarında genellikle 160 ile 380 MPa arasında değişir (Larsen, 1988; Rajendranve Venkata, 1997; Langtonve Rajendran, 1995). Kayma modülü; KDDM'nin beklenen kayma dayanımını ve deformasyon özelliklerini belirlemede kullanılır.

2.3.2.9 Korozyon potansiyeli

KDDM içine gömülmüş metallerin korozyona uğrama potansiyelleri KDDM ile temas eden malzemenin cinsine göre belirlenmiş değişik metotlar ile ölçülebilir. Doğal zeminlerin oluklu metal menfez boruları üzerindeki korozyon potansiyellerinin karşılaştırılmasına benzer biçimde KDDM üzerinde elektriksel direnç deneyleri gerçekleştirilebilir. Deney numunesinin su muhtevası numunenin iletkenliği açısından önemli bir parametre olup numuneler beklenen uzun vadeli arazi su muhtevasında test edilmelidir.

Sünek Demir Boru Araştırma Birliği dolgu malzemelerinin korozyon potansiyelini ölçmek üzere bir yöntem geliştirmiştir. Değerlendirme prosedürü zemin direnci, pH, yükseltgenme-indirgenme potansiyeli, sülfatlar ve nem olmak üzere beş deneyden gelecek bilgi ve incelemeye göre temellendirilmiştir. Belirli bir numune için her parametre hesaplanır ve korozyona yaptığı katkı paralelinde puanlandırılır (Straud, Troy F., 1989; Hill ve Sommers, 1997).

Bu prosedürler bir zeminin sünek demir borulara karşı aşındırıcılığını belirlemede rehber olarak tasarlanmıştır ve sadece zemin analizlerinde ve değerlendirmelerinde uzman olan mühendisler ve teknisyenler tarafından kullanılmalıdır.

Galvanik korozyonun bir sebebi de çeşitli karışımlardaki dolguların potansiyellerindeki farklılıklardır. KDDM karışımının üniform olması benzer olmayan zemin dolgularının ve değişken su muhtevaları yüzünden oluşacak korozyon olasılığını düşürür.

2.3.2.10 Plastiklerle uyumluluk

Yüksek, orta ve düşük yoğunluklu polietilen malzemeler yer altı sistemlerinin korunması amacıyla veya su arkı olarak genellikle kullanılmaktadır. KDDM bu malzemeler ile uyumludur. Bütün dolgularda olduğu gibi gömülü hizmet hatlarının koruma kaplamalarının zarar görmemesi için gereken önem gösterilmelidir. KDDM'nin ince gradasyonu polietilen yüzeylerin çizilerek zarar görme durumunu en aza indirir (Ramme ve diğ, 1995).

3. CAM KÖPÜĞÜ MALZEMESİ

Cam köpüğü; cam veya cam benzeri malzeme eriyiklerine bir takım gazlar veya gaz oluşturuıcı maddeler eklenerek oluşturulmuş yüksek kabarcık içeriğine sahip camdır. Sonuç olarak ortaya çıkan gözenekli cam çok hafif olup yüksek basınç dayanımına ve boyutsal stabiliteye sahiptir. Bu özelliği cam köpüğünün özellikle termal ve akustik yapısal yalıtım malzemesi olarak kullanılmasını sağlar (Mineral Strategies Pty Ltd., 2005) .

Bu bölümün temel amacı cam köpüğü malzemesinin tarihi, yapım aşaması ve kullanım alanları ile bazı karakteristik özellikleri hakkında bilgi vererek bu çalışmaya konu olan KDDM karışımının ana ham maddelerinden biri olan cam köpüğü malzemesinin daha iyi tanınmasını sağlamaktır.

3.1 Cam Köpüğü İmalatı

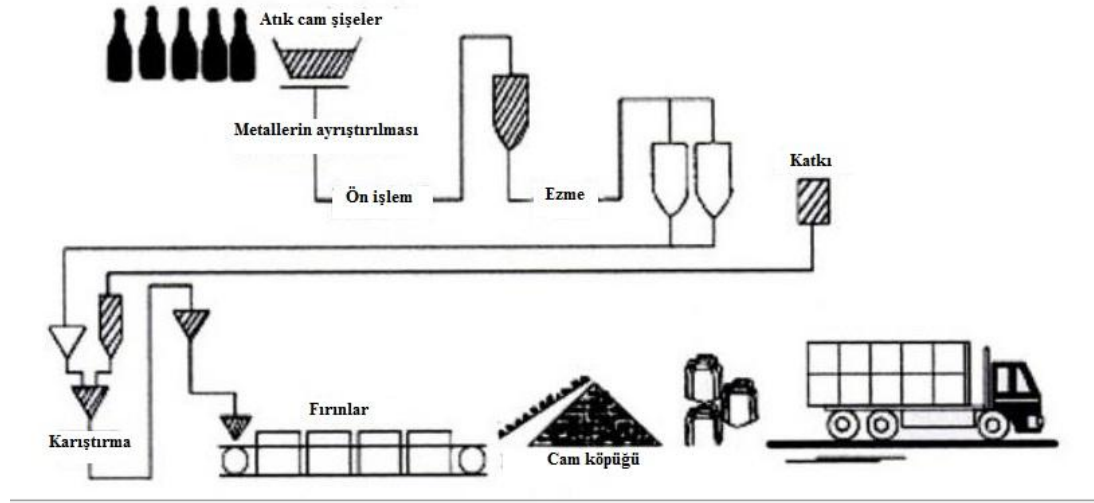
Cam köpüğü malzemesi 1930'lu yıllardan beri ticari olarak kullanımda olup ilk olarak işlenmemiş özel formüllü bir cam kullanılarak üretilmeye başlanmıştır. Günümüzde ham madde ihtiyacının %98'ini kullanılmış cam ürünlerden sağlayan üretim tesisleri de bulunmaktadır.

Cam köpüğü imalatının temeli cam içerisinde 700 – 900 °C sıcaklığında bir gaz meydana getirilip bu gazın genişletilmesiyle beraber genişleme sonucunda boşluklu hücreli bir yapı oluşturulmasına dayanır.

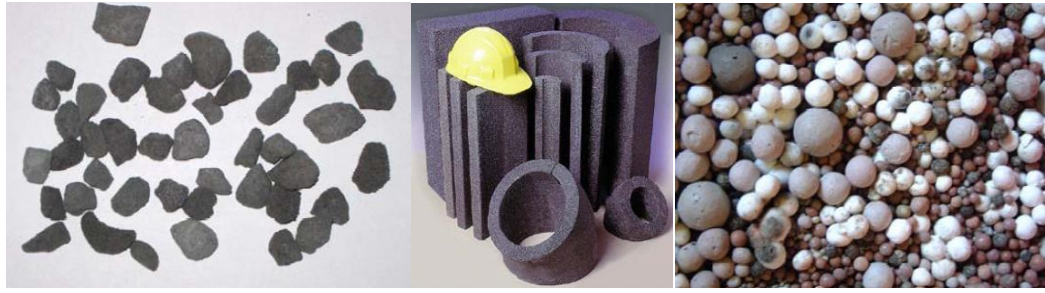
Cam köpüğü eritilmiş veya sinterlenmiş cam parçalarından imal edilebilir. Sonraki aşamada köpük yapıcı madde ile karıştırılan cam tozları ısıtılır. Isıtılan köpük yapıcı madde bir gaz açığa çıkarır ve bu gaz erimiş camı genişletir. Cam köpüğünün imalat süreci Şekil 3.1'de özetlenmiştir.

Cam köpüğünün üç ana çeşidi mevcuttur (Şekil 3.2). Bunlardan ilki gevşek cam köpüğü agregası olup devamlı levhalar halindeki cam köpüğü ürününün daha sonra istenilen büyüklükte gevşek agrega elde etmek üzere kırılması ile elde edilir. İkinci tipi kalıp yardımıyla üretilmiş devamlı ürünlerin meydana getirdiği bloklar oluşturur.

Peletleme işlemi ile üretilen ve daha sonra blok, panel, döşeme yapımında kullanılan küresel cam köpüğü pelletleri de üçüncü çeşittir (Hurley, 2003).



Şekil 3.1 : Cam köpüğünün imalat süreci (Onitsuka ve diğ, 2001)



(a)

(b)

(c)

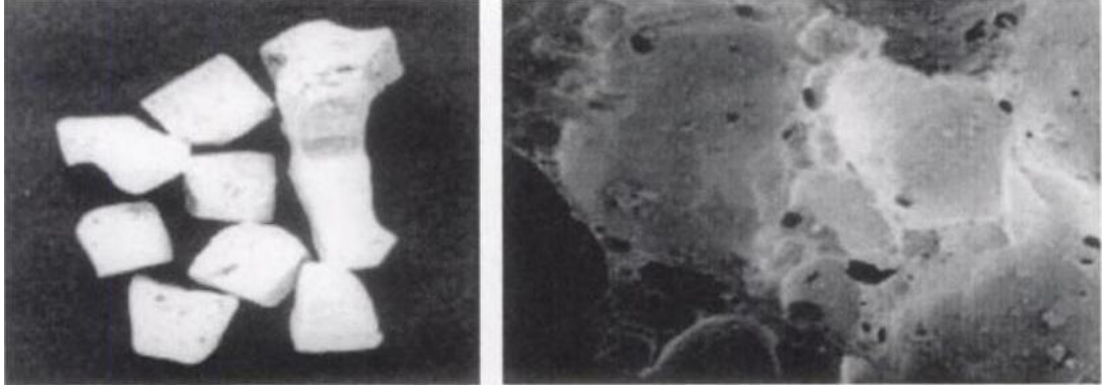
Şekil 3.2 : Cam köpüğünün üç ana çeşidi: (a) Gevşek cam köpüğü agregası. (b) Bloklar. (c) Peletleme (Hurley, 2003).

Cam köpüğü birçok mikro boşluğa sahip gözenekli bir malzeme olup malzemenin içerdiği boşlukların yapısı süresiz ve sürekli olmak üzere ikiye ayrılabilir. Şekil 3.3 ve 3.4'te aynı özgül ağırlıkta ($3,93 \text{ kN/m}^3$) iki farklı boşluk yapısına sahip cam köpüğü malzemesi görülmektedir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilmiş mikroyapı görüntüleri de bu şekillerde mevcuttur (Onitsuka ve diğ, 2001).

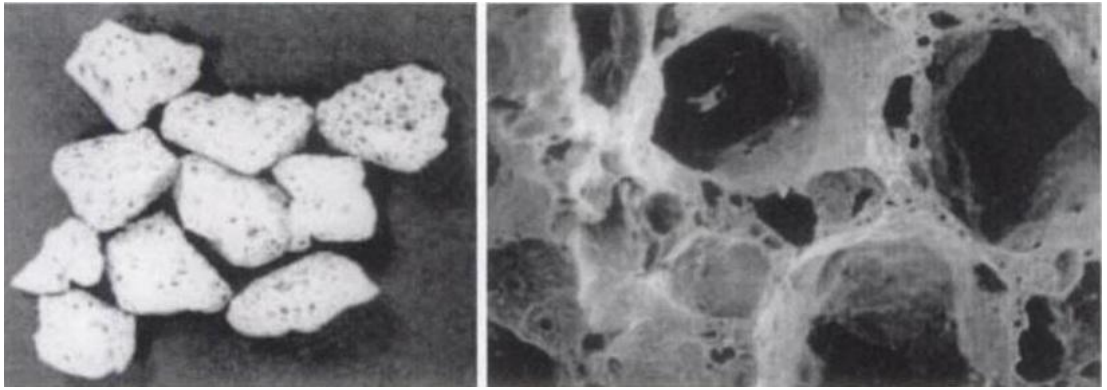
3.2 Cam Köpüğü Uygulamaları ve Avantajları

Cam köpüğü malzemesi yüksek dayanımlı hafif yalıtım malzemesi olarak Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'da yıllardan beri kullanılan bir malzemedir. Cam köpüğünün kullanımındaki temel neden mesken ve ticari olarak kullanılan yapılarda

yüksek enerji verimliliğini gerektiren standartların mevcut olmasıdır. İngiltere'nin Kyoto sözleşmesine göre karbon salımını düşürmekle yükümlü olduğu bilinmekte olup karbon salımında en büyük pay mesken ve ticari yapıların ısıtılmasındadır. Bu bakımdan m² başına düşen ısı kaybının azaltılması büyük önem taşır. İnşa edilen yeni binalarda cam köpüğü kullanımı enerji tüketimini büyük ölçüde düşürecek olup buna bağlı olarak da yeni binaların karbon emisyonları da düşecektir.



Şekil 3.3 : Süreksiz boşluklara sahip cam köpüğünün görünümü ve mikroyapısı (Onitsuka ve diğ, 2001).



Şekil 3.4 : Sürekli boşluklara sahip cam köpüğünün görünümü ve mikroyapısı (Onitsuka ve diğ, 2001).

Enerji korunumuna ek olarak cam köpüğü malzemesinin hafif doğasından dolayı ek avantajları da vardır. Bunlar arasında dizayn esnekliği, imalat üretkenliği, düşük taşıma ve işletme maliyetleri sayılabilir. Ayrıca cam köpüğü kemirgenlere ve yangına karşı dirençli olup nem tutmaz, toksin madde içermez ve ses emici özelliğe sahiptir.

Bir yapı malzemesi olarak cam köpüğü, yalıtıcı polimerik ve fiber malzemelerle yarışmaktadır. Cam köpüğü ayrıca üst düzey dayanım özelliklerine de sahiptir.

Polimerik malzemelerin yangın direnci cam köpüğüne göre daha düşük olup cam köpüğünün termal stabilitesi, yanmazlığı ve yüksek kimyasal dürabilitesi polimerik malzemelere göre üstünlük olarak gösterilebilir. Ayrıca liflerden oluşmaması nakliyat ve kullanıcı sağlığı açısından cam elyafına göre köpük malzemesini üstün kılar.

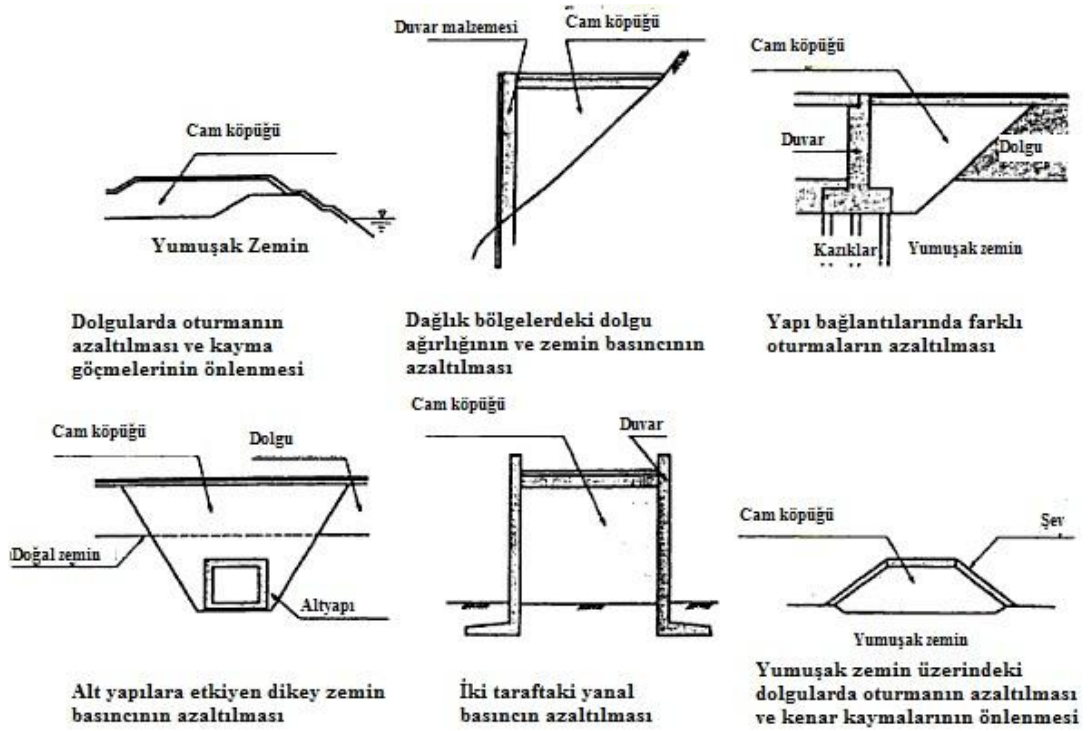
Cam köpüğünün arzu edilen özellikleri yüksek dayanım, düşük birim ağırlık ve düşük ısı iletkenliktir. Bu özellikleri malzemeye kazandıran ise aralarında ince duvarlar olan çok sayıdaki küçük, eşit büyüklükte hava kabarcığı içeriğidir. Malzeme camdan üretildiğinden doğal olarak çoğu ortamda inert olup biyolojik, ısı, kimyasal ve çevresel bozulmalardan etkilenmez (Hurley, 2003).

Cam köpüğü en çok rijit yalıtım malzemesi olarak kullanılmaya elverişlidir. Üst düzey yapısal özelliklerinden dolayı çatılarda, duvarlarda ve diğer yalıtım malzemelerinin ezilerek düzensiz yüzey oluşmasına neden olduğu döşemeler gibi trafik alanlarında da kullanılır. Düşük su emme ve buhar geçirgenlik özellikleri ıslakken dahi yalıtım özelliklerini korumasını sağlar. Sandviç paneller gibi birçok uygulamada endüstriyel yalıtım olarak görev almakla birlikte ekstrem çevre koşullarında kullanılabilir.

Cam köpüğünün aşağıda sıralanmış olan özellikleri bu malzemenin hafif dolgu malzemesi olarak kullanımını avantajlı kılar (Sato ve diğ, 2002).

- 1) Ham maddesi cam olduğundan dolayı cam köpüğü ısı ve kimyasallara karşı dayanıklıdır ve tahrip olmaz.
- 2) Cam köpüğü zararlı malzemelerin zemine nüfuzunu engellediğinden zemini ve yeraltı suyunu kirletmez.
- 3) Cam köpüğünün özgül ağırlığı ayarlanabildiği için gerekli zemin koşullarına göre belirli bir birim hacim ağırlığına sahip cam köpüğü seçilip kullanılabilir.
- 4) Yüksek geçirimsizliğe sahip bir malzeme olduğu için yağmur altından bile ağırlığı sabittir.
- 5) Cam köpüğünün şekli ve boyutları kırmataşa benzer olduğundan büyük ölçekli bir yapı makinası kullanılmaksızın araziye uygulanıp yerleştirilebilir.

Cam köpüğünün geoteknik uygulamalarda kullanımı Şekil 3.5'te ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Cam köpüğünün geoteknik uygulamalarda kullanımı
(Onitsuka ve diğ., 2001).

3.3 Cam Köpüğünün Geoteknik Mühendisliğindeki Uygulamalarına Örnekler

3.3.1 Değişik yoğunluktaki cam köpüğü malzemelerinin kompaksiyon özellikleri

Sato ve diğerleri tarafından 2002 yılında yapılan çalışmada özgül ağırlıkları 0,4 ile 1,2 arasında değişen beş farklı cam köpüğü numunesi kullanılmış olup bu numuneler üzerinde beş farklı kompaksiyon enerjisi ile yapılan laboratuvar deneyleri sonucunda numunelerin kuru birim hacim ağırlıklarının kompaksiyon enerjisi ile değişimi elde edilmiştir. Kuru birim hacim ağırlığı kompaksiyon enerjisinin artması ile artış göstermekte olup bu artış düşük özgül ağırlığa sahip numuneler için de geçerlidir. Bunun nedeni ezilme etkisi ile granülometride meydana gelen iyileşmedir.

Cam köpüğünün hafif dolgu malzemesi olarak kullanıldığı uygulamalarda sahadaki karakteristikleri ve uygulama metodunu saptamak amacıyla arazi deneyleri gerçekleştirilmiş, bu deneylerde dört farklı özgül ağırlığa sahip köpük malzemesi ve vibrasyon silindiri kullanılmıştır. Silindirin uygulama sıklığı arttırıldığında kuru birim hacim ağırlıklar da artmış, bulunan sonuçlar laboratuvar deneyleri ile elde edilen sonuçlarla uyumlu çıkmıştır.

Silindir ile kompaksiyon işleminin tamamlanmasının ardından çalışma alanının ortasında gerçekleştirilen plaka yükleme deneyi ile köpük malzemesinin özgül ağırlığı ile izin verilebilir taşıma kapasitesi arasındaki ilişki elde edilmiş, izin verilebilir taşıma kapasitesinin özgül ağırlık ile lineer bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir (Sato ve diğ, 2002).

3.3.2 Japonya, Higashimatsuura County'deki bir istinat dolgusu

Sato ve diğerleri tarafından incelenen bu çalışma, Japonya'da Saga vilayetinde Higashimatsuura County'de gerçekleştirilmiş bir yol genişletme çalışmasıdır. Bu çalışmada L tipi bir istinat duvarı inşa edilmiş ve bir kutu menfez gömülmüştür. Cam köpüğü malzemesi kullanılarak menfeze gelen jeolojik yükün azaltılması amaçlanmıştır. Kullanılacak malzemenin belirlenmesi amacıyla EPS ile cam köpüğü malzemeleri kıyaslanmıştır.

Yapılan çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Çalışma cam köpüğü ile yapıldığı takdirde gereken malzeme EPS ile yapılması durumunda kullanılacak malzemenin yaklaşık üçte ikisi kadardır.
- Cam köpüğü ve EPS kullanılması durumunda oluşacak toprak basınçları sırasıyla 108,0 kN/m² ve 97,6 kN/m²'dir. Cam köpüğü kullanılması durumunda EPS'ye göre 10 kN/m²'lik bir fazlalık söz konusudur. İki durumda da elde edilen taşıma kapasitesi proje için gereken izin verilebilir taşıma gücü kapasitesinden daha büyüktür.
- İki malzemenin işçilik özellikleri karşılaştırıldığında EPS bloklarının yerleştirilmesi ve bağlanması için insan gücünün gerekli olduğu, cam köpüğünün ise direkt olarak dolgu yapılacak alana dökülerek sıkıştırılmasının mümkün olduğu söylenebilir. Ayrıca EPS ısı ve bazı kimyasalların etkisi ile kolayca eriyebilir nitelikte olup bu malzemenin uygulama sonrasındaki süreçte zamanla atık malzeme haline gelerek işlevini yitirmesi kaçınılmazdır.

Bu değerlendirmeler sonucunda atık köpük cam malzemesi geri dolgu malzemesi olarak seçilmiştir. Cam köpüğü içeren torbalar bir kamyon aracılığı ile şantiye sahasına taşınmış, torbalardan araziye kalınlık yarım metre olacak şekilde boşaltılmıştır ve köpük katmanı silindir ile sıkıştırılmıştır. Bu işlemler istenen yükseklik sağlanıncaya kadar tekrarlanmıştır. CBR testleri ile uygulama kontrolü

yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar amaçlanan değerlerden yüksek elde edilmiştir. İyi işçiliğin sonucu olarak hem zamandan hem de maliyetten tasarruf edilmiştir (Sato ve diğ, 2002).

3.3.3 Japonya, Karatsu kentindeki göçmüş bir şevin restorasyon çalışması

Sato ve diğerleri tarafından incelenen bu çalışmanın konusu, Japonya'da Saga vilayetindeki Karatsu kentinde yağmur nedeniyle göçmüş bir şevin restorasyon çalışmasıdır. Bu bölgede şevin topuk kısmının zemini Higashimatsuura-graniti olup yüzeyi ise bazalt ile kaplıdır.

Çalışmaya konu olan mevki tepenin ortasında olup yüzey tabakası ayrılmış bazalt ve killi granit agregalarından oluşan ince bir birikintiden ibarettir. Göçmüş olan şev bir vadinin aşağı kısmında olup yeraltı suyu seviyesi yüksektir. Şev üzerinde bir de istinat duvarı bulunmaktadır. Bu istinat yapısının arka tarafı şevin göçmesinin ardından boşta kalmıştır. Şevin stabilize edilmesi ve restorasyonu amacıyla hafif dolgu malzemeleri kullanılarak bir dizayn yapılmış, stabilite analizleri Fellenius metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Güvenlik katsayısının 1,20'den büyük olması öngörülmüştür. Analizler sonucunda restorasyonda sıradan zemin malzemesi kullanıldığı takdirde güvenlik katsayısı 0,92; cam köpüğü kullanıldığında ise 1,24 olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak sıradan zemin kullanılması halinde şev ve istinat duvarı için gerekli stabilite sağlanmamış cam köpüğü ile yapılan tasarım ise iki durumda da güvenli sonuç vermiştir.

Bu sonuçlara dayanarak sıradan zemin malzemesine göre daha hafif ve daha mukavemetli olan cam köpüğü malzemesi şev restorasyon çalışmalarında kullanılmak üzere seçilmiştir. Ayrıca yeraltı suyunun yüksek geçirimliliğe sahip cam köpüğü malzemesi ile hızlı ve kolay bir şekilde drenajı sağlanmıştır. Dolgunun süreksiz boşluklara sahip cam köpüğü ile gerçekleştirilmesinin ardından beton bir karkas ve bitkilendirme işlemiyle şevin korunması sağlanmıştır (Sato ve diğ, 2002).

3.3.4 Norveç, National Road No 17 üzerindeki göçmüş bir şevin onarımı

Frydenlund ve Aabøe (2002) tarafından yapılan bu çalışmada Norveç, National Road 17 üzerinde nehir yatağı boyunca gerçekleşen erozyondan dolayı 10 metrelik bir şev kayması sonucu göçen bir şevin onarımı incelenmiştir.

Nehrin ve şevin zemini orta dayanımlı kilden oluşmaktadır. Yolun yeniden trafiğe açılması ve nehir kenarındaki erozyonun önlenerek ileride meydana gelebilecek kaymaların önlenmesi amacıyla onarım tedbirlerinin hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Erozyon koruması patlatılmış kayalar yardımıyla gerçekleştirildikten sonra şev bölgesi cam köpüğü malzemesi ile doldurulmuştur. Malzeme alana büyük kamyonlarla getirilmiş ve kayma bölgesinin kenarlarına yanaştırılarak boşaltılmıştır. Bir seferde 100 m³ kadar bir hacim taşınabilmektedir. Daha sonra cam köpüğü dağıtılarak yarım metrelik tabakalar halinde ekskavatöre bağlanmış 30 tonluk paletli araçlar yardımıyla yerleştirilmiş ve aracın 3- 4 seferlik geçişi ile 1,4'lük bir kompaksiyon oranı sıkıştırılmıştır. Bu şekilde toplam 300 m³ hacim 4 saatlik bir sürede doldurulmuştur.

Cam köpüğü dolgusu üzerine döşenen yolun bileşimi ve kalınlığı birleşim kısmındaki yola eşit olarak ayarlanmıştır. Kısıtlı yapım periyodundan ötürü kompaksiyon oranının hesaplanmasına yönelik çalışmalar dışında yoğunluk ile ilgili başka bir arazi deneyi gerçekleştirilmemiştir. Bu çalışma, cam köpüğü kullanıldığı takdirde çalışmaların kolay ve hızlı bir şekilde tamamlandığını ve böylece zamandan tasarruf sağlandığını göstermiştir. Ayrıca elde edilen stabilite de tatmin edici olmuştur. Çalışmada kullanılan cam köpüğünün maliyeti 1999 yılı itibarıyla 35 \$/m³'tür.

Şevin yeniden düzenlenmesinden iki yıl sonra yapılan incelemeler yolun hiçbir çatlak ve oturma gözlenmeksizin düzgün bir şekilde işlediğini göstermiştir. Tane boyutu dağılımının ve birim hacim ağırlığının saptanmasına yönelik ileriye dönük çalışmalar planlanmaktadır (Frydenlund ve Aabøe, 2002).

3.3.5 Norveç, Stryn, Lodalen'de yaya/bisiklet yolundaki bir şev dolgusu

Frydenlund ve Aabøe tarafından incelenen çalışmada Norveç, Lodalen'de bir bisiklet yolundaki bir şevin stabilite çalışmaları konu edilmiştir. Şev stabilitesinin sağlanması amacıyla yapılan çalışmada düşük yoğunluklu bir cam köpüğü malzemesi kullanılmıştır ($\rho=180 \text{ kg/m}^3$). Şev üzerine ek olarak başka bir yük etki etmeyeceğinden doğal zeminin bir kısmının cam köpüğü ile değiştirilmesine karar verilmiştir ve toplam 1200 m³ hacminde cam köpüğü kullanılmıştır.

Cam köpüğü 2 metrelik bir kalınlığa kadar serilmiş ve üst seviye ekskavatör ile düzeltilmiştir. Kompaksiyon paletli araçlar ile sağlanmış, şev üzerinde ekskavatör

kepçesi ile hafif kompaksiyon gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırılmamış cam köpüğünün doğal şev açısı 45° gözükmeaktadır.

Malzemedeki deformasyonların gözlemlenebilmesi için cam köpüğü tabakasının iki kesitinde alt ve üst kısma oturma tüpleri yerleştirilmiştir. Böylece cam köpüğünün deformasyonu tüplerdeki oturma farklarından hesaplanmıştır. Yol temel malzemesinin yerleştirilmesinin ardından cam köpüğü tabakası 12 cm'lik bir deformasyon yapmıştır. Deformasyonların cam köpüğü tabakası yüklenir yüklenmez ani bir şekilde gerçekleşmiş olması önemlidir.

Dolguda kullanılan cam köpüğünün dizayn birim hacim ağırlığı su muhtevastaki değişim, kompaksiyon faktörü ve malzemedeki yerel değişimler dikkate alınarak 300 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Yapı aşamasından sonra arazide açık alanda ve köprü geçidi altında olmak üzere iki farklı yerden numuneler alınarak birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Açık alandaki ve köprü geçidi altındaki birim hacim ağırlıkları sırasıyla 384 kg/m³ (w = %15,2) ve 294 kg/m³ (w = %2,8) olarak ölçülmüştür. Deneyler malzemenin su muhtevastının beklenenden daha fazla olduğunu göstermiştir. Ayrıca malzeme öngörülenden daha fazla sıkıştırılmış olup buna bağlı olarak ölçülen birim hacim ağırlık dizayn birim hacim ağırlığından daha yüksek çıkmıştır.

Çalışma alanı deformasyon, su muhtevası ve birim hacim ağırlıklarda zaman içinde meydana gelecek değişimleri gözlemlemek amacıyla daha fazla deneyle takip edilmeye devam edilmektedir (Frydenlund ve Aabøe, 2002).

3.3.6 Norveç, National highway No 120 üzerindeki bir dolgu çalışması

Frydenlund ve Aabøe tarafından incelenen çalışmada Oslo'nun 50 km kuzeyinde hassas kilden oluşan bir zemin üzerinde cam köpüğü kullanılarak gerçekleştirilen bir yol dolgusu incelenmiştir. Dolgu yüksekliği 4 m olup kayda değer bir oturma beklenmemektedir. Stabilité ile ilgili kaygılardan dolayı hafif dolgu malzemeleri seçilmiştir.

Uygulamada toplam 3950 m³ 180 kg/m³ birim hacim ağırlıklı cam köpüğü malzemesi kullanılmıştır. Malzeme 1 metrelik tabakalar halinde serilip sıkıştırılmış, sıkıştırma işlemi paletli araçlarla gerçekleştirilmiştir.

Malzemedeki deformasyonların gözlemlenebilmesi için cam köpüğü tabakasının iki kesitinde alt ve üst kısma oturma tüpleri yerleştirilmiştir. Birim hacim ağırlıklarının ve su muhtevasının elde edilebilmesi için biri nakliye araçlarının geçtiği, trafikten oldukça fazla etkilenen, diğeri ise daha az trafik etkisi altında kalan, dolgunun kenar tarafından olmak üzere sahanın iki bölgesinden numuneler alınmıştır. Birim ağırlıklar sırasıyla 653 kg/m^3 ($w = \%17,3$) ve 429 kg/m^3 ($w = \%17,0$) olarak elde edilmiştir. Su muhtevaları beklenenden daha yüksek gözlemlenmiş olup birim hacim ağırlıkları da beklenenden oldukça yüksek ölçülmüştür.

Görsel denetimin gerçekleştirilmesi amacıyla gözlem kuyuları açılmış, trafiğin yoğun olduğu bölgelerde 700 mm derinliğe kadar malzemedeki önemli ufalanmalara rastlanmıştır. Trafiğin daha az olduğu dış bölgelerde daha düşük seviyede ufalanmalar gözlemlenmiştir.

Çalışma alanı deformasyon, su muhtevası ve birim hacim ağırlıklarda zaman içinde meydana gelecek değişimleri gözlemlmek amacıyla daha fazla deneyle takip edilmeye devam edilmektedir (Frydenlund ve Aabøe, 2002).

4. CAM KÖPÜĞÜ KULLANILARAK ÜRETİLEN KONTROLLÜ DÜŞÜK DAYANIMLI HAFİF DOLGU MALZEMESİNİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde cam köpüğü, çimento ve kum kullanılarak üretilen kontrollü düşük dayanımlı hafif dolgu malzemesinin mühendislik özelliklerinin belirlenmesine yönelik yapılan deneysel çalışmalara ve bu çalışmalardan elde edilen verilere yer verilmiştir.

Karışımında kullanılan malzemelerin genel mühendislik özelliklerini belirlemeye yönelik bazı temel deneylerin yapılmasının ardından kompozit malzemeye ait deneyler üç ana aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada cam köpüğü granülometrisinin oluşturulan kompozit malzemenin yoğunluğu ve serbest basıncı üzerindeki etkisi araştırılmış kaba malzeme kullanılarak üretilen karışımların daha hafif olduğu gözlemlenmiştir. İkinci aşamada çimento – cam köpüğü karışımlarına belirli oranlarda kum eklenmiş ve kum miktarının birim ağırlığa ve serbest basınç dayanımına olan etkisi gözlemlenmiştir. Aynı deneyler farklı çimento oranları ile tekrarlanarak ağırlıkça çimento/cam köpüğü oranının etkisi de belirlenmiştir. Son olarak bir önceki aşamadaki deney sonuçları ışığında belirli bir karışım seçilip buna göre üretilen numuneler üzerinde birim hacim ağırlık, serbest basınç, permeabilite ve CBR deneyleri yapılarak cam köpüğü kullanılarak üretilmiş kontrollü düşük dayanımlı hafif malzemenin bazı mühendislik özellikleri belirlenmiştir.

4.1 Karışımında Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Karışımlarda çimento (CEM I PÇ 42,5 R), cam köpüğü ve kum kullanılmıştır.

4.1.1 Çimento

Karışımlarda bağlayıcı malzeme olarak çabuk dayanım kazanan CEM I PÇ 42,5 R portland çimentosu kullanılmıştır. Piknometre ile yapılan üç ölçümün sonucu çimentonun özgül ağırlığı $3,14 \text{ gr/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Kullanılan çimentonun

üretici firma tarafından belirlenen fiziksel, dayanım ve kimyasal özellikleri sırasıyla Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Kullanılan portland çimentosunun fiziksel özellikleri.

Özellik	Standartlar	Analiz Sonuçları
Özgül Ağırlık (kN/m ³)		30,80
Priz Başlama Süresi (dak.)	≥ 60	129
Priz Bitiş Süresi (dak.)		191
Hacim Genleşmesi (Le Chatelier) (mm)	≤ 10	1
Özgül Yüzey - Blaine (cm ² /gr)		3942

Çizelge 4.2 : Kullanılan portland çimentosunun dayanım özellikleri.

Numune Boyutları (mm)	40x40x160	
Karışım	1 kısım çimento, 3 kısım CEN ref. kumu, 0,50 su/çimento	
Basınç Dayanımı (MPa)	Standartlar	Deney Sonuçları
2 günlük Erken Dayanım	≥ 20 MPa	29,6 MPa
7 Günlük Erken Dayanım	-	45,8 MPa
28 Günlük Standart Dayanım	≥ 42,5 MPa ≤ 62,5 MPa	56,4 MPa

4.1.2 Kum

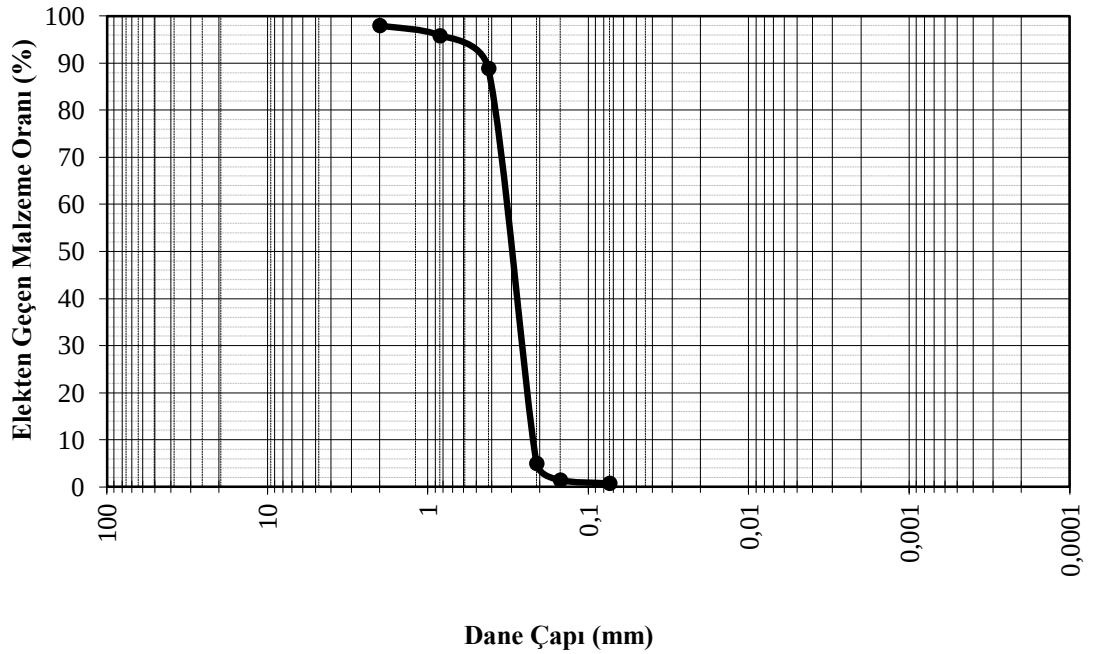
Karışımlarda kullanılan kum Akpınar kumudur. İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilen binoküler mikroskop analiz sonuçlarına göre kum daneleri temiz olup yarı köşeli yarı küresel bir yüzeye sahiptir. Kumun bileşimi büyük oranda kuvarstan oluşmakta olup az miktarda da manyetit içermektedir.

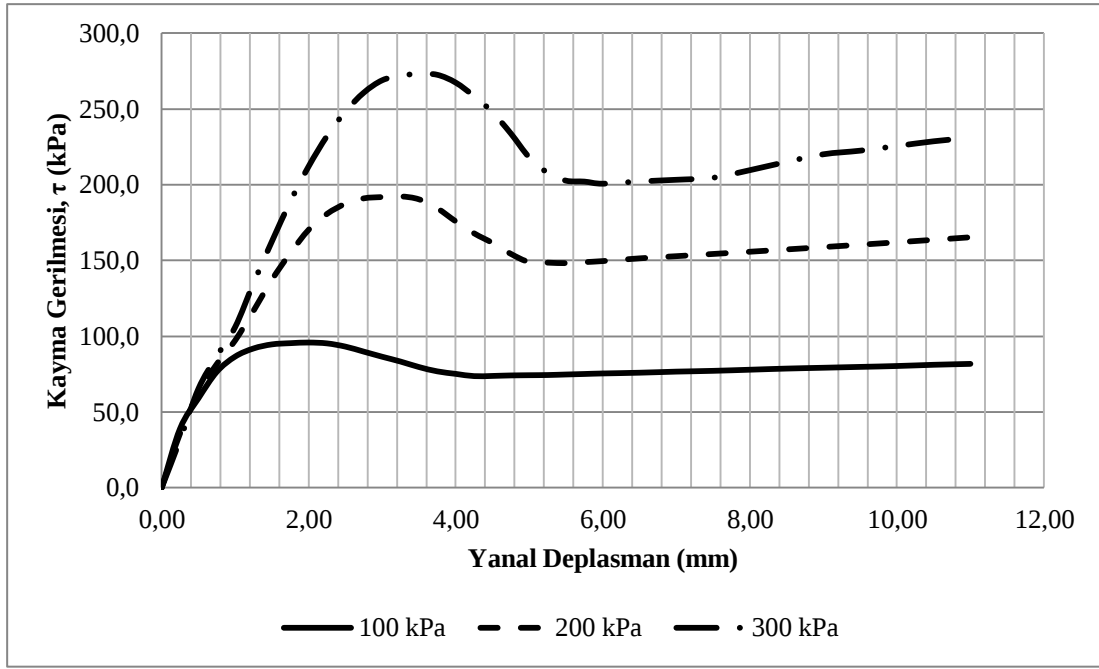
Kullanılacak kum ilk olarak ASTM #200 eleğinden yikanıp ASTM #10 eleğinden elenmiştir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre kötü derecelenmiş kum (SP) olarak belirlenen malzemenin elek analizi Şekil 4.1'de verilmiştir.

Akpınar kumu üzerinde malzemenin geoteknik özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizine ek olarak özgül ağırlık, rölatif sıkılık, permeabilite ve kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kesme kutusu deneyleri sonucunda elde edilen kayma gerilmesi-yanal deplasman ilişkisi Şekil 4.2'de, normal gerilme ile kayma dayanımının değişimi ise Şekil 4.3'te verilmiştir. Akpınar kumunun geoteknik özellikleri Çizelge 4.4'te özetlenmiştir.

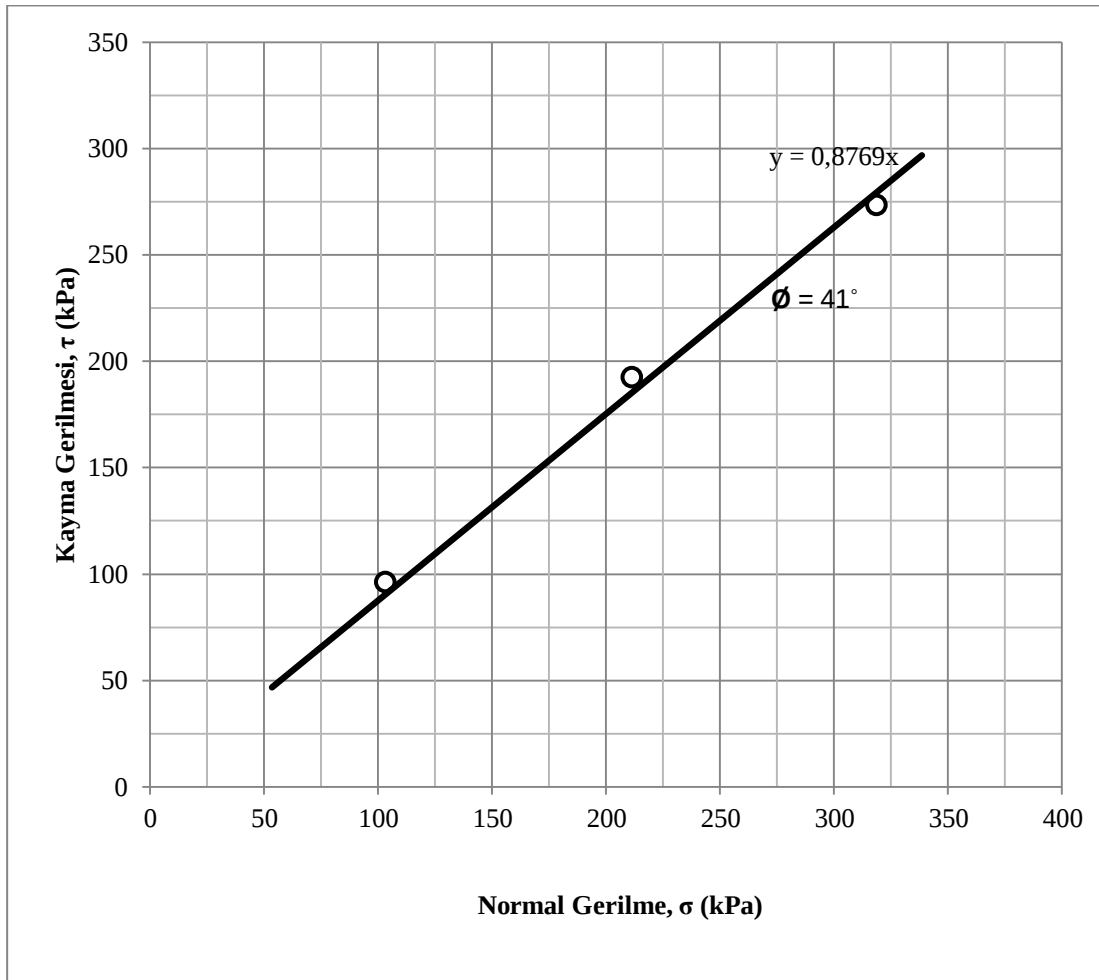
Çizelge 4.3 : Kullanılan portland çimentosunun kimyasal özellikleri.

	Standartlar	Analiz Sonuçları
SiO ₂ , Çözünen (%)		20,12
Çözünmez Kalıntı (%)	≤ 5,0	0,92
Al ₂ O ₃ (%)		4,92
Fe ₂ O ₃ (%)		3,57
CaO (%)		63,48
MgO (%)		1,23
SO ₃ (%)	≤ 4,0	2,88
Kızdırma Kaybı (%)	≤ 5,0	1,72
Cl ⁻ (%)	≤ 0,10	0,0425
Na ₂ O/K ₂ O (%)		0,24/0,89
Tayin Edilemeyen (%)		0,91
Serbest CaO (%)		1,72
Mineralojik Bileşim		
C ₃ S		52,08
C ₂ S		18,48
C ₃ A		7
C ₄ AF		10,86





Şekil 4.2 : Akpınar kumunun %50 sıklıktaki kayma gerilmesi-yanal deplasman ilişkisi.



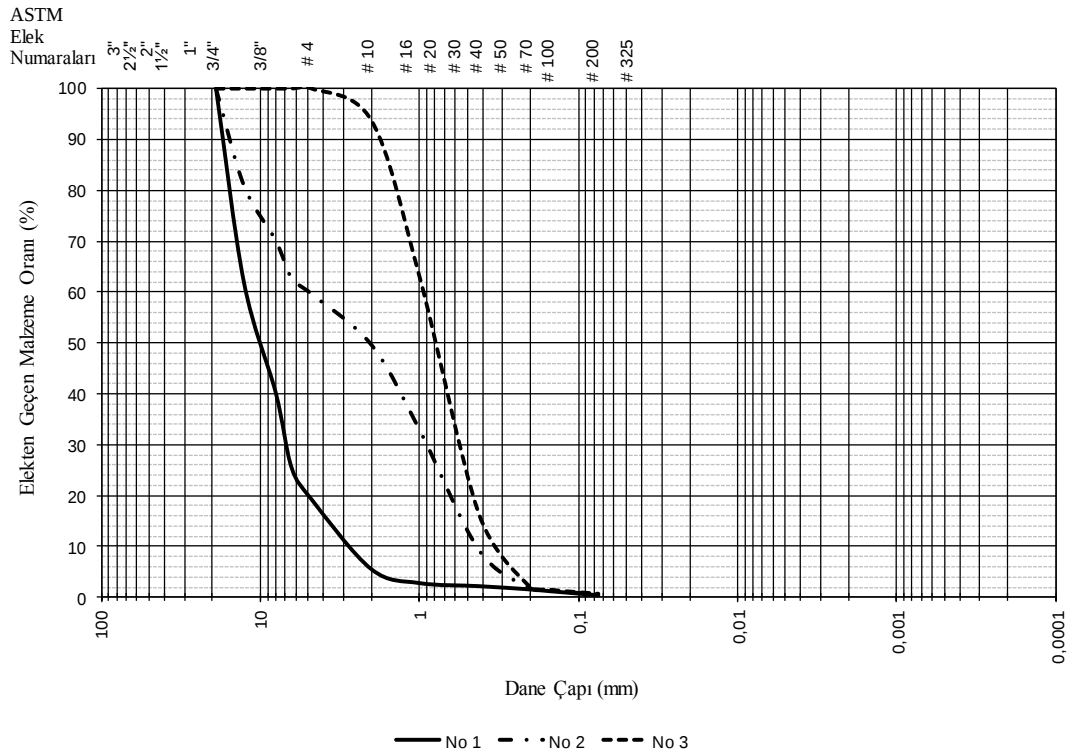
Şekil 4.3 : Akpınar kumuna ait normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi.

Çizelge 4.4 : Akpınar kumunun geoteknik özellikleri.

Özgöl Ağırlık (kN/m^3)	26,39
Maksimum Boşluk Oranı	0,85
Minimum Boşluk Oranı	0,54
Permeabilite Katsayısı (m/s)	4×10^{-4}
Efektif Dane Çapı, D_{10} (mm)	0,22
D_{60} (mm)	0,35
D_{30} (mm)	0,27
Uniformluk Katsayısı, C_u	1,60
Derecelenme Katsayısı, C_c	0,95
Kohezyon, c (kPa)	0
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (derece)	41

4.1.3 Cam köpüğü

Çalışma boyunca aynı cam köpüğü malzemesinin üç farklı granülometrik kombinasyonu kullanılmıştır. Kullanılan granülometriler kabadan inceye doğru numaralandırılmıştır. 1 numaralı granülometri en kaba gradasyonu, 3 ise en inceyi temsil etmektedir. 2 numaralı granülometri 1 ile 3 numaralı granülometrinin yarı yarıya kombine edilmesiyle oluşturulmuştur. Kullanılan granülometriler Şekil 4.4’de verilmiş olup cam köpüğü ile ilgili diğer malzeme özellikleri Çizelge 4.5’te özetlenmiştir.



Şekil 4.4 : Cam köpüğünün tane boyutu dağılımı.

Çizelge 4.5 : Cam köpüğüne ait teknik özellikler.

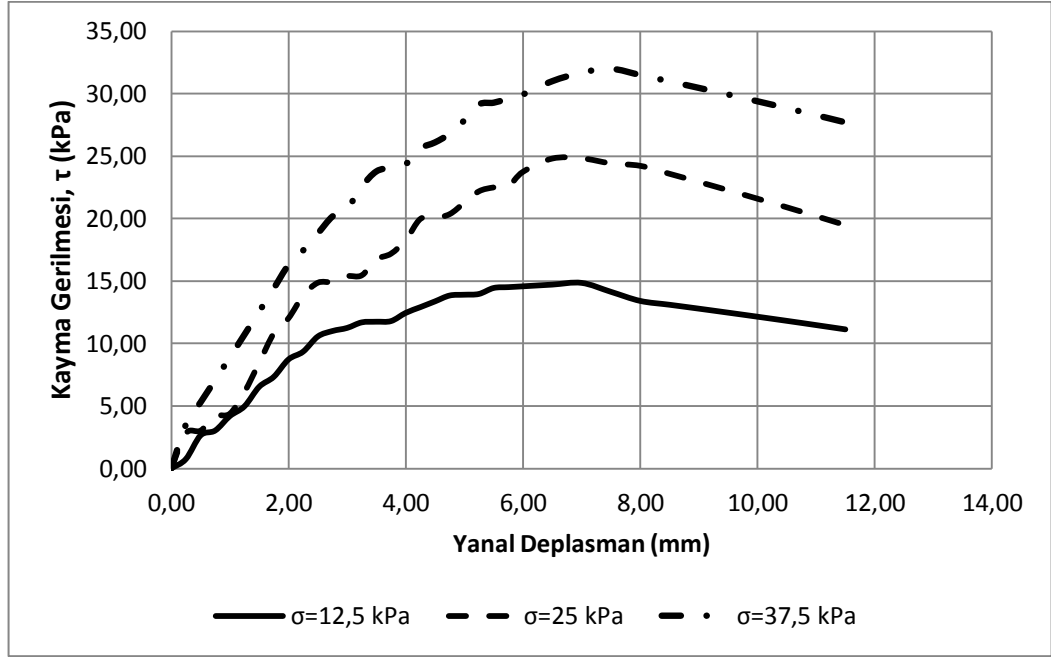
	Granülometri No		
	1	2	3
Yoğunluk (kN/m ³)	2,04	4,31	17,06
Efektif Dane Çapı, D ₁₀ (mm)	3	0,45	0,30
D ₆₀ (mm)	10,2	5,00	0,95
D ₃₀ (mm)	6,0	0,90	0,55
Uniformluk Katsayısı, C _u	3,40	11,11	3,17
Derecelenme Katsayısı, C _c	1,18	0,36	1,06
%10 Deformasyondaki basınç gerilmesi (kPa)		80	
Su buharı difüzyon direnç faktörü (μ)		100-160	
Isıl iletkenlik (W/mK)		0,042	

Cam köpüğü malzemesinin kayma dayanımı açısı (ϕ), kesme kutusu deneyleri ile belirlenmiştir. Kesme kutusu deneylerinde çalışmanın genelinde kullanılan 1 numaralı granülometriye uygun kuru cam köpüğü kullanılmıştır. Cam köpüğü malzemesi kesme kutusuna herhangi bir sıkıştırma müdahalesinde bulunmadan serbest olarak yerleştirilmiştir. Bu deneylerde düşey yük ilk deney için 12,5 kPa, ikinci deney için 25 kPa, üçüncü deney için ise 37,5 kPa olarak seçilmiştir. Düşey yüklerin düşük seçilmesinin nedeni cam köpüğünün zayıf bir malzeme olması ve standart yükler altında kayda değer bir oturma yapmasıdır. Deneylere malzeme ani oturmasını tamamladıktan sonra başlanmıştır. Kayma gerilmesi ile deplasman arasındaki ilişki Şekil 4.5'te verilmiştir. Normal gerilme ile kayma gerilmesi arasındaki ilişki ise Şekil 4.6'da görülmektedir. Yapılan deneyler sonucunda cam köpüğünün içsel sürtünme açısı 39° olarak elde edilmiştir (Şekil 4.6).

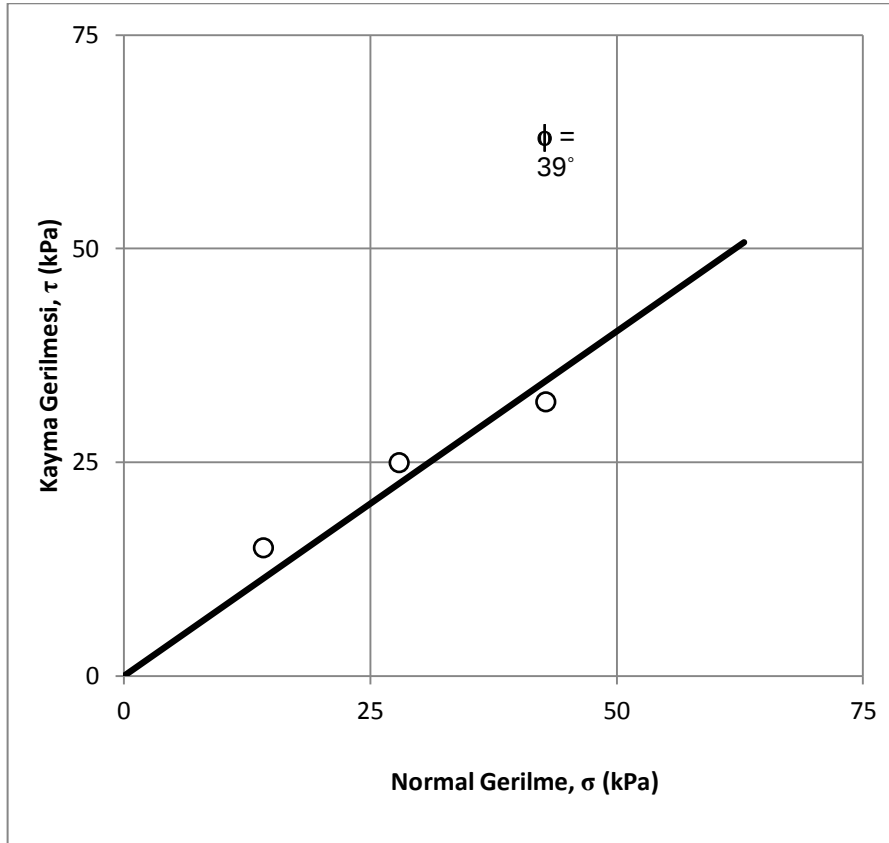
4.2 Karışımların Hazırlanması

Karışım dizaynları oluşturulurken uygun karışım oranlarının belirlenmesi amacıyla ilk önce deneme karışımları yapılarak üretilen karışımların birim hacim ağırlıklarına bakılmıştır. Bir zeminin üzerindeki bir yükü taşıyabilme kapasitesini ölçmede ortak bir kriter olan izin verilebilir taşıma gücü bağlamında 0,3 ila 0,7 MPa'lık bir dayanımın iyi sıkıştırılmış bir dolguya eşit olduğu göz önüne alınarak tasarlanan kompozit zemin dolgusunun bir haftalık dayanımının 0,7 MPa'ın üzerinde olması hedeflenmiş öte yandan gelecek zamanlarda kompozit zemin üzerinde gerçekleştirilecek olası bir kazı işlemi de hesaba katılarak 28 günlük dayanım

değerinin de 1,0 MPa'ı geçmemesi amaçlanmıştır. Karışımın birim hacim ağırlık değerinin literatürdeki çalışmalar incelenerek 9,81 kN/m³ mertebesinde olması uygun görülmüştür.



Şekil 4.5 : Kayma gerilmesi – yanal deplasman arasındaki ilişki.



Şekil 4.6 : Normal gerilme ile kayma gerilmesi arasındaki ilişki.

İlk olarak 1 m³ karışım için gerekli çimento dozajı belirlenerek hacimsel hesaplar yardımıyla tasarlanan cam köpüğü – çimento karışımlarının, cam köpüğü partiküllerinin üretim sırasında ufalanarak hacimsel değişikliğe uğramasından dolayı çimento ve cam köpüğü bileşenlerinin kütleli oranları göz önüne alınarak dizayn edilmesinin daha uygun olacağı belirlenmiştir. Buna göre bağlayıcı olarak kullanılan çimento ile boşluklu bir yapı elde etmek için kullanılan ve karışımdaki en yüksek hacim oranına sahip ana bileşen niteliğinde olan cam köpüğü malzemesi kütleli olarak değişik oranlarda karıştırılmış ve birim hacim ağırlığı bakımından istenen hafiflikte numuneler elde edilmeye çalışılmıştır.

Karışımın hazırlanmasında ilk olarak hem kendi eksenini hem de karıştırma kabı eksenini etrafında dönebilen paletlere sahip bir mikser kullanılmıştır. Ancak mikser paletinin cam köpüğü numunesine zarar vererek bu malzemenin karışım içindeki granülometrisini değiştirdiği gözlemlenmiştir. Parçalanmış cam köpüğü parçalarının karışım içinde kapladığı hacmin azalması birim hacimde mevcut çimento şerbetinin artmasıyla aynı anlamı taşıdığından bu durum karışımların hesaplanandan daha ağır olmasına neden olmuştur. Hacimsel değişiklikleri minimuma indirmek amacıyla malzemeler elle karıştırılmıştır. Büyük çaptaki mühendislik uygulamaları için kendi eksenini etrafında dönebilen paletsiz karıştırma mikserler kullanılabilir. Karışımlarda ilk olarak çimento ve su karıştırılmış, dizaynda bulunuyorsa kum eklenmiş, homojen bir karışım sağlandıktan sonra son olarak cam köpüğü karışıma eklenerek karıştırılmaya devam edilmiştir.

Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra karışım Şekil 4.7’de görülen 100 mm yüksekliğe ve 50 mm çap genişliğine sahip plastik silindirik boru kalıplara dökülerek numuneler deney gününe kadar kür havuzlarında bekletilmiştir. Numunelerin kalıp sökümünden sonraki toplu görünümü Şekil 4.8’de verilmiştir.

4.3 Değişik Cam Köpüğü Granülometreleri İle Yapılan Çalışmalar

Deneyisel çalışmanın bu kısmında farklı cam köpüğü granülometrelerinin karışımların birim ağırlık özelliklerine ve serbest basınç dayanımına etkileri incelenmiştir. Su/çimento ve çimento/köpük oranları sabit tutulup 3 farklı dane boyutu dağılımına sahip cam köpüğü malzemesi kullanılarak her değişik granülometri için üçer numune üretilip taze birim hacim ağırlıkları ve 7 günlük dayanımlar belirlenmiştir.



Şekil 4.7 : Numune kalıpları (Çap: 50 mm, Yükseklik: 100 mm).

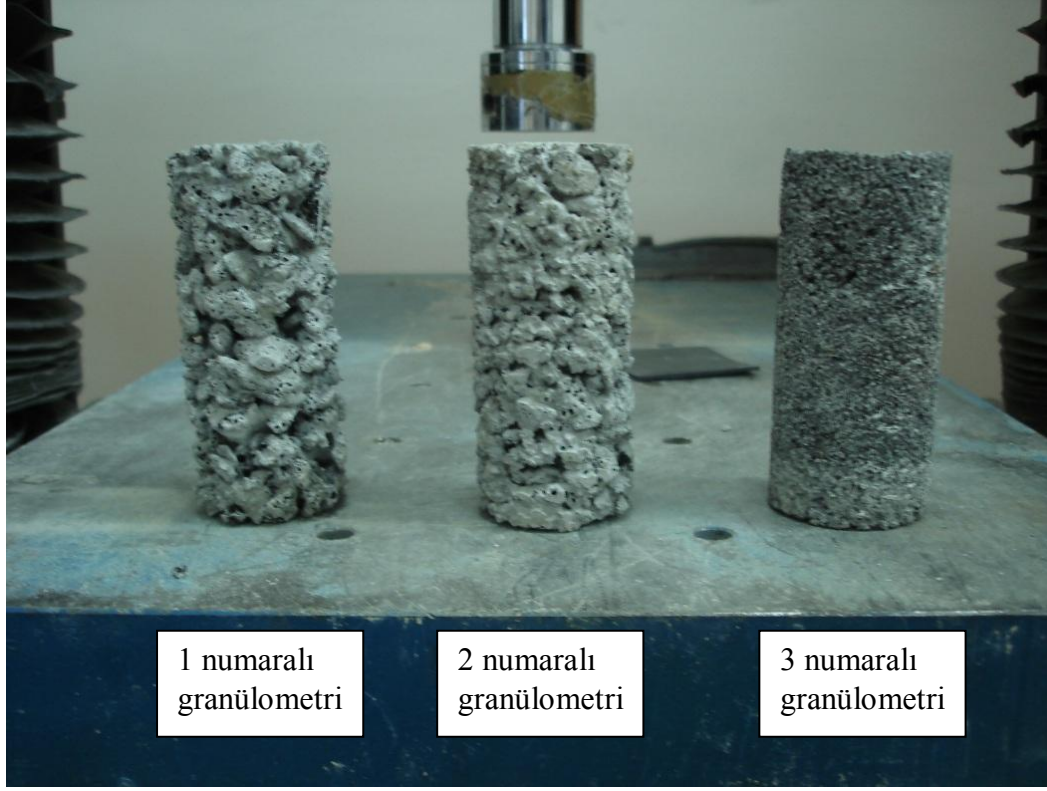


Şekil 4.8 : Kalıp sökümü sonrası numuneler.

4.3.1 Karışımlar

Karışımlarda özellikleri Çizelge 4.5, tane boyutu dağılımları Şekil 4.4'te verilen 1, 2 ve 3 numaralı cam köpüğü numuneleri kullanılmıştır (Şekil 4.9).

Karışımlarda su/çimento oranı ve çimento/köpük oranı sabit tutulup bu oranlar sırası ile 0,70 ve 3'tür.



Şekil 4.9 : Farklı cam köpüğü granülometrileri ile üretilmiş numuneler.

4.3.2 Karışımların birim hacim ağırlıkları

Üç farklı granülometrik bileşimde cam köpüğü kullanılarak üretilen karışımlarda suya doymun ve kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Karışımların birim ağırlıkları Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Farklı granülometrik bileşimli cam köpüğü kullanılarak üretilmiş KDDM karışımlarının birim ağırlıkları.

Kullanılan Granülometri Numarası	Numune Kodu	Doygun Birim Hacim Ağırlık - γ_d		γ_d (Ortalama)		Kuru Birim Hacim Ağırlık - γ_k		γ_k (Ortalama)	
		gr/cm ³	kN/m ³	gr/cm ³	kN/m ³	gr/cm ³	kN/m ³	gr/cm ³	kN/m ³
No 1	1-1	0,40	3,92	0,44	4,35	0,31	3,03	0,35	3,43
	1-2	0,47	4,65			0,38	3,74		
	1-3	0,46	4,48			0,36	3,52		
No 2	2-1	0,63	6,19	0,63	6,15	0,52	5,10	0,50	4,93
	2-2	0,60	5,88			0,48	4,67		
	2-3	0,65	6,36			0,51	5,02		
No 3	3-1	1,10	10,83	1,09	10,67	0,94	9,21	0,91	8,93
	3-2	1,07	10,50			0,90	8,84		
	3-3	1,09	10,68			0,89	8,73		

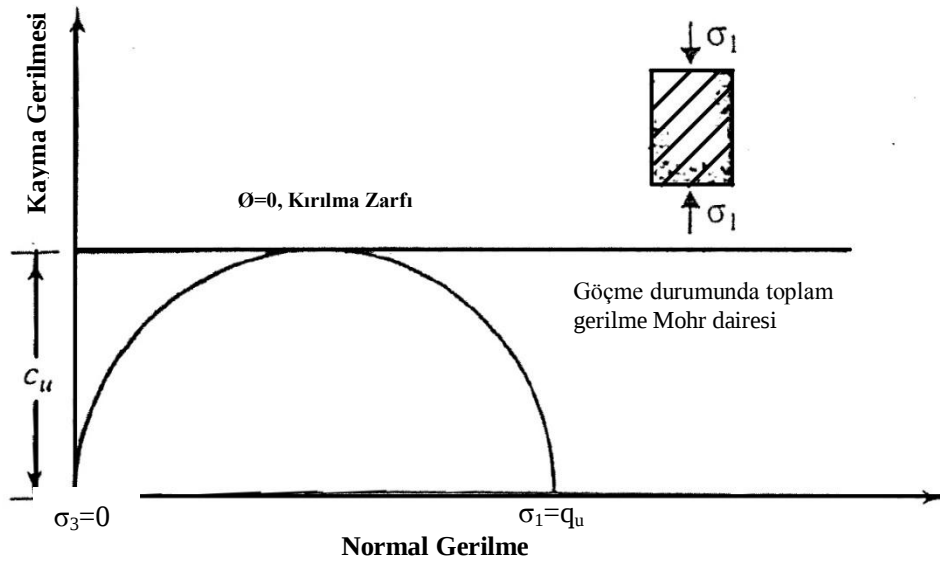
4.3.3 Karışımların serbest basınç dayanımları

Karışımların kayma dayanımı parametrelerini belirlemek için serbest basınç deneyleri yapılmıştır (Şekil 4.11). Serbest basınç deneyi, konsolidasyonsuz drenajsız

üç eksenli deneyin özel bir uygulaması olup bu uygulamada numuneye çevre basıncı uygulanmaz ($\sigma_3=0$). Bu şartlar altında deney başlangıcında numune içerisindeki boşluk suyu basıncı negatiftir, yani numune kapiler basınç altındadır. Numune üzerindeki eksenel yük göçme gerçekleşinceye kadar kademe kademe arttırılır (Şekil 4.10). Göçme durumunda toplam minör asal gerilme, σ_3 , sıfır; toplam majör asal gerilme ise σ_1 'dir (Denklem 4.1).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_f = \Delta\sigma_f = q_u \quad (4.1)$$

q_u = serbest basınç dayanımı



Şekil 4.10 : Serbest basınç dayanımı (Das, 2008).

Zemin tamamen suya doygun ve drenajsız olduğu sürece drenajsız kayma dayanımı çevre basıncından bağımsız olup serbest basınç dayanımının yarısına eşittir (Denklem 4.2).

$$\tau_f = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} = c_u \quad (4.2)$$

c_u = drenajsız kayma dayanımı

Karışımlar bir hafta kür havuzunda bekletildikten sonra 7 günlük basınç dayanımlarına bakılmıştır. Serbest basınç deneylerinde maksimum kapasitesi 100 kN olan Instron 5500 R kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney makinesi kullanılmıştır (Şekil 4.11). Numunelere yük, eksenel deformasyon 1,5 mm/dakika olacak şekilde uygulanmıştır. Karışımların 7 günlük serbest basınç deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.7'de görülmektedir.

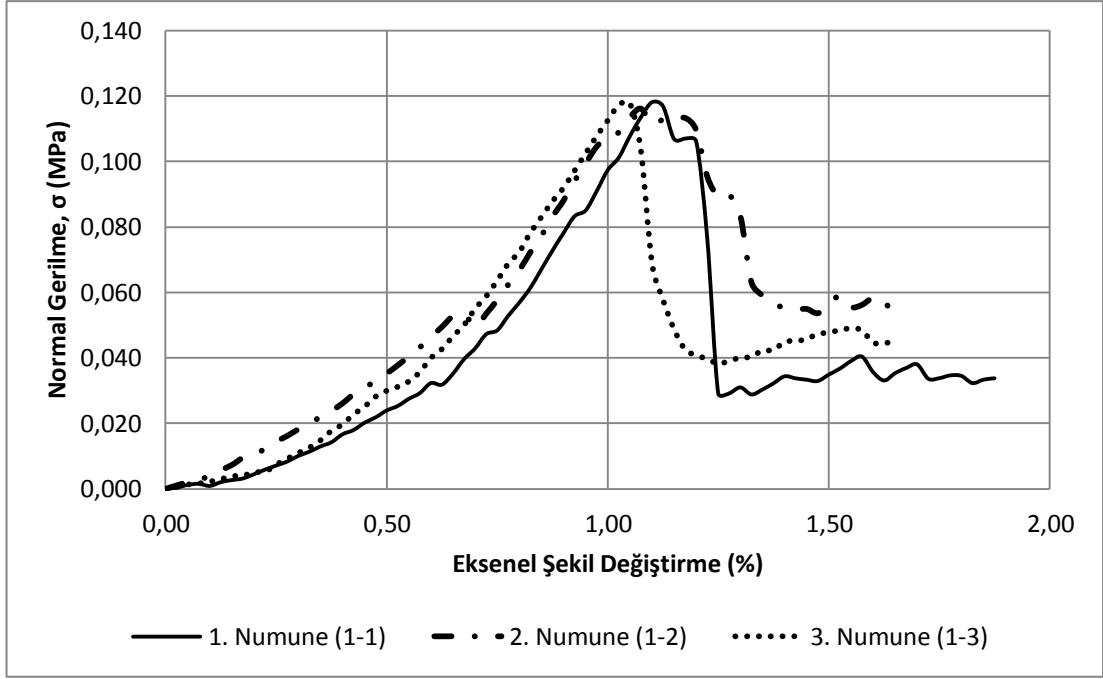


Şekil 4.11 : Serbest basınç deney düzeneği

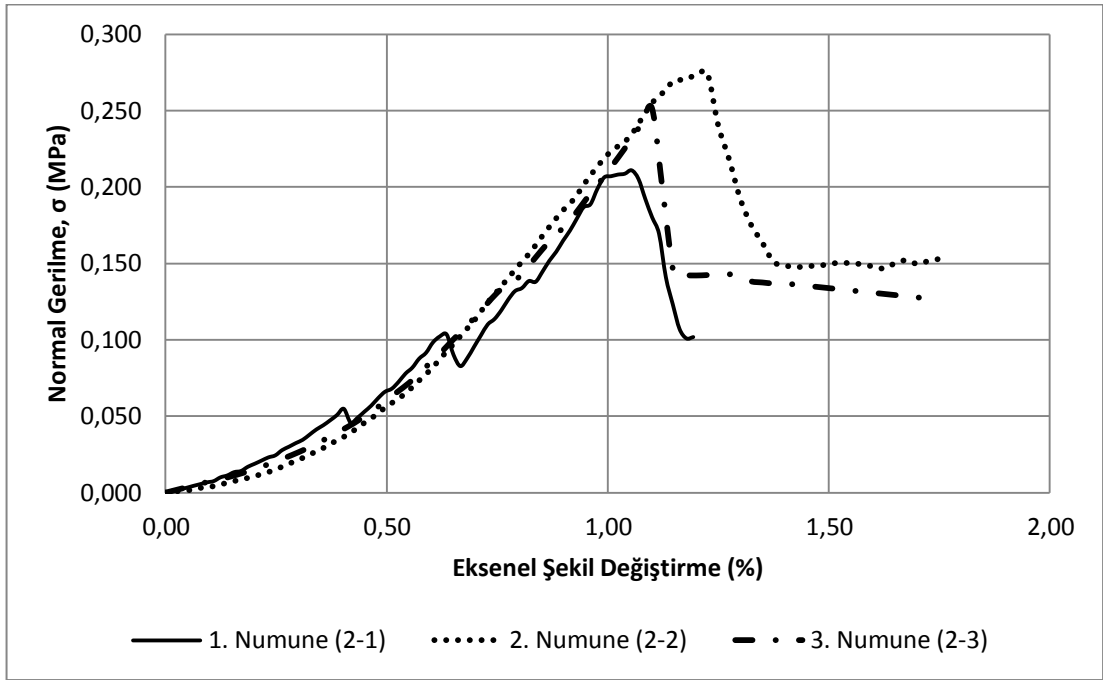
Çizelge 4.7 : Değişik cam köpüğü granülometreleri ile hazırlanan karışımların 7 günlük serbest basınç dayanımları.

Kullanılan Granülometri Numarası	Karışım Kodu	q_u (MPa)	q_u (MPa) (Ortalama)	c_u (MPa)	c_u (MPa) (Ortalama)
1	1-1	0,118		0,059	
	1-2	0,116	0,12	0,058	0,06
	1-3	0,118		0,059	
2	2-1	0,211		0,105	
	2-2	0,275	0,25	0,137	0,12
	2-3	0,252		0,126	
3	3-1	0,800		0,400	
	3-2	0,717	0,74	0,359	0,37
	3-3	0,710		0,355	

Şekil 4.12’de 1 numaralı cam köpüğü granülometrisi kullanılarak üretilmiş olan numunelerin serbest basınç dayanım eğrileri görülmektedir. Bu numunelerin ortalama serbest basınç dayanımı Çizelge 4.7’de de görüldüğü gibi 0,12 MPa’dır. Şekil 4.13’te ise ortalama serbest basınç dayanımı 0,25 MPa olan 2 numaralı köpük granülometrisiyle üretilmiş numunelerin serbest basınç deney sonuçları görülmektedir.

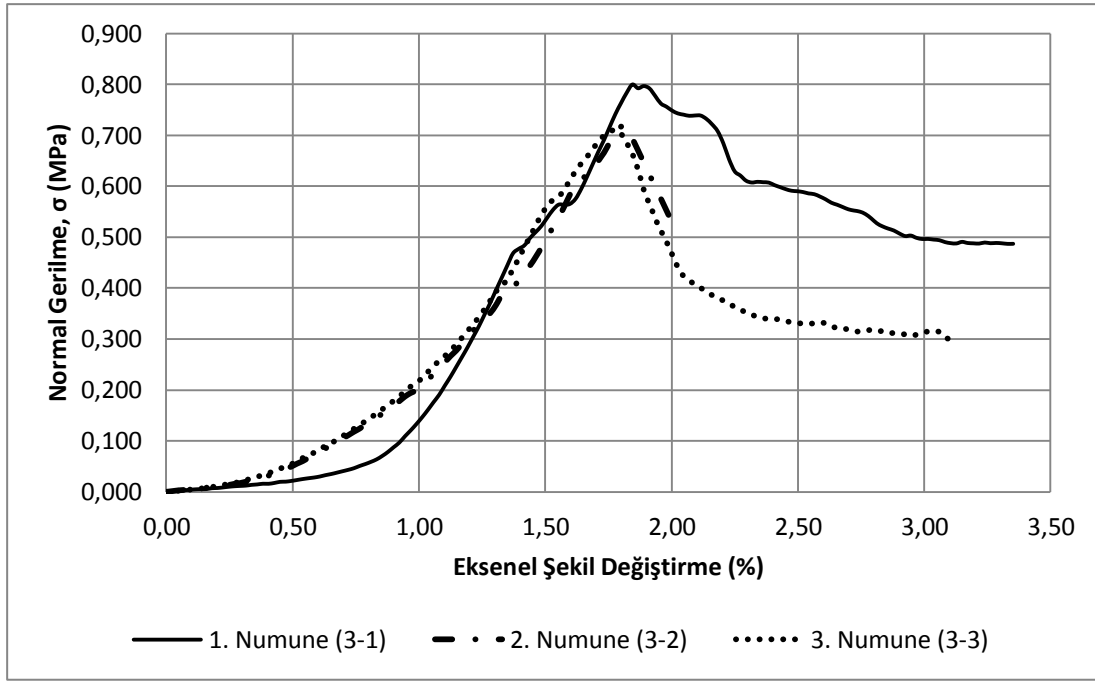


Şekil 4.12 : 1 no'lu cam köpüğü granülometrisi ile üretilen numunelerin serbest basınç dayanımı eğrileri.



Şekil 4.13 : 2 no'lu cam köpüğü granülometrisi ile üretilen numunelerin serbest basınç dayanımı eğrileri.

Şekil 4.14'te en ince granülometri olan 3 numaralı köpük granülometrisi kullanılarak üretilmiş numuneler görülmektedir. Bu numunelerin ortalama serbest basınç dayanımı değeri 0,74 MPa'dır. Şekil 4.15'te numunelerin serbest basınç deneyi sonrasındaki görünümüne örnekler verilmiştir.



Şekil 4.14 : 3 no'lu cam köpüğü granülometrisi ile üretilen numunelerin serbest basınç dayanımı eğrileri.



Şekil 4.15 : Numunelerin serbest basınç deneyi sonrasındaki görünümü.

Numunelerin serbest basınç deneylerinden elde edilen normal gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri ayrıntılı olarak Ek A.1’de verilmiştir.

4.3.4 Karışımların elastisite ve kayma modülleri

Serbest basınç deneylerinden elde edilen normal gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri kullanılarak karışımların elastisite modülleri Denklem 4.3’e göre elde edilmiştir. Kayma modülleri, elde edilen elastisite modülleri kullanılarak Denklem 4.4’e göre hesaplanmıştır. Kayma modülü hesaplanırken malzemenin Poisson oranı literatürdeki yaklaşımlar incelenerek 0,3 olarak kabul edilmiştir. Burada E, elastisite modülü; G, kayma modülü; ν , Poisson oranı, ΔL aksenal deplasman, L_0 numunenin ilk boyudur.

$$E = \sigma / (\Delta L / L_0) \quad (4.3)$$

$$E = 2 \times G \times (1 + \nu) \quad (4.4)$$

Değişik cam köpüğü granülometrileri kullanılarak hazırlanan karışımların elastisite ve kayma modülleri Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8 : Değişik cam köpüğü granülometrileri ile hazırlanan karışımların elastisite ve kayma modülleri

Numune Kodu	Elastisite Modülü (MPa)	Elastisite Modülü (Ortalama) (MPa)	Kayma Modülü (MPa)	Kayma Modülü (Ortalama) (MPa)
1-1	20,78		7,99	
1-2	20,62	20,31	7,93	7,81
1-3	19,53		7,51	
2-1	32,20		12,38	
2-2	35,82	32,97	13,78	12,68
2-3	30,88		11,88	
3-1	69,63		26,78	
3-2	70,76	69,84	27,22	26,86
3-3	69,13		26,59	

4.4 Değişik Kum ve Çimento Oranları İle Yapılan Çalışmalar

Bu bölüme konu olan çalışmanın amacı karışımlarda kullanılan cam köpüğü malzemesinin belirli bir miktarı kum ile değiştirildiği zaman birim ağırlık ve dayanım özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemektir. Bunun için 5 farklı cam köpüğü/kum oranı kullanılarak KDDM numuneleri hazırlanarak birim ağırlık ve 7 günlük dayanım özellikleri belirlenmiştir. Buna ek olarak aynı çalışma 3 farklı çimento/(cam köpüğü + kum) oranı ile tekrarlanarak karışımdaki çimento oranının da karışımın birim ağırlık ve dayanım özelliklerine olan etkisi belirlenmiştir.

4.4.1 Karışımlar

Kum ikamesinin etkisini görebilmek amacıyla diğer parametreler sabit tutularak “kum/cam köpüğü” yüzdesi %0, %25, %50, %75 ve %100 olan 5 farklı karışım dizaynı yapılmıştır. Bu karışımlarda “su/çimento” oranı 0,70’tir. Bu oran bileşiminde kum bulunmayan, tamamen cam köpüğü kullanılan numunelere göre belirlenmiş olup “su/çimento” ve “çimento/granüler malzeme” oranının sonuçlara olan etkisini önlemek amacıyla tüm numunelerde sabit tutulmuştur. Bu çalışmaya paralel olarak çimento/granüler malzeme oranının etkisini araştırmak amacıyla farklı oranlarda çimento kullanılarak çalışma tekrarlanmıştır. Amaçlanan birim ağırlık ve dayanım değerleri çerçevesinde “çimento/granüler malzeme” oranı 1, 2 ve 3 olarak belirlenmiştir. Toplam 46 adet numune üretilmiş olup bu numunelerin karışımları Çizelge 4.9’da ayrıntılı olarak görülmektedir.

Numuneler “1-1-1” ve benzeri şekilde isimlendirilmiş olup ilk rakam çimento oranını, ikinci rakam yukarıda belirtilmiş köpük-kum oranını temsil eden bir sayıyı, üçüncü rakam da aynı karışım oranına sahip numune numarasını belirtmektedir. Numune kodlarına göre karışımlarda bulunan malzeme içerikleri Çizelge 4.9’da ayrıntılı bir şekilde belirtilmiştir.

4.4.2 Karışımların birim hacim ağırlıkları

Beş farklı kum/köpük oranı kullanılarak üretilen karışımlarda karışımın suya doygun birim hacim ağırlık ile kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Karışımların birim hacim ağırlıkları çimento oranlarına göre Çizelge 4.10, 4.11 ve 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.9 : Değişik kum ve çimento oranlarıyla yapılan karışımlar.

Numune Kodu	Ağırlıkça Çimento/(Cam Köpüğü+Kum) Oranı	Kum/Köpük Oranı (%)
1-1-1	1	0
1-1-2		
1-1-3		
1-2-1		25
1-2-2		
1-2-3		
1-2-4		
1-3-1		50
1-3-2		
1-3-3		
1-4-1		75
1-4-2		
1-4-3		
1-4-4		
1-5-1		100
1-5-2		
2-1-1	2	0
2-1-2		
2-1-3		
2-2-1		25
2-2-2		
2-2-3		
2-3-1		50
2-3-2		
2-3-3		
2-4-1		75
2-4-2		
2-4-3		
2-5-1		100
2-5-2		
2-5-3		
3-1-1	3	0
3-1-2		
3-1-3		
3-2-1		25
3-2-2		
3-2-3		
3-3-1		50
3-3-2		
3-3-3		
3-4-1		75
3-4-2		
3-4-3		
3-5-1		100
3-5-2		
3-5-3		

Çizelge 4.10 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 1 olan numunelerin birim hacim ağırlık özellikleri.

Köpük/Kum Oranı	Numune Kodu	Doygun Birim Hacim Ağırlık - γ_d		γ_d (Ortalama)		Kuru Birim Hacim Ağırlık - γ_k		γ_k (Ortalama)	
		gr/cm ³	kN/m ³	gr/cm ³	kN/m ³	gr/cm ³	kN/m ³	gr/cm ³	kN/m ³
%100 Köpük %0 Kum	1-1-1	0,25	2,48	0,27	2,70	0,12	1,21	0,13	1,32
	1-1-2	0,28	2,72			0,14	1,33		
	1-1-3	0,29	2,88			0,14	1,41		
%75 Köpük %25 Kum	1-2-1	0,32	3,09	0,34	3,29	0,19	1,85	0,20	1,96
	1-2-2	0,35	3,46			0,21	2,07		
	1-2-3	0,34	3,31			0,20	1,98		
	1-2-4	0,34	3,29			0,20	1,96		
%50 Köpük %50 Kum	1-3-1	0,37	3,67	0,42	4,11	0,26	2,57	0,29	2,88
	1-3-2	0,46	4,50			0,32	3,15		
	1-3-3	0,43	4,17			0,30	2,92		
%25 Köpük %75 Kum	1-4-1	0,79	7,77	0,73	7,21	0,61	6,01	0,57	5,58
	1-4-2	0,70	6,91			0,55	5,35		
	1-4-3	0,72	7,06			0,56	5,46		
	1-4-4	0,72	7,08			0,56	5,49		
%0 Köpük %100 Kum	1-5-1	1,76	17,24	1,76	17,31	1,56	15,34	1,57	15,40
	1-5-2	1,77	17,39			1,58	15,47		

Çizelge 4.11 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 2 olan numunelerin birim hacim ağırlık özellikleri.

Köpük/Kum Oranı	Numune Kodu	Doygun Birim Hacim Ağırlık - γ_d		γ_d (Ortalama)		Kuru Birim Hacim Ağırlık - γ_k		γ_k (Ortalama)	
		gr/cm ³	kN/m ³	gr/cm ³	kN/m ³	gr/cm ³	kN/m ³	gr/cm ³	kN/m ³
%100 Köpük %0 Kum	2-1-1	0,45	4,44	0,39	3,85	0,30	2,93	0,26	2,54
	2-1-2	0,33	3,24			0,22	2,14		
	2-1-3	0,39	3,87			0,26	2,55		
%75 Köpük %25 Kum	2-2-1	0,51	4,96	0,47	4,59	0,37	3,63	0,34	3,36
	2-2-2	0,46	4,47			0,33	3,27		
	2-2-3	0,44	4,35			0,32	3,18		
%50 Köpük %50 Kum	2-3-1	0,78	7,63	0,81	7,96	0,64	6,29	0,67	6,55
	2-3-2	0,86	8,46			0,71	6,96		
	2-3-3	0,79	7,78			0,65	6,40		
%25 Köpük %75 Kum	2-4-1	1,28	12,52	1,28	12,53	1,12	10,99	1,12	11,01
	2-4-2	1,24	12,20			1,09	10,72		
	2-4-3	1,31	12,87			1,15	11,30		
%0 Köpük %100 Kum	2-5-1	1,83	17,97	1,83	17,93	1,66	16,30	1,66	16,27
	2-5-2	1,84	18,02			1,67	16,35		
	2-5-3	1,81	17,79			1,65	16,14		

4.4.3 Karışımların serbest basınç dayanımları

Değişik kum oranları ve çimento oranları kullanılarak üretilen karışımlar 7 gün kür havuzlarında bekletildikten sonra 7 günlük serbest basınç dayanımı değerlerinin belirlenmesi amacıyla serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Çizelge 4.13, 4.14, 4.15 sırası ile çimento/(köpük+kum) oranı 1, 2 ve 3 olan numunelerin dayanım

özelliklerini göstermektedir. Bu karışımların normal gerilme-eksenel şekil değiştirme davranışlarını gösteren serbest basınç eğrileri Ek A.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.12 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 3 olan numunelerin birim hacim ağırlık özellikleri.

Köpük/Kum Oranı	Numune Kodu	Doygun Birim Hacim Ağırlık - γ_d		γ_d (Ortalama)		Kuru Birim Hacim Ağırlık - γ_k		γ_k (Ortalama)	
		gr/cm ³	kN/m ³	gr/cm ³	kN/m ³	gr/cm ³	kN/m ³	gr/cm ³	kN/m ³
%100 Köpük	3-1-1	0,39	3,84			0,26	2,58		
%0 Kum	3-1-2	0,38	3,74	0,40	3,89	0,26	2,51	0,27	2,62
	3-1-3	0,42	4,10			0,28	2,75		
%75 Köpük	3-2-1	0,75	7,32			0,53	5,21		
%25 Kum	3-2-2	0,67	6,59	0,72	7,07	0,48	4,69	0,51	5,04
	3-2-3	0,75	7,32			0,53	5,21		
%50 Köpük	3-3-1	0,83	8,19			0,59	5,83		
%50 Kum	3-3-2	0,81	7,95	0,84	8,20	0,58	5,66	0,60	5,84
	3-3-3	0,86	8,46			0,61	6,03		
%25 Köpük	3-4-1	1,24	12,17			0,93	9,17		
%75 Kum	3-4-2	1,19	11,66	1,20	11,73	0,90	8,79	0,90	8,84
	3-4-3	1,16	11,36			0,87	8,57		
%0 Köpük	3-5-1	1,88	18,45			1,73	16,93		
%100 Kum	3-5-2	1,87	18,32	1,87	18,30	1,71	16,81	1,71	16,79
	3-5-3	1,85	18,13			1,70	16,63		

Çizelge 4.13 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 1 olan numunelerin dayanım özellikleri.

Köpük/Kum Oranı	Numune Kodu	q_u (MPa)	q_u (MPa) (Ortalama)	c_u (MPa)	c_u (MPa) (Ortalama)
%100 Köpük - %0 Kum	1-1-1	0,023		0,011	
	1-1-2	0,019	0,02	0,010	0,01
	1-1-3	0,022		0,011	
%75 Köpük - %25 Kum	1-2-1	0,023		0,011	
	1-2-2	0,023	0,02	0,012	0,01
	1-2-3	0,025		0,012	
	1-2-4	0,025		0,013	
%50 Köpük - %50 Kum	1-3-1	0,076		0,038	
	1-3-2	0,074	0,08	0,037	0,04
	1-3-3	0,085		0,042	
%25 Köpük - %75 Kum	1-4-1	0,297		0,148	
	1-4-2	0,360	0,33	0,180	0,17
	1-4-3	0,338		0,169	
	1-4-4	0,332		0,166	
%0 Köpük - %100 Kum	1-5-1	6,105	6,02	3,053	3,01
	1-5-2	5,933		2,967	

Çizelge 4.14 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 2 olan numunelerin dayanım özellikleri.

Köpük/Kum Oranı	Numune Kodu	q_u (MPa)	q_u (MPa) (Ortalama)	c_u (MPa)	c_u (MPa) (Ortalama)
%100 Köpük - %0 Kum	2-1-1	0,050	0,05	0,025	0,03
	2-1-2	0,049		0,025	
	2-1-3	0,053		0,026	
%75 Köpük - %25 Kum	2-2-1	0,133	0,15	0,066	0,08
	2-2-2	0,150		0,075	
	2-2-3	0,172		0,086	
%50 Köpük - %50 Kum	2-3-1	0,629	0,64	0,315	0,32
	2-3-2	0,674		0,337	
	2-3-3	0,608		0,304	
%25 Köpük - %75 Kum	2-4-1	1,442	1,46	0,721	0,73
	2-4-2	1,452		0,726	
	2-4-3	1,494		0,747	
%0 Köpük - %100 Kum	2-5-1	6,679	6,69	3,339	3,34
	2-5-2	6,748		3,374	
	2-5-3	6,640		3,320	

Çizelge 4.15 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 3 olan numunelerin dayanım özellikleri.

Köpük/Kum Oranı	Numune Kodu	q_u (MPa)	q_u (MPa) (Ortalama)	c_u (MPa)	c_u (MPa) (Ortalama)
%100 Köpük - %0 Kum	3-1-1	0,142	0,14	0,071	0,07
	3-1-2	0,147		0,074	
	3-1-3	0,130		0,065	
%75 Köpük - %25 Kum	3-2-1	0,279	0,31	0,139	0,15
	3-2-2	0,309		0,155	
	3-2-3	0,337		0,168	
%50 Köpük - %50 Kum	3-3-1	0,633	0,59	0,316	0,30
	3-3-2	0,544		0,272	
	3-3-3	0,608		0,304	
%25 Köpük - %75 Kum	3-4-1	1,610	1,61	0,805	0,81
	3-4-2	1,642		0,821	
	3-4-3	1,589		0,795	
%0 Köpük - %100 Kum	3-5-1	7,478	7,47	3,739	3,74
	3-5-2	7,255		3,628	
	3-5-3	7,677		3,838	

4.4.4 Karışımların elastisite ve kayma modülleri

Çizelge 4.16, 4.17, 4.18 sırası ile çimento/(köpük+kum) oranı 1, 2 ve 3 olan numunelerin elastisite ve kayma modüllerini göstermektedir.

Çizelge 4.16 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 1 olan numunelerin elastisite ve kayma modülleri

Köpük/Kum Oranı	Numune Kodu	Elastisite Modülü (MPa)	Elastisite Modülü (Ortalama) (MPa)	Kayma Modülü (MPa)	Kayma Modülü (Ortalama) (MPa)
%100 Köpük - %0 Kum	1-1-1	17,52	13,52	6,74	5,20
	1-1-2	13,53		5,20	
	1-1-3	9,50		3,65	
%75 Köpük - %25 Kum	1-2-1	3,63	4,33	1,40	1,66
	1-2-2	4,86		1,87	
	1-2-3	5,18		1,99	
	1-2-4	3,63		1,40	
%50 Köpük - %50 Kum	1-3-1	4,06	3,69	1,56	1,42
	1-3-2	3,92		1,51	
	1-3-3	3,08		1,18	
%25 Köpük - %75 Kum	1-4-1	44,04	35,91	16,94	13,81
	1-4-2	33,62		12,93	
	1-4-3	27,34		10,52	
	1-4-4	38,65		14,87	
%0 Köpük - %100 Kum	1-5-1	1014,50	1064,95	390,19	409,60
	1-5-2	1115,40		429,00	

Çizelge 4.17 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 2 olan numunelerin elastisite ve kayma modülleri

Köpük/Kum Oranı	Numune Kodu	Elastisite Modülü (MPa)	Elastisite Modülü (Ortalama) (MPa)	Kayma Modülü (MPa)	Kayma Modülü (Ortalama) (MPa)
%100 Köpük - %0 Kum	2-1-1	4,79	6,57	1,84	2,53
	2-1-2	8,70		3,35	
	2-1-3	6,22		2,39	
%75 Köpük - %25 Kum	2-2-1	23,89	63,25	9,19	24,33
	2-2-2	62,44		24,02	
	2-2-3	103,42		39,78	
%50 Köpük - %50 Kum	2-3-1	45,13	67,10	17,36	25,81
	2-3-2	87,75		33,75	
	2-3-3	68,42		26,32	
%25 Köpük - %75 Kum	2-4-1	112,06	160,42	43,10	61,70
	2-4-2	177,39		68,23	
	2-4-3	191,80		73,77	
%0 Köpük - %100 Kum	2-5-1	478,43	366,46	184,01	140,94
	2-5-2	328,86		126,48	
	2-5-3	292,08		112,34	

Çizelge 4.18 : Çimento/(cam köpüğü+kum) = 3 olan numunelerin elastisite ve kayma modülleri

Köpük/Kum Oranı	Numune Kodu	Elastisite Modülü (MPa)	Elastisite Modülü (Ortalama) (MPa)	Kayma Modülü (MPa)	Kayma Modülü (Ortalama) (MPa)
%100 Köpük - %0 Kum	3-1-1	15,85	16,20	6,10	6,23
	3-1-2	15,81		6,08	
	3-1-3	16,93		6,51	
%75 Köpük - %25 Kum	3-2-1	24,06	26,44	9,25	10,17
	3-2-2	29,19		11,23	
	3-2-3	26,07		10,03	
%50 Köpük - %50 Kum	3-3-1	73,91	75,36	28,43	28,98
	3-3-2	61,22		23,55	
	3-3-3	90,94		34,98	
%25 Köpük - %75 Kum	3-4-1	240,50	207,64	92,50	79,86
	3-4-2	235,54		90,59	
	3-4-3	146,89		56,50	
%0 Köpük - %100 Kum	3-5-1	1588,50	1385,33	610,96	532,82
	3-5-2	1183,40		455,15	
	3-5-3	1384,10		532,35	

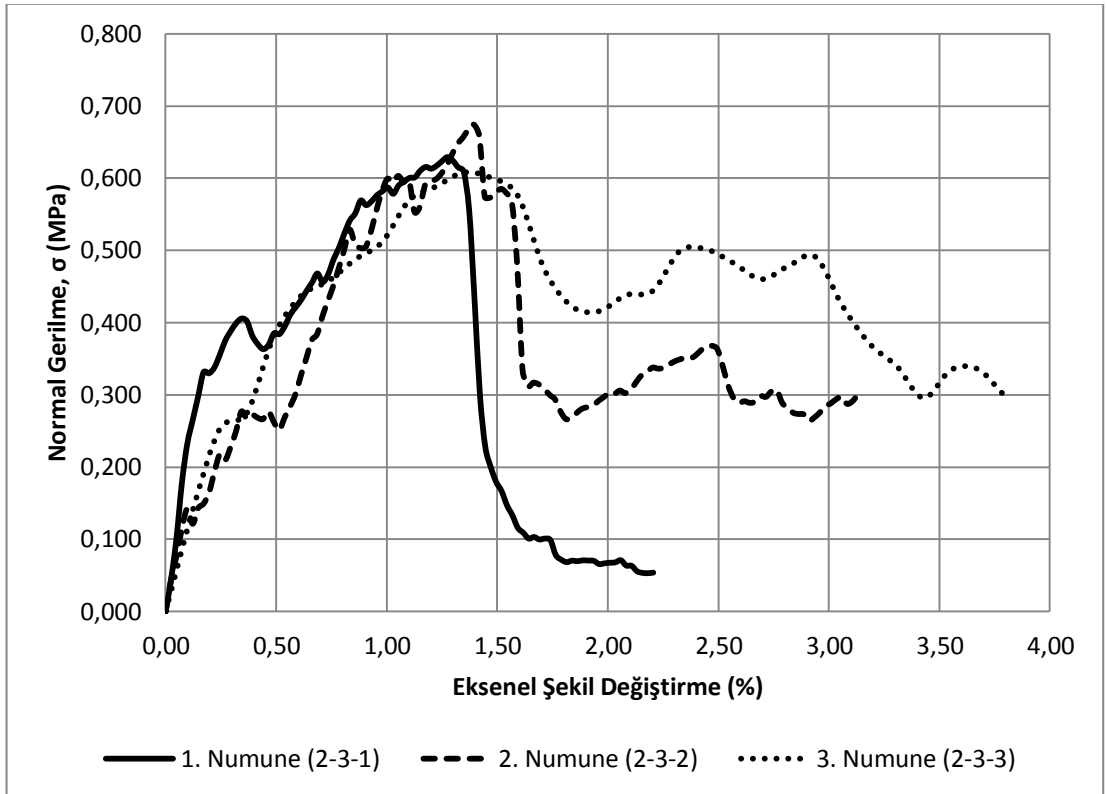
4.5 Belirlenen Çimento-Köpük-Kum Karışımı Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Kum oranının karışımların birim ağırlık özelliklerine olan etkisi incelendikten sonra bu çalışmada elde edilen sonuçlar ışığında belirli bir karışım dizaynı belirlenmiş, bu dizayna göre üretilen karışımların birim ağırlık ve dayanım özelliklerini belirlemek amacıyla daha fazla numune üretilmiş, buna ek olarak CBR ve geçirimsizlik deneyleri ile karışım hakkında daha fazla bilgi edinilmesi amaçlanmıştır. 7 günlük deneylere ek olarak 28 günlük deneyler de yapılarak karışımların uzun vadeli davranışları hakkında da bilgi sahibi olunmuştur.

4.5.1 Karışımlar

Bir önceki çalışma sonuçları değerlendirildiğinde birim ağırlık ve dayanım özellikleri bakımından çimento/(kum+köpük) oranı 2 olan ve granüler malzeme olarak yarı yarıya cam köpüğü ve kum içeren numunelerin hafif dolgu malzemesi olarak yeterli olduğu görülmüştür (Şekil 4.16). Bu numunelerin deney sonuçları ortalamalarına bakıldığında suya doygun birim hacim ağırlıklarının $7,95 \text{ kN/m}^3$ ($0,81 \text{ gr/cm}^3$), kuru birim hacim ağırlıklarının $6,55 \text{ kN/m}^3$ ($0,67 \text{ gr/cm}^3$), 7 günlük serbest basınç

dayanımlarının ise 0,64 MPa olduğu görülmektedir (Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.14). Köpük ve kum oranlarının ağırlıkça belirlenmesi, karışımlarda kum oranının artışına paralel olarak köpük oranının azalması ile birlikte karışımdaki su içeriğine %100 cam köpüğü kullanılarak üretilmiş numunelerin su ihtiyacı göz önüne alınarak karar verildiğinden beraberinde fazla su içeriği problemini getirmiştir. Bunun nedeni kumun birim ağırlığının köpüğe göre çok yüksek olmasından dolayı, karışımlarda ağırlıkça yarı yarıya kullanılsa dahi kullanılan köpük hacmi ile karşılaştırıldığında çok az bir hacme sahip olmasından mütevellit bünyesinde, kullanılan köpüğe kıyasla çok daha az su tutabilmesidir. Bunun sonucunda karışımlarda kullanılan suyun fazla gelmesi ile birlikte gözle görülür ayrışmalar yaşanmış, bu ayrışmaları ortadan kaldırmak amacıyla da su/çimento oranı 0,70'ten 0,45'e çekilmiştir. Dizaynda yapılan bu güncelleştirmenin karışımın birim ağırlığında biraz artışa neden olarak bu değer 9,81 kN/m³ civarına yükseleceği, bununla beraber aynı artışın serbest basınç dayanımlarında da gözlenerek bu değerlerin de bir parça artacağı tahmin edilmiştir. Elde edilecek bu yeni sonuçların sınır değerler bakımından bir problem yaratmayacağı, hatta üretilcek malzemenin stabil ve homojen olması bakımından yarar sağlayacağı düşünülerek böyle bir karara varılmıştır.



Şekil 4.16 : %50 Kum - %50 Köpük kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme-eksenel şekil değiştirme davranışları.

4.5.2 Karışımların birim hacim ağırlıkları

Su/çimento oranının 0,45'e düşürülmesinin ardından 7 günlük numunelerin ortalama suya doygun birim hacim ağırlıkları $8,83 \text{ kN/m}^3$ ($0,90 \text{ gr/cm}^3$), kuru birim hacim ağırlıkları ise $6,01 \text{ kN/m}^3$ ($0,61 \text{ gr/cm}^3$) olarak belirlenmiştir. 28 günlük numunelerde de bu değerler sırasıyla $8,95 \text{ kN/m}^3$ ($0,91 \text{ gr/cm}^3$) ve $6,17 \text{ kN/m}^3$ ($0,63 \text{ gr/cm}^3$) olarak ölçülmüştür. Numunelerin 7 günlük birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 4.19'da, 28 günlük birim hacim ağırlık değerleri ise Çizelge 4.20'de verilmiştir.

Çizelge 4.19 : 7 günlük birim hacim ağırlık değerleri.

Numune Kodu	Doygun Birim Hacim Ağırlık - γ_d		γ_d (Ortalama)		Kuru Birim Hacim Ağırlık - γ_k		γ_k (Ortalama)	
	gr/cm^3	kN/m^3	gr/cm^3	kN/m^3	gr/cm^3	kN/m^3	gr/cm^3	kN/m^3
7-1	0,92	9,05			0,64	6,26		
7-2	0,95	9,28			0,68	6,66		
7-3	0,92	8,98			0,62	6,08		
7-4	0,89	8,74	0,90	8,83	0,59	5,77	0,61	6,01
7-5	0,90	8,80			0,64	6,26		
7-6	0,84	8,20			0,57	5,61		
7-7	0,91	8,93			0,62	6,06		
7-8	0,88	8,66			0,55	5,42		

Çizelge 4.20 : 28 günlük birim hacim ağırlık değerleri.

Numune Kodu	Doygun Birim Hacim Ağırlık - γ_d		γ_d (Ortalama)		Kuru Birim Hacim Ağırlık - γ_k		γ_k (Ortalama)	
	gr/cm^3	kN/m^3	gr/cm^3	kN/m^3	gr/cm^3	kN/m^3	gr/cm^3	kN/m^3
28-1	0,92	8,99			0,63	6,15		
28-2	0,90	8,86			0,63	6,23		
28-3	0,94	9,25			0,67	6,54		
28-4	0,93	9,12	0,91	8,95	0,64	6,24	0,63	6,17
28-5	0,91	8,97			0,65	6,36		
28-6	0,89	8,77			0,62	6,06		
28-7	0,91	8,92			0,61	5,96		
28-8	0,89	8,75			0,59	5,80		

4.5.3 Serbest basınç dayanımları

Numuneler (Şekil 4.17) 7. ve 28. günlerde kür havuzlarından alınarak serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneylerin sonucunda 7 günlük numunelerin ortalama serbest basınç dayanımları $0,75 \text{ MPa}$ olarak elde edilirken 28 günlük numunelerin ortalama serbest basınçları ise $0,91 \text{ MPa}$ olarak belirlenmiştir. 7 günlük numunelerin

serbest basınç deneyi sonuçları Çizelge 4.21’de, 28 günlük numunelerin serbest basınç deneyi sonuçları ise Çizelge 4.22’de ayrıntılı olarak görülmektedir.



Şekil 4.17 : Serbest basınç deneyinden önce numunenin görünümü (7-1).

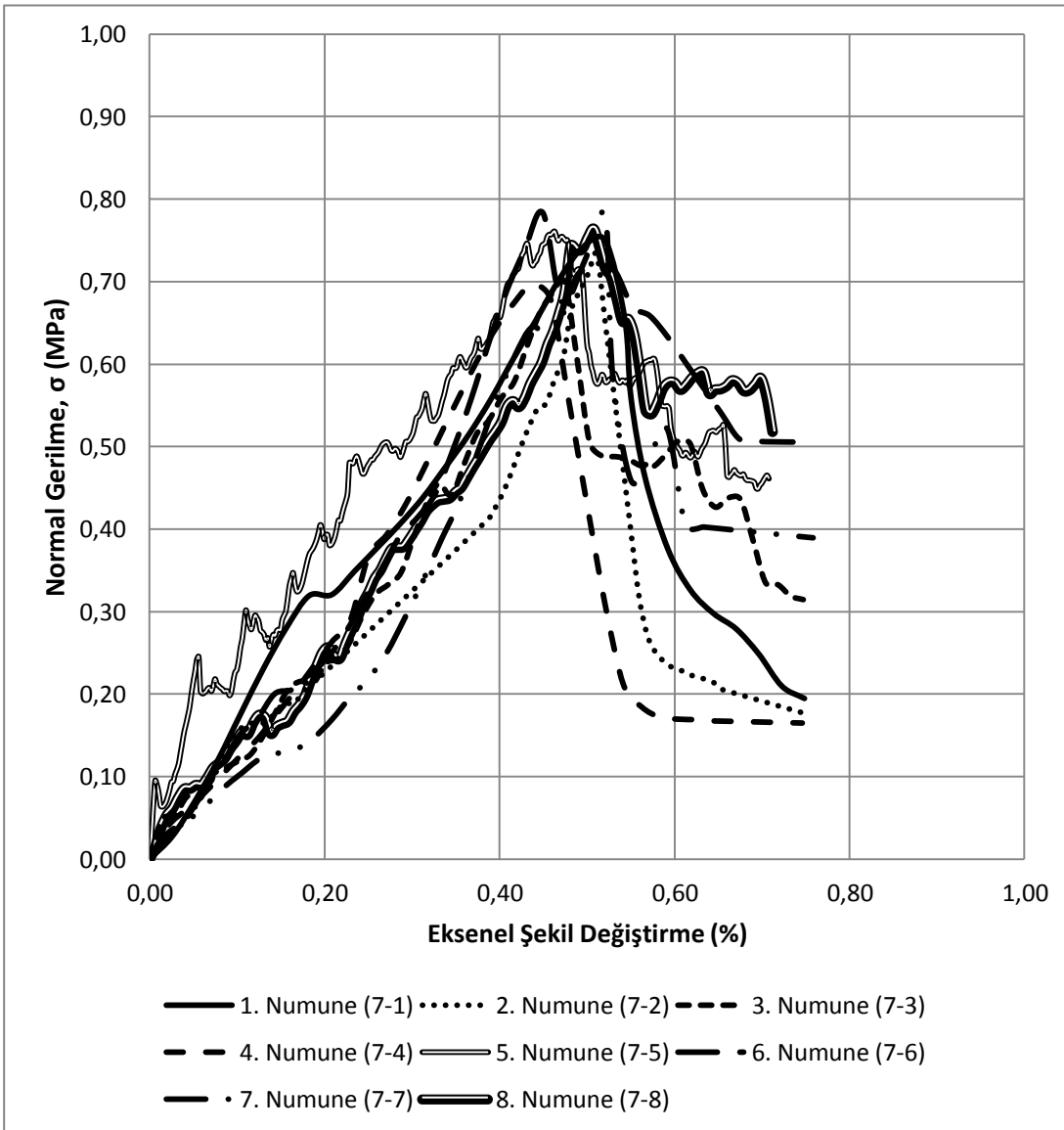
Çizelge 4.21 : 7 günlük numunelerin serbest basınç deney sonuçları.

Numune Kodu	q_u (MPa)	q_u (MPa) (Ortalama)	c_u (MPa)	c_u (MPa) (Ortalama)
7-1	0,750	0,75	0,375	0,37
7-2	0,732		0,366	
7-3	0,700		0,350	
7-4	0,697		0,349	
7-5	0,761		0,380	
7-6	0,783		0,392	
7-7	0,778		0,389	
7-8	0,764		0,382	

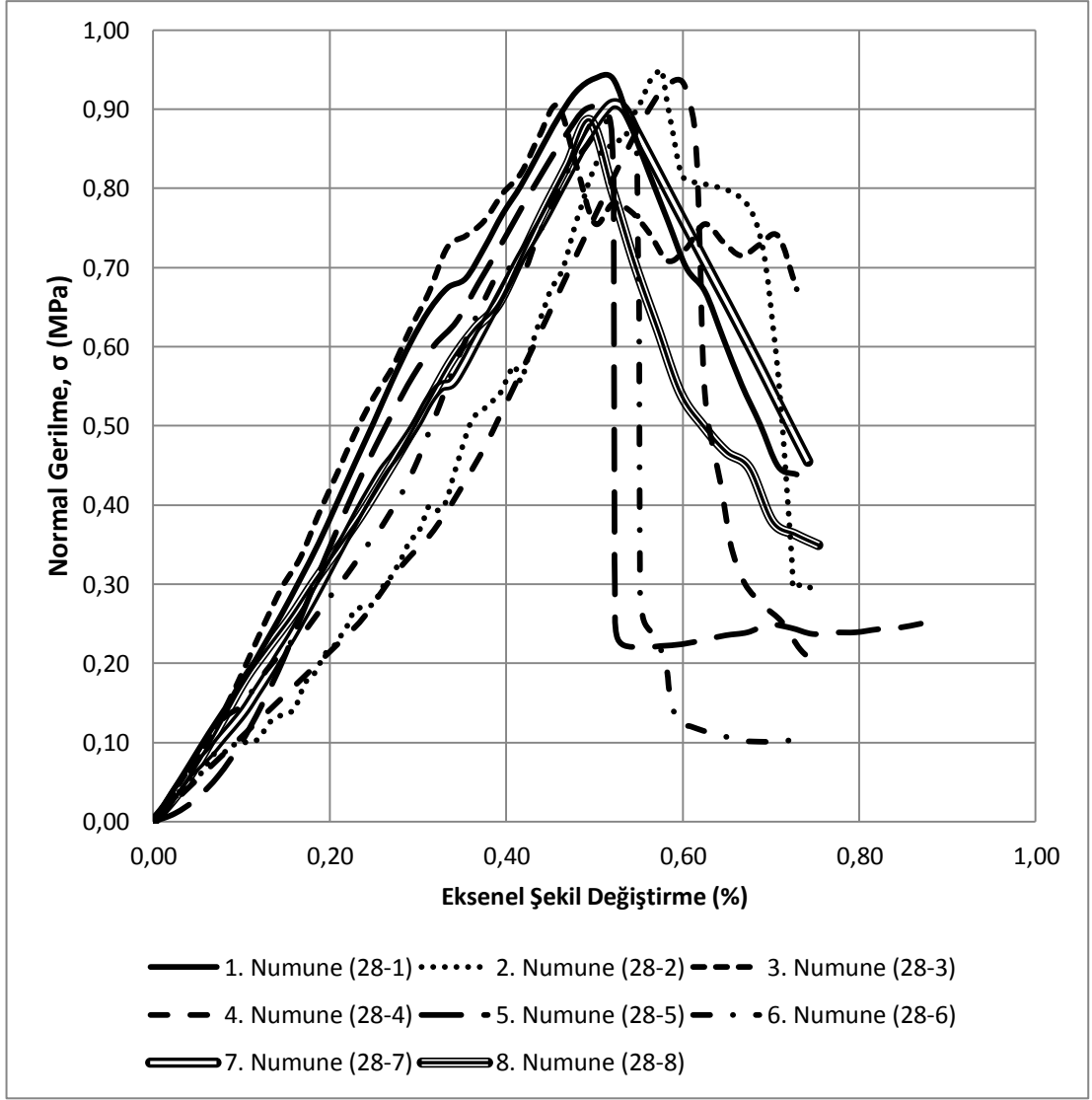
Serbest basınç deneyinden elde edilen eğriler ayrıntılı olarak Ek A.3’te verilmiş olup 7 günlük numunelerin deney sonuçları Şekil 4.18’de, 28 günlük numunelerin deney sonuçları ise Şekil 4.19’da toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 4.22 : 28 günlük numunelerin serbest basınç deney sonuçları.

Numune Kodu	q_u (MPa)	q_u (MPa) (Ortalama)	c_u (MPa)	c_u (MPa) (Ortalama)
28-1	0,939		0,470	
28-2	0,949		0,475	
28-3	0,904		0,452	
28-4	0,936	0,91	0,468	0,46
28-5	0,901		0,450	
28-6	0,893		0,446	
28-7	0,907		0,453	
28-8	0,886		0,443	



Şekil 4.18 : 7 günlük numunelerin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışları.



Şekil 4.19 : 28 günlük numunelerin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışları.

4.5.4 Karışımları elastisite ve kayma modülleri

7 günlük ve 28 günlük karışımların elastisite ve kayma modülleri çizelge 4.23'te verilmiştir.

4.5.5 CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) deneyleri

CBR deneyi; yol inşaatlarında kullanılan zeminlerin taban veya temel altı malzemesi olarak uygunluğunun belirlenmesi için geliştirilmiştir. İkinci Dünya Savaşında havaalanı inşaatlarında da uygulanmıştır. CBR deneyi, belirli su muhtevasına ve birim hacim ağırlığa sahip zeminlerin kayma dayanımını ölçer. CBR deneyi tarafından bir taşıma oranı sayısı belirlenir fakat bu sayı bir zemin türü için sabit olmayıp, zeminin deney sırasındaki su muhtevasına ve kuru birim hacim ağırlığına

bağlıdır. CBR deneyi sonucunda elde edilen oran ampirik olup, zeminlerin temel kayma dayanımı parametrelerini (kohezyon vb.) bulmak için kullanılmaz.

Çizelge 4.23 : 7 ve 28 günlük numunelerin elastisite ve kayma modülleri

Numune Kodu	Elastisite Modülü (MPa)	Elastisite Modülü (Ortalama) (MPa)	Kayma Modülü (MPa)	Kayma Modülü (Ortalama) (MPa)
7-1	136,44	131,15	52,48	50,44
7-2	135,10		51,96	
7-3	128,82		49,55	
7-4	127,35		48,98	
7-5	139,86		53,79	
7-6	132,82		51,08	
7-7	116,04		44,63	
7-8	132,78		51,07	
28-1	209,24	205,27	80,48	78,95
28-2	197,56		75,98	
28-3	221,75		85,29	
28-4	225,56		86,75	
28-5	227,33		87,43	
28-6	206,99		79,61	
28-7	177,33		68,20	
28-8	176,38		67,84	

CBR değeri, 19,4 cm² alana sahip penetrasyon pistonunun; belirli su muhtevasına ve birim hacim ağırlığa sahip sıkıştırılmış zemine belirli miktarda batması için gerekli yükün, kırmataştan sıkıştırılarak hazırlanmış standart bir numuneye aynı miktarda batması için gerekli olan yüke oranlanmasıyla bulunur. CBR değerinin bulunuşu için Denklem 4.5 kullanılır.

$$CBR (\%) = \frac{\text{Deneydeki birim yük}}{\text{Standart birim yük}} \times 100 \quad (4.5)$$

Denklem 4.3'ten görülebileceği gibi CBR sayısı standart birim yüke bağlı bir orandır. Pratikte oran simgesi, % kullanılmaz ve oran sadece bir sayı olarak yazılır. CBR deneyinde kullanılan standart birim gerilmeler Çizelge 4.24'te verilmiştir.

CBR sayısı genellikle 2,5 mm penetrasyon için gerekli yük oranına göre belirlenir. Bununla birlikte eğer 5 mm penetrasyon için gereken CBR değeri daha büyük olursa deney tekrar edilmelidir. Tekrar edilen deney sonunda 5 mm penetrasyon için elde

edilen CBR değeri, 2,5 mm penetrasyon için gerekli değere göre büyük çıkarsa, 5 mm penetrasyon için gerekli CBR değeri kullanılmalıdır.

Çizelge 4.24 : CBR deneyinde kullanılan standart birim gerilmeler (Bowles,1988).

Penetrasyon (mm)	Standart Birim Gerilme (MPa)
2,5	6,9
5,0	10,3
7,5	13,0
10,0	16,0
12,7	18,0

CBR değeri, yol ve havaalanı kaplamalarının altında kullanılan zeminlerin taban malzemesi olarak performansını saptamak için kullanılır. Çizelge 4.25, bu konu hakkında genel bir değerlendirme için kullanılabilir.

Çizelge 4.25 : CBR değerlerinin sınıflandırılması (Bowles, 1988).

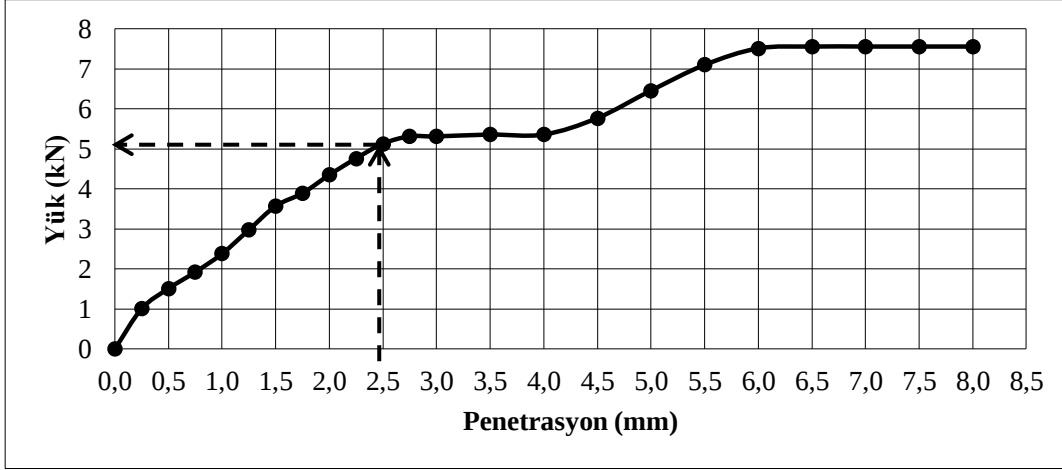
CBR Değeri (%)	Genel Değerlendirme	Kullanım Alanı	Sınıflandırma Sistemi
			Birleşik
0 - 3	Çok zayıf	Doğal zemin	OH, CH, MH, OL
3 - 7	Zayıf	Doğal zemin	OH, CH, MH, OL
7 - 20	Orta	Alt temel	OL, CL, ML, SC, SM, SP
20 - 50	İyi	Temel veya alt temel	GM, GC, SW, SM, SP, GP
>50	Çok iyi	Temel	GW, GM

Deney günlerine kadar kür havuzlarında bekletilen numunelere 7. ve 28. Günlerde CBR deneyi uygulanmıştır (Şekil 4.20). CBR deneyleri 1,5 mm/dakika yükleme hızı altında yapılmıştır.

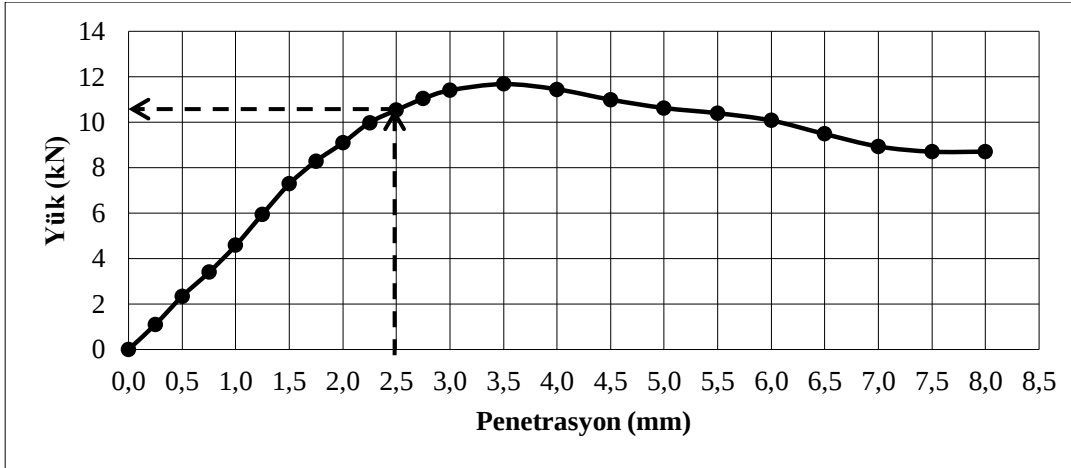


Şekil 4.20 : CBR deneyi, numunenin deney öncesi ve sonrasındaki görünümü.

Karışımın 7 günlük CBR deneyi sonucunda elde edilen yük – penetrasyon eğrisi Şekil 4.21’de, 28 günlük CBR deneyi sonucunda elde edilen yük – penetrasyon eğrisi ise Şekil 4.22’de görülmektedir. Karışımın 7 günlük CBR değeri 38,4; 28 günlük CBR değeri ise 78,9’dur (Çizelge 4.26). Bu değerler Çizelge 4.25’e göre yorumlandığında karışımın 7 günlük CBR değerlendirmesinin “iyi”, 28 günlük CBR değerlendirmesinin ise “çok iyi” olduğu görülmekte olup karışımın temel veya alt temel uygulamaları için yeterli olduğu söylenebilir.



Şekil 4.21 : Karışımın 7. gündeki yük – penetrasyon davranışı.



Şekil 4.22 : Karışımın 28. gündeki yük – penetrasyon davranışı.

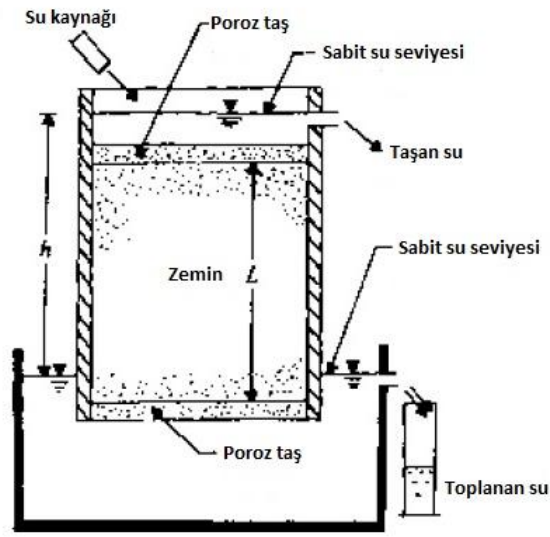
Çizelge 4.26 : 7 ve 28 günlük CBR değerleri.

Numune Yaşı (gün)	CBR Değeri (%)
7	38,4
28	78,9

4.5.6 Geçirimsizlik özellikleri

Yüksek geçirimsizliğe sahip granüler malzemeler için sabit seviyeli permeabilite deneyi uygundur. Temel laboratuvar deney düzeneği Şekil 4.23’de görülmektedir. Numune silindirik bir kalıba yerleştirilir ve üzerindeki su yükü ayarlanarak sabit akış hızı sağlanır. Zeminin içinden geçen su hacmi bilinen bir kaptan toplanır ve toplama süresi kaydedilir. Darcy kanunundan t süresince toplanan toplam akım miktarı Q , Denklem 4.6’da belirtilen bağıntı ile verilebilir.

$$Q = qt = kiAt \quad (4.6)$$



Şekil 4.23 : Sabit seviyeli permeabilite deney düzeneğinin şematik gösterimi (Das, 2008).

Burada A , deney numunesinin enkesit alanıdır. L boyundaki bir numune için $i = h/L$ olduğundan $Q = k(h/L)At$ yazılabilir. Denklem 4.4 yeniden düzenlenerek Denklem 4.7 elde edilir.

$$k = \frac{QL}{hAt} \quad (4.7)$$

Denklemin sağ tarafındaki büyüklükler deneyden elde edildiği takdirde zeminin permeabilite katsayı, k hesaplanabilir (Das, 2008).

Zemin tipi, drenaj ve geçirimsizlik katsayısı arasındaki ilişki Çizelge 4.27’de özetlenmiştir. Zeminlerin permeabilite katsayılarına göre permeabilite dereceleri ise Çizelge 4.28’de görülmektedir.

Çizelge 4.27 : Zeminlerin permeabilite ve drenaj karakteristikleri (Terzaghi ve Peck, 1996).

Geçirimsizlik Katsayısı k (m/s)												
	10 ⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹
Drenaj	İyi						Zayıf		Pratik Olarak Geçirimsiz			
Zemin Tipi	Temiz çakıl	Temiz kumlar, temiz kum ve çakıl karışımları			Çok ince kumlar, organik ve inorganik siltler, kum, silt ve kil karışımları vs.				"Geçirimsiz" zeminler, örn: ufalanma bölgesinin altındaki homojen killeri			
					Bitki ve ufalanma etkisi ile modifiye olmuş "Geçirimsiz" zeminler							

Çizelge 4.28 : Zeminlerin permeabilite katsayılarına göre sınıflandırılması (Terzaghi, Peck, 1962).

Permeabilite Derecesi	Permeabilite Katsayısı, k (cm/sn)
Yüksek	10 ⁻¹ üzeri
Orta	10 ⁻¹ -10 ⁻³
Düşük	10 ⁻³ -10 ⁻⁵
Çok düşük	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁷
Pratik olarak geçirimsiz	10 ⁻⁷ 'den az

Numunelerin geçirimsizlik özellikleri sabit seviyeli permeabilite deneyleri ile belirlenmiştir. Deneyler numuneler üretildikten 7. ve 28. günde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin 7. ve 28. günleri üçer kere tekrarlanan deney sonuçları Çizelge 4.29'da görülmektedir. Permeabilite katsayısı 7 günlük numunelerde ortalama olarak $7,28 \times 10^{-3}$ cm/sn, 28 günlük numunelerde ise $7,05 \times 10^{-3}$ cm/sn olarak elde edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.28 ile karşılaştırıldığında üretilen numunelerin orta düzeyde bir geçirimsizliğe sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.29 : Numunelerin geçirimsizlik özellikleri.

Numune Yüksekliği (H) (cm)			12,5	Geçirimlilik Katsayısı (k) (cm/sn) (Ortalama)
Numune Kesit Alanı (A) (cm ²)			176,71	
Su Basıncı (H) (cm su sütunu)			120	
Numunenin İçinden Geçen Su Miktarı (Q) (cm ³)			1000	
Deney No	Numune Yaşı (gün)	Su Geçişi İçin Gereken Süre (t) (sn)	Geçirimlilik Katsayısı (k) (cm/sn)	
1	7	82	7,19x10 ⁻³	7,28x10 ⁻³
2	7	80	7,37x10 ⁻³	
3	7	81	7,28x10 ⁻³	
4	28	84	7,02x10 ⁻³	7,05x10 ⁻³
5	28	83	7,10x10 ⁻³	
6	28	84	7,02x10 ⁻³	

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışma kapsamında çeşitli parametrelerin cam köpüğü, kum ve çimento malzemeleri kullanılarak üretilen hafif dolgu malzemesinin birim ağırlık ve dayanım özelliklerine etkisi incelenmiş olup bu bölümde bir önceki bölümde verilen deneysel veriler karşılaştırmalı olarak yorumlanarak bu incelemeler sonucunda elde edilen pratik amaçlar doğrultusunda kullanılabilecek bağıntılar ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Yapılan deney sonuçlarından elde edilen veriler regresyon analizleri ile değerlendirilmiştir. Regresyon analizi, iki ya da daha çok değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılan analiz metodudur. Eğer tek bir değişken kullanılarak analiz yapılıyorsa buna tek değişkenli regresyon, birden çok değişken kullanılıyorsa çok değişkenli regresyon analizi olarak isimlendirilir. Regresyon analizi ile değişkenler arasındaki ilişkinin varlığı, eğer ilişki var ise bunun gücü hakkında bilgi edinilebilir. Regresyon analizinin sonucunda bağımsız değişken ya da değişkenlerin bağımlı değişkende gözlenen değişimlerin ne kadarını açıkladığı ortaya çıkar (Saruhan ve Özdemirci, 2011). Regresyonda, değişkenlerden biri bağımlı diğerleri bağımsız değişken olmalıdır. Buradaki mantık eşitliğin solunda yer alan değişkenin sağında yer alan değişkenlerden etkilenmesidir. Sağda yer alan değişkenlerse diğer değişkenlerden etkilenmemektedir. Burada etkilenmemek matematiksel anlamda bu değişkenler bir doğrusal denkleme konulduğundan etki yapması anlamındadır. *Çoklu doğrusallık, ardışık bağımlılık* sorunları kastedilmemektedir (Gujarati, 2008).

Deney sonuçlarına göre çizilen regresyon eğrileri, bağımsız değişken grubunun dağılımına göre üstel fonksiyonlar şeklinde elde edilmiştir. Regresyon eğrilerinden R^2 değerleri hesaplanmıştır. R^2 regresyonun determinasyon katsayısı olup bir regresyon denkleminin açıkladığı bağımlı değişkenin değişmesini ölçmeye yarayan istatistiksel kavram olarak açıklanabilir. R^2 değerinin 1'e eşit olması oluşturulan modelin y bağımlı değişkeninde meydana gelen değişimi tam olarak açıkladığı, R^2 değerinin 0'a eşit olması ise tepki değişkeni ile regresyon değişkeni arasında hiçbir lineer bağlantı olmadığı anlamına gelir. R^2 değerlerinin belirlenmesi deney

sonuçlarının tahmin edilebilmesi ve değişken faktörlere göre model kurulabilmesi açısından önemlidir.

5.1 Cam Köpüğü Granülometrisinin Karışıma Etkisi

Kullanılan cam köpüğü malzemesinin dane boyutu küçüldüğünde birim hacimde mevcut olan boşluk hacmi azalacağından daha yoğun bir karışım elde edilmesi beklenir. Bunun sebebi olarak cam köpüğü tanelerinin küçülmesi sonucunda içerisinde bulundurdıkları boşluklu yapının ortaya çıkan kompozit malzemeye olan genel yansımasının azalması ve azalan dane boyutundan dolayı birim hacimdeki cam köpüğü ağırlığının artması, yani kısaca cam köpüğünün dane boyutu ile birim ağırlığının ters, boşluk oranının ise doğru orantılı olması gösterilebilir. Bunun yanında dane boyutunun küçülmesine bağlı olarak cam köpüğü malzemesinin özgül yüzeyinde meydana gelen azalma sonucu karışımların su ihtiyacında meydana gelen artışın karşılanmasına yönelik karışımlarda kullanılan su miktarının da artırılması da karışımın birim ağırlığının artmasında rol oynar. Daha ince bir granülometri kullanmak birim ağırlıkta artışlara yol açtığından hafifliğin ön planda olduğu uygulamalarda bir dezavantaj gibi gözükse de daha az boşluk hacmine sahip, daha yoğun bir malzemenin dayanımı da daha yüksek olacağından taşıma kapasitesinin önemli olduğu durumlarda bu dezavantaj avantaja dönüşmüş olur. Bunun yanında dane boyutundaki azalma ile daha homojen, ayrıışmayan ve kolay yerleştirilebilen bir malzeme elde etmek mümkündür. Bu bölümde yapılan deneysel çalışma kapsamında değişik dane boyutu dağılımı kullanılarak üretilen numunelerden elde edilen deney sonuçları değerlendirilerek kullanılan cam köpüğü malzemesinin granülometrisi ile birim hacim ağırlık ve dayanım özellikleri arasındaki bağlantı irdelenmiştir.

Karışımlarda kullanılan cam köpüğü granülometrisi ile karışımların çeşitli özellikleri arasında bağlantı kurabilmek için aralarındaki ilişkinin sayısal olarak ortaya konmasına gerekir. Granülometrik değişimlerin sayısal biçimde temsili en iyi şekilde “incelik modülü” parametresi kullanılarak yapılabilir. Bu bakımdan değerlendirmelerde kullanılmak üzere çalışmada kullanılan granülometrilere ait incelik modülleri hesaplanmış ve bağıntılar bu incelik modülleri üzerinden elde edilmiştir.

İncelik modülü, bir agreganın granülometrik bileşimi hakkında bilgi veren tek bir sayıdır. İncelik modülü, her bir eleğe karşılık gelen % ordinatların, 100’den

farklarının toplanması ve bu toplamın 100'e bölünmesi ile elde edilir. Agregataneleri küçüldükçe incelik modülü azalır, taneler irileştikçe incelik modülü büyür. Aynı incelik modülüne sahip agregaların granülometreleri farklı olabilir.

Çizelge 5.1'de deneysel çalışmada kullanılan cam köpüğü granülometrelerine ait incelik modülleri görülmektedir.

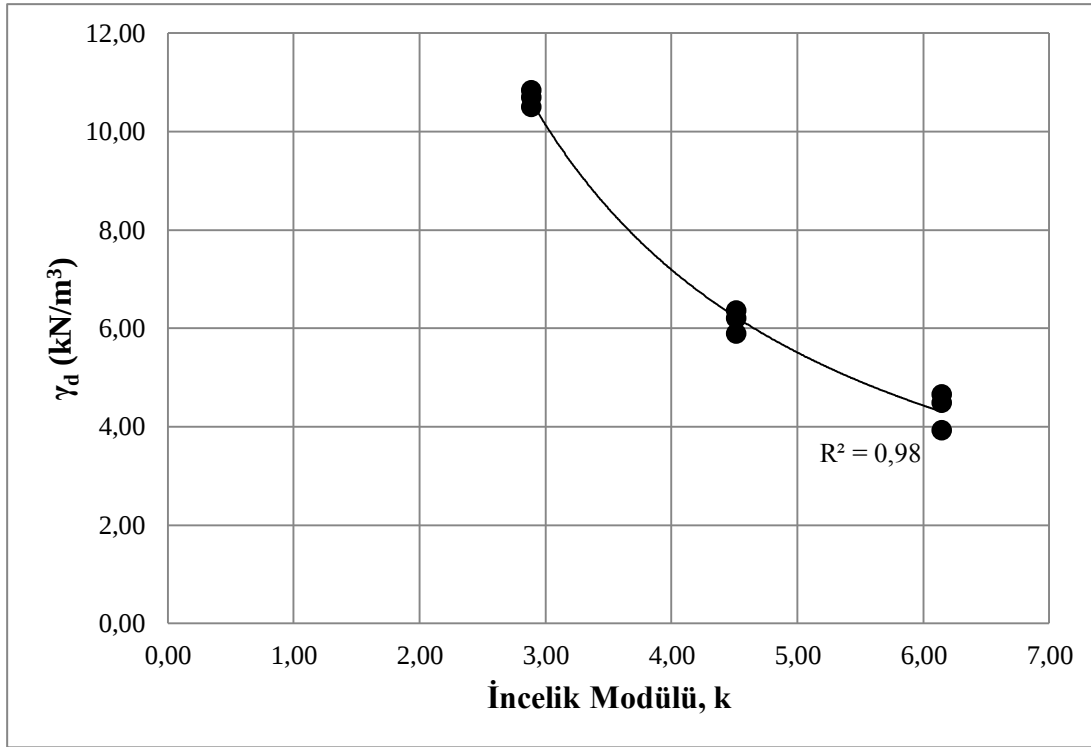
Çizelge 5.1 : Cam köpüğü granülometrelerine ait incelik modülleri.

Elek Açıklığı (mm)	Elek Altında Kalan Malzeme Miktarı (%)			Elek Üstünde Kalan Malzeme Miktarı (%)		
	No 1	No 2	No 3	No 1	No 2	No 3
9,52	48,0	74,0	100,0	52,0	26,0	0,0
4,76	23,0	61,0	100,0	77,0	39,0	0,0
2,38	6,0	50,5	95,0	94,0	49,5	5,0
1,19	3,0	37,0	69,0	97,0	63,0	31,0
0,59	2,5	19,0	36,0	97,5	81,0	64,0
0,297	2,0	6,0	10,0	98,0	94,0	90,0
0,149	0,8	1,0	1,3	99,2	99,0	98,7
			Toplam	614,70	451,50	288,70
			İncelik Modülü (k)	6,15	4,52	2,89

5.1.1 Cam köpüğü granülometrisinin karışımın birim hacim ağırlığına etkisi

Şekil 5.1'de verilmiş grafik karışımlarda kullanılan granülometrelerin incelik modülü değerleri ile karışımların birim hacim ağırlıkları arasındaki korelasyonları göstermektedir. İncelik modülündeki artış karışımın birim hacim ağırlığında azalmaya yol açmıştır. Grafikte çizilmiş ince çizgi, karışımların birim hacim ağırlığının regresyon eğrisi olup belirli incelik modüllerinde cam köpüğü kullanılarak üretilmiş karışımların birim hacim ağırlık değerlerini vermektedir. Regresyonun determinasyon katsayısı R^2 'nin değeri 0,98'dir. Karışımda kullanılan cam köpüğü granülometrisinin incelik modülü ile karışımın birim hacim ağırlığı arasında elde edilen bağıntı da Denklem 5.1'de verilmiştir. Bu bağıntıda k , karışımda kullanılan cam köpüğü granülometrisinin incelik modülü olup γ_d ise karışımın kN/m^3 cinsinden birim hacim ağırlığı değeridir.

$$\gamma_d = 37,63k^{-1,19} \quad (5.1)$$



Şekil 5.1 : Karışımın birim hacim ağırlığının incelik modülü ile değişimi

5.1.2 Cam köpüğü granülometrisinin karışımın serbest basınç dayanımına etkisi

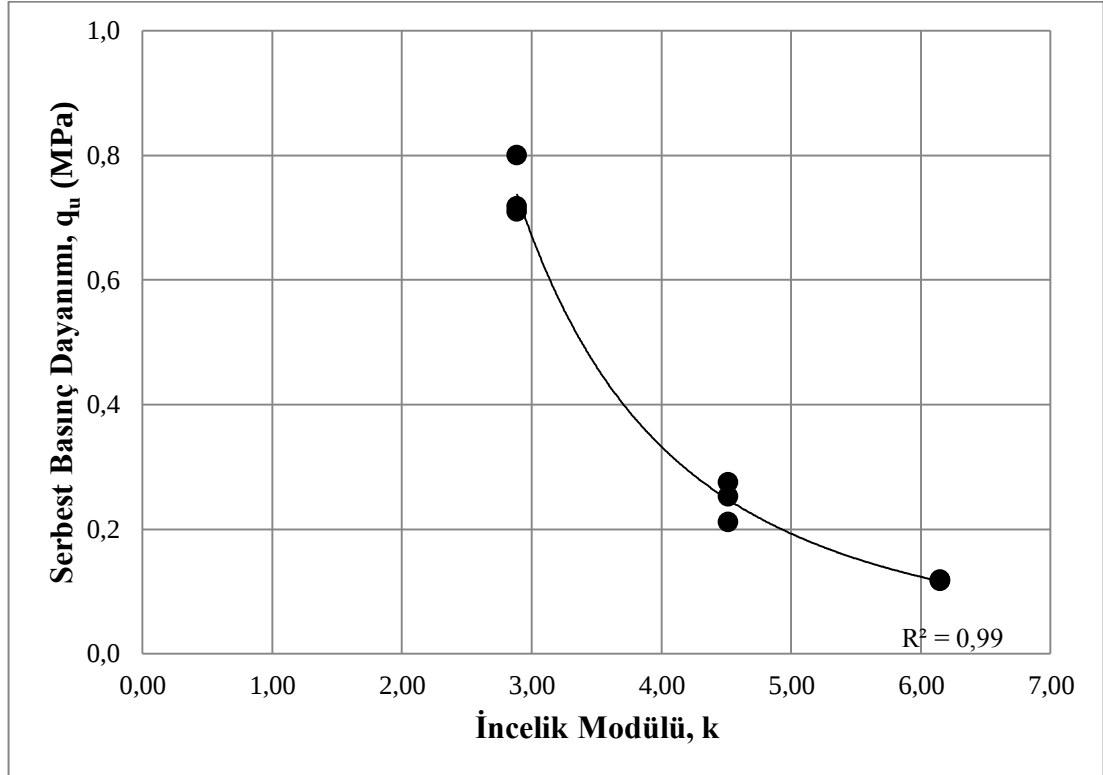
Şekil 5.2’de verilmiş grafik karışımlarda kullanılan granülometrelerin incelik modülü değerleri ile karışımların serbest basınç dayanımı arasındaki korelasyonları göstermektedir. İncelik modüllerindeki artış karışımların serbest basınç dayanımlarında azalmalara yol açmıştır. Grafikte çizilmiş ince çizgi, karışımların serbest basınç dayanımının regresyon eğrisi olup belirli incelik modüllerinde cam köpüğü kullanılarak üretilmiş karışımların serbest basınç dayanımı değerini vermektedir. Regresyonun determinasyon katsayısı R^2 ’nin değeri 0,99’dur. Karışımında kullanılan cam köpüğü granülometrisinin incelik modülü ile karışımın serbest basınç dayanımı arasında elde edilen bağıntı da Denklem 5.2’de verilmiştir. Bu bağıntıda k , karışımlarda kullanılan cam köpüğü granülometrisinin incelik modülü olup q_u ise karışımların MPa cinsinden serbest basınç dayanımı değeridir.

$$q_u = 9,83k^{-2,44} \quad (5.2)$$

5.2 Kum Oranının Karışıma Etkisi

Cam köpüğü gibi boşluklu bir malzemeye oranla daha yüksek birim hacim ağırlığa sahip olan kumun karışımlara eklenmesi tahmin edileceği gibi karışımın birim hacim ağırlığında artışa sebep olacaktır. Bunun nedeni, rölatif olarak cam köpüğüne oranla

daha ağır bir malzeme olan kumun karışımlarda yer almasının yanında çalışmada toplam granüler malzeme oranı sabit tutulduğundan kum oranındaki artışın aynı zamanda cam köpüğü miktarında da bir azalışa yol açmasıdır. Karışımlarda kum oranının arttırılıp cam köpüğü miktarının azaltılması numunelerde daha az boşluk, boşluklar arasında da daha fazla granüler malzeme (kumun tane boyutu köpüğe göre küçük olduğundan karışımdaki olası boşlukları kolayca doldurur) anlamına geldiğinden karışımın birim hacim ağırlığında artış gözlemlenmesi normaldir.



Şekil 5.2 : Karışımın serbest basınç dayanımının incelik modülü ile değişimi.

Karışımlarda kullanılan su miktarı tamamen cam köpüğü kullanılarak üretilen numunelere göre belirlenmiş olup tüm dizaynlarda sabit tutulmuştur. Bunun sebebi numunelerin deney sonuçları üzerinde su/çimento oranının değişmesinden dolayı oluşabilecek etkilerin önlenmesidir. Bu bakımdan kullanılan çimento dozajı toplam granüler malzemeye göre (köpük ve kum malzemeleri) sabitlenip su/çimento oranı da sabit bir değer alınarak tek değişken olarak karışımlarda kullanılan kum/toplam granüler malzeme oranı seçilmiş ve bu oranın karışımlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Su miktarının tamamen cam köpüğü kullanılan karışımlar temel alınarak belirlenmesinin nedeni ise en fazla su ihtiyacının bu karışımlarda gözlemlenmesidir. Karışımlarda kum ve köpük oranları ağırlıkça belirlenmiş olup

köpüğün birim hacim ağırlığı kuma oranla çok daha düşük olduğundan aynı ağırlıktaki köpük kuma oranla çok daha fazla hacim kaplamaktadır. Bu durumda karışımların su ihtiyacı, karışımın birim hacmi içerisinde kapladığı hacim bakımından kuma göre üstünlük sağlayan cam köpüğü malzemesi temel alınarak belirlenmek durumunda kalmıştır. Bu durum, karışımında kullanılan kum miktarı arttırıldıkça, azalan köpük hacmine bağlı olarak su içeriğinin fazla gelmesine sebep olmuştur. Bunun nedeni daha önce de belirtildiği gibi köpüğe göre yüksek bağlı birim hacim ağırlığa sahip kum malzemesinin düşük hacimlerde kullanılmasının bir sonucu olarak kumun köpüğe kıyasla bünyesinde çok daha az su tutabilmesidir. Bunun sonucunda kum yüzdesi yüksek bileşimlerde, karışımında mevcut olan fazla su içeriğinden dolayı bir takım ayrışma problemleri yaşanmıştır. Karıştırılma sırasında Şekil 5.3'te de açıkça görülen ayrışma problemleri, uygulamada kullanılmak üzere yüksek kum içeriğine sahip dizaynlar seçildiği takdirde dikkate alınmalı ve karışımın su içeriği kullanılan kum miktarına göre azaltılmalıdır. Bu tecrübelerden yararlanılarak çalışmanın ilerleyen bölümlerinde kullanılmasına karar verilen dizayn, su/çimento miktarı bakımından modifiye edilmiş ve çalışmalara bu şekilde devam edilmiştir.



Şekil 5.3 : Kum oranı artışı ile beraber meydana gelen ayrışma problemi

5.2.1 Kum/cam köpüğü oranının karışımın birim hacim ağırlığına etkisi

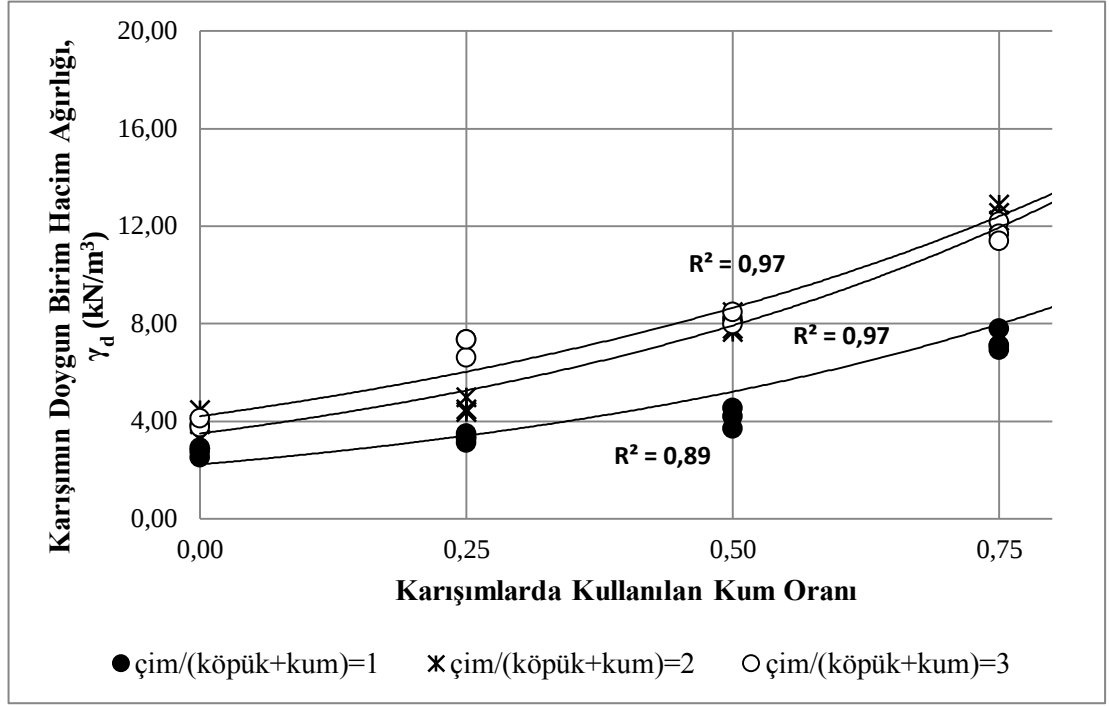
Şekil 5.4'de verilmiş grafik çimento/granüler malzeme oranları 1, 2 ve 3 olan karışımlarda kum/cam köpüğü oranı ile karışımların birim hacim ağırlığı arasındaki korelasyonları göstermektedir. Kum oranındaki artış karışımların birim hacim ağırlığını da arttırmıştır. Grafikte çizilmiş ince çizgiler, karışımların birim hacim ağırlıklarının regresyon eğrileri olup belirli kum oranları ile üretilmiş karışımların birim hacim ağırlık değerlerini vermektedir. Regresyonun determinasyon katsayısı R^2 'nin değeri çimento oranı 1 olan karışımlarda 0,89, çimento oranı 2 ve 3 olan karışımlarda ise 0,97'dir. Karışımlarda kullanılan kum oranları ile karışımların birim hacim ağırlıkları arasındaki bağıntılar da çimento oranlarına göre sırasıyla Denklem 5.3, Denklem 5.4 ve Denklem

5.5’de verilmiş olup bu bağıntılarda $K.O$, karışımlarda kullanılan kum/(kum+köpük) oranı olup γ_d ise karışımların kN/m^3 cinsinden birim hacim ağırlığı değeridir.

$$\gamma_d = 2,23e^{1,70(K.O)} \quad (5.3)$$

$$\gamma_d = 3,49e^{1,64(K.O)} \quad (5.4)$$

$$\gamma_d = 4,21e^{1,44(K.O)} \quad (5.5)$$



Şekil 5.4 : Karışımın birim hacim ağırlığının kum oranıyla değişimi

Değişik kum oranları kullanılarak hazırlanan kum-köpük-çimento numunelerinin deneysel sonuçları birim ağırlık çerçevesinde değerlendirildiğinde bütün çimento oranları için kum oranları %50 ve altında olan numunelerin birim hacim ağırlıklarının $9,81 \text{ kN/m}^3$ 'ü geçmediği ve hedeflenen hafifliği sağladığı görülmüştür.

5.2.2 Kum/cam köpüğü oranının karışımın serbest basınç dayanımına etkisi

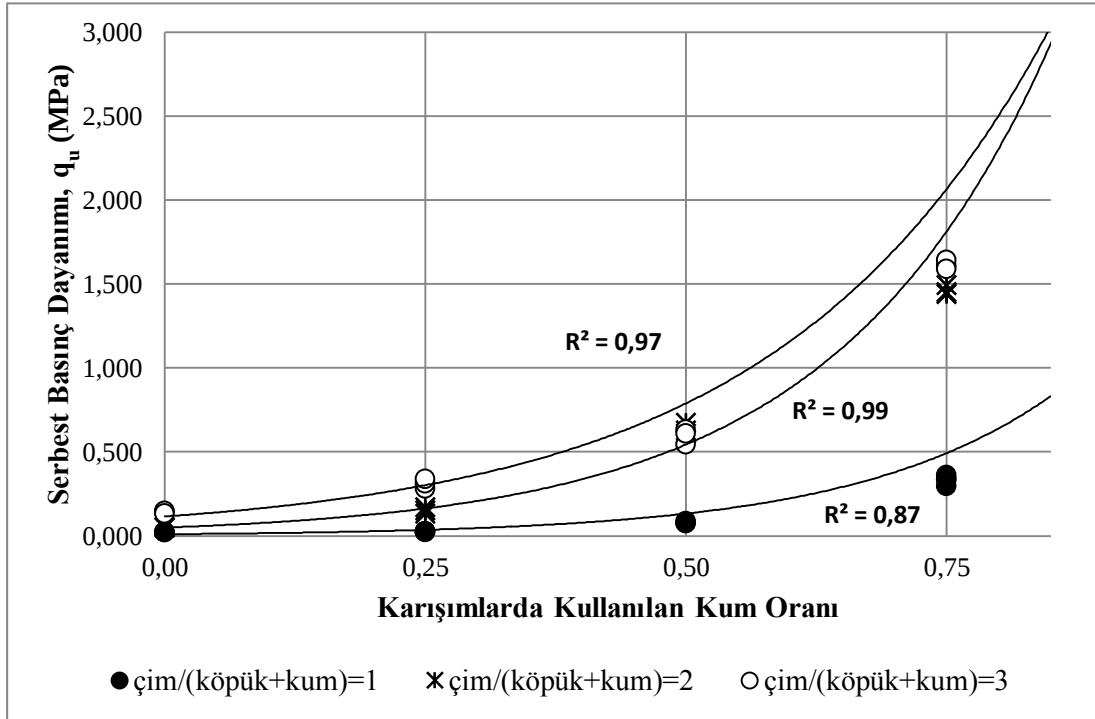
Şekil 5.5'te verilmiş grafik çimento/granüler malzeme oranları 1, 2 ve 3 olan karışımlarda kum/cam köpüğü oranı ile karışımların serbest basınç dayanımı arasındaki korelasyonu göstermektedir. Kum oranındaki artış karışımların serbest basınç dayanımını da arttırmıştır. Grafikte çizilmiş ince çizgiler, karışımların serbest basınç dayanımlarının regresyon eğrileri olup belirli kum oranları ile üretilmiş karışımların serbest basınç dayanımı değerlerini vermektedir. Regresyonun determinasyon katsayısı R^2 'nin değeri çimento oranı 1 olan karışımlarda 0,87, çimento oranı 2 olan karışımlarda

0,99, çimento oranı 3 olan karışımlarda ise 0,97'dir. Karışımlarda kullanılan kum oranları ile karışımların serbest basınç dayanımları arasındaki bağıntılar da çimento oranlarına göre sırasıyla Denklem 5.6, Denklem 5.7 ve Denklem 5.8'de verilmiştir. Bu bağıntılarda $K.O$, karışımlarda kullanılan kum/(kum+köpük) oranı olup q_u ise karışımların MPa cinsinden serbest basınç dayanımı değeridir.

$$q_u = 0,01e^{5,25(K.O)} \quad (5.6)$$

$$q_u = 0,05e^{4,81(K.O)} \quad (5.7)$$

$$q_u = 0,12e^{3,85(K.O)} \quad (5.8)$$



Şekil 5.5 : Karışımın serbest basınç dayanımının kum oranıyla değişimi

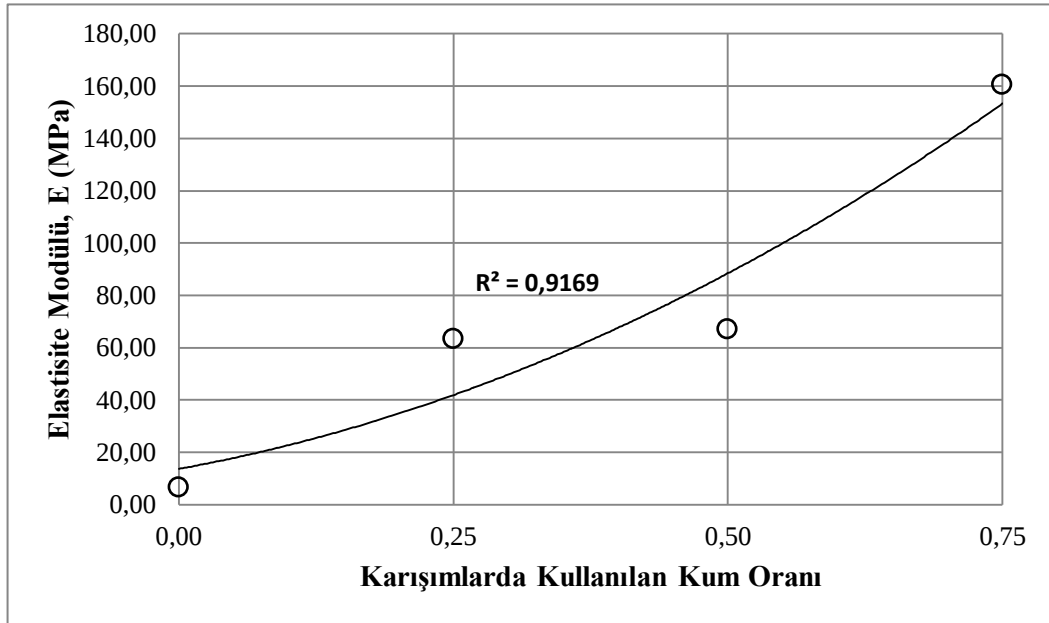
Değişik kum oranları kullanılarak hazırlanan kum-köpük-çimento numunelerinin deneysel sonuçları dayanım çerçevesinde değerlendirildiğinde çimento-köpük karışımları %50 oranında kum kullanılarak güçlendirildiğinde serbest basınç dayanım değerlerinin ortalama 0,60 MPa'a yükseldiği görülmüştür. İyi sıkıştırılmış doğal bir zeminin serbest basınç dayanımının yaklaşık iki katı olan bu değer göze alındığında kum kullanılarak köpük-çimento kompozitlerinin dayanımlarının başarılı bir şekilde iyileştirildiği söylenebilir.

5.2.3 Kum/cam köpüğü oranının karışımın elastisite ve kayma modülüne etkisi

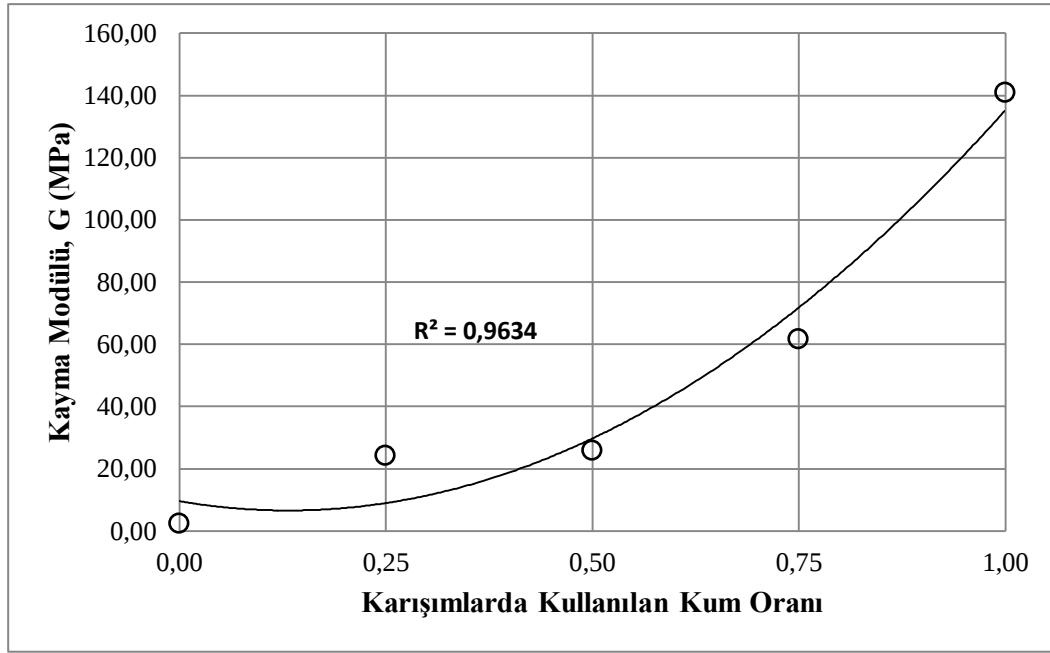
Şekil 5.6’da verilmiş grafik çimento/granüler malzeme oranı 2 olan karışımlarda kum/cam köpüğü oranı ile karışımların elastisite modülleri arasındaki korelasyonu, Şekil 5.7 ise çimento/granüler malzeme oranı 2 olan karışımlarda kum/cam köpüğü oranı ile karışımların kayma modülleri arasındaki korelasyonu göstermektedir. Kum oranındaki artış karışımların elastisite ve kayma modüllerini arttırmıştır. Grafiklerde çizilmiş ince çizgiler, karışımların elastisite ve kayma modüllerinin regresyon eğrileri olup belirli kum oranları ile üretilmiş karışımların elastisite/kayma modülü değerlerini vermektedir. Regresyonun determinasyon katsayısı R^2 ’nin değeri elastisite modülü için 0,92, kayma modülü için 0,96’dır. Karışımlarda kullanılan kum oranları ile karışımların elastisite ve kayma modülleri arasındaki bağıntılar da sırasıyla Denklem 5.9 ve Denklem 5.10’da verilmiştir. Bu bağıntılarda $K.O$, karışımlarda kullanılan kum/(kum+köpük) oranı olup E karışımların MPa cinsinden elastisite modülü, G ise karışımların MPa cinsinden kayma modülü değeridir.

$$E = 146,55(K.O)^2 + 76,25 (K.O) + 13,68 \quad (5.9)$$

$$G = 170,63(K.O)^2 - 44,95 (K.O) + 9,55 \quad (5.10)$$



Şekil 5.6 : Çimento/(kum+cum köpüğü oranı) = 2 olan karışımların elastisite modüllerinin kum oranıyla değişimi



Şekil 5.7 : Çimento/(kum+cam köpüğü oranı) = 2 olan karışımların kayma modüllerinin kum oranıyla değişimi

5.3 Çimento Oranının Karışıma Etkisi

Karışımlarda çimento oranı kullanılan toplam granüler malzemeye yani cam köpüğü ve kum malzemelerinin toplam miktarına göre belirlenmiştir. Karışımlarda kullanılan suyun miktarı ise kullanılan çimento miktarına göre sabitlenmiş ve böylece su/çimento oranının dayanıma ve diğer karışım özelliklerine etki etmesi engellenmiştir. Önceki kısımlarda açıklandığı üzere çimento miktarının toplam granüler malzemeye oranı 1, 2 ve 3 olarak seçilmiş ve her çimento oranı için değişik kum oranları ile gerçekleştirilen üretimler tekrarlanmıştır. Kısaca her birinde farklı kum oranının kullanıldığı 5 gruptan oluşan üç deney seti oluşturulmuş olup setlerde kullanılan ağırlıkça çimento oranları granüler malzemeye oranla 1, 2 ve 3 olarak seçilmiştir. Her deney grubu için üçer numune üretilmiştir. Üretilen numunelerde kullanılan malzeme oranları ayrıntılı olarak Çizelge 4.8’de verilmiştir.

5.3.1 Çimento oranının karışımın birim ağırlığına etkisi

Şekil 5.8’de verilmiş grafik değişik kum oranları kullanılarak üretilmiş olan karışımlarda çimento/(köpük+kum) oranı ile karışımların birim hacim ağırlığı arasındaki korelasyonları göstermektedir. Çimento oranı değişimi düşük oranda çimento kullanımının söz konusu olduğu durumlarda karışımların birim hacim ağırlığını da etkilemiştir. Grafikte çizilmiş ince çizgiler, karışımların birim hacim ağırlıklarının

regresyon eğrileri olup belirli çimento oranları ile üretilmiş karışımların birim hacim ağırlık değerlerini vermektedir. Regresyonun determinasyon katsayısı R^2 'nin değeri kum oranı %0 olan karışımlarda 0,71, kum oranı %25 olan karışımlarda 0,93, kum oranı %50 olan karışımlarda 0,86, kum oranı %75 olan karışımlarda 0,80, kum oranı %100 olan karışımlarda 0,93 olarak elde edilmiştir. Karışımlarda kullanılan çimento oranları ile karışımların birim hacim ağırlıkları arasındaki bağıntılar da kum oranlarına göre sırasıyla Denklem 5.11, Denklem 5.12, Denklem 5.13, Denklem 5.14 ve Denklem 5.15'te verilmiş olup bu bağıntılarda Ç.O , karışımlarda kullanılan çimento/(kum+köpük) oranı, γ_d ise karışımların kN/m^3 cinsinden birim hacim ağırlığı değeridir.

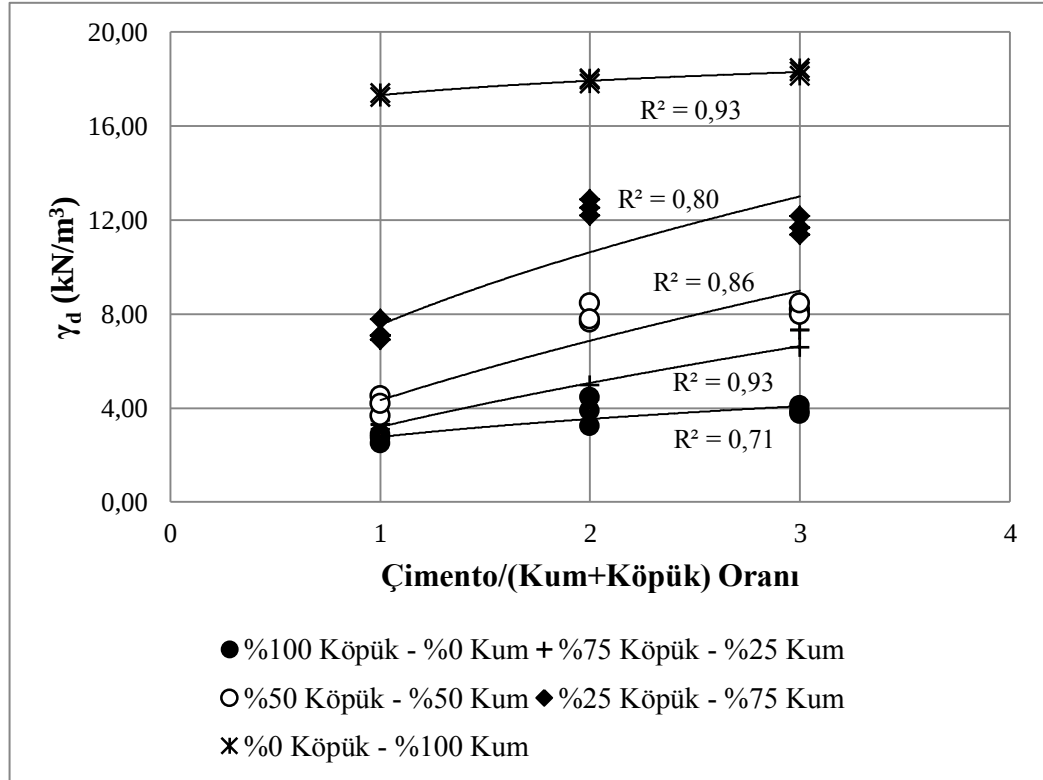
$$\gamma_d = 2,77(\text{Ç.O})^{0,35} \quad (5.11)$$

$$\gamma_d = 3,20(\text{Ç.O})^{0,66} \quad (5.12)$$

$$\gamma_d = 4,33(\text{Ç.O})^{0,67} \quad (5.13)$$

$$\gamma_d = 7,53(\text{Ç.O})^{0,50} \quad (5.14)$$

$$\gamma_d = 17,31(\text{Ç.O})^{0,05} \quad (5.15)$$



Şekil 5.8 : Karışımın birim hacim ağırlığının çimento oranıyla değişimi

Değişik çimento oranları ile hazırlanan kum-köpük-çimento numunelerinin deneysel sonuçları birim hacim ağırlık çerçevesinde değerlendirildiğinde köpük kullanılmayan

karışımlarda çimento oranının birim ağırlığa etkisinin köpük kullanılan karışımlara göre oldukça az olduğu gözlemlenmiştir. Kullanılan çimento oranı arttıkça çimento oranının birim ağırlığa etkisi azalmıştır.

5.3.2 Çimento oranının karışımın serbest basınç dayanımına etkisi

Şekil 5.9’da verilmiş grafik değişik kum oranları kullanılarak üretilmiş olan karışımlarda çimento/(köpük+kum) oranı ile karışımların serbest basınç dayanımı arasındaki korelasyonları göstermektedir. Çimento oranındaki artış karışımların serbest basınç dayanımını da arttırmıştır. Grafikte çizilmiş ince çizgiler, karışımların serbest basınç dayanımlarının regresyon eğrileri olup belirli çimento oranları ile üretilmiş karışımların serbest basınç dayanımını vermektedir. Regresyonun determinasyon katsayısı R^2 ’nin değeri kum oranı %0 olan karışımlarda 0,96, kum oranı %25 olan karışımlarda 0,99, kum oranı %50 olan karışımlarda 0,84, kum oranı %75 olan karışımlarda 0,91, kum oranı %100 olan karışımlarda 0,93 olarak elde edilmiştir. Karışımlarda kullanılan çimento oranları ile karışımların serbest basınç dayanımları arasındaki bağıntılar da kum oranlarına göre sırasıyla Denklem 5.16, Denklem 5.17, Denklem 5.18, Denklem 5.19 ve Denklem 5.20’de verilmiştir. Bu bağıntılarda $\bar{C.O}$, karışımlarda kullanılan çimento/(kum+köpük) oranı olup q_u ise karışımların MPa cinsinden serbest basınç dayanımı değeridir.

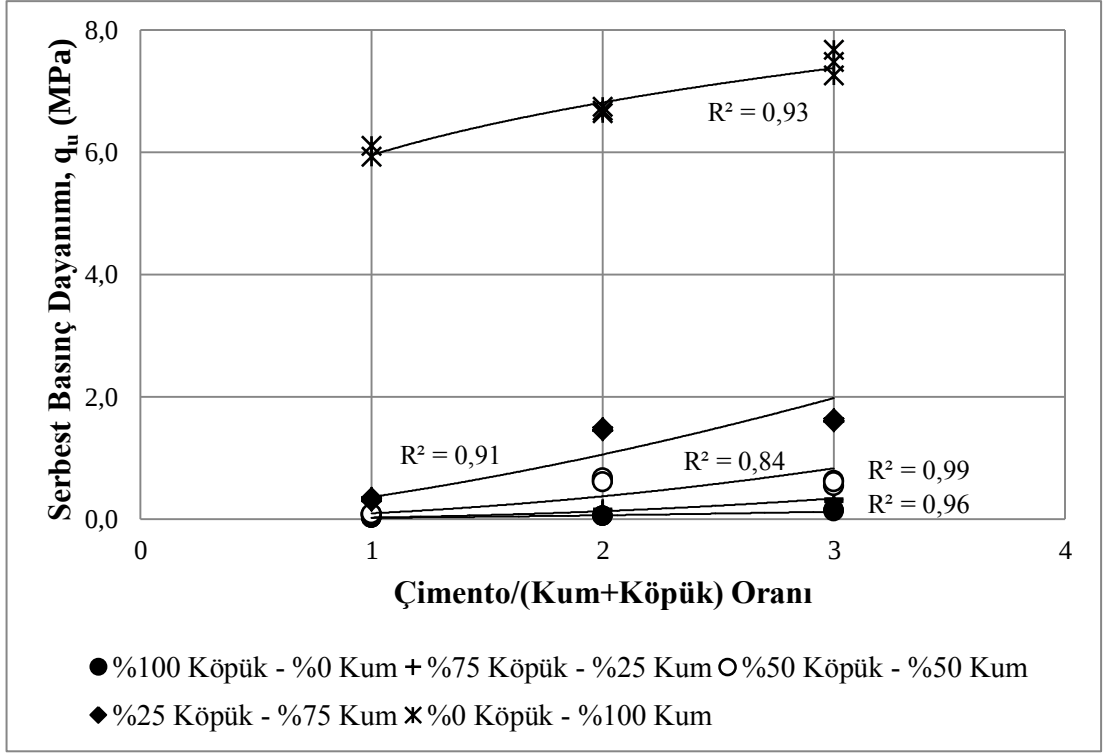
$$q_u = 0,02(\bar{C.O})^{1,67} \quad (5.16)$$

$$q_u = 0,03(\bar{C.O})^{2,37} \quad (5.17)$$

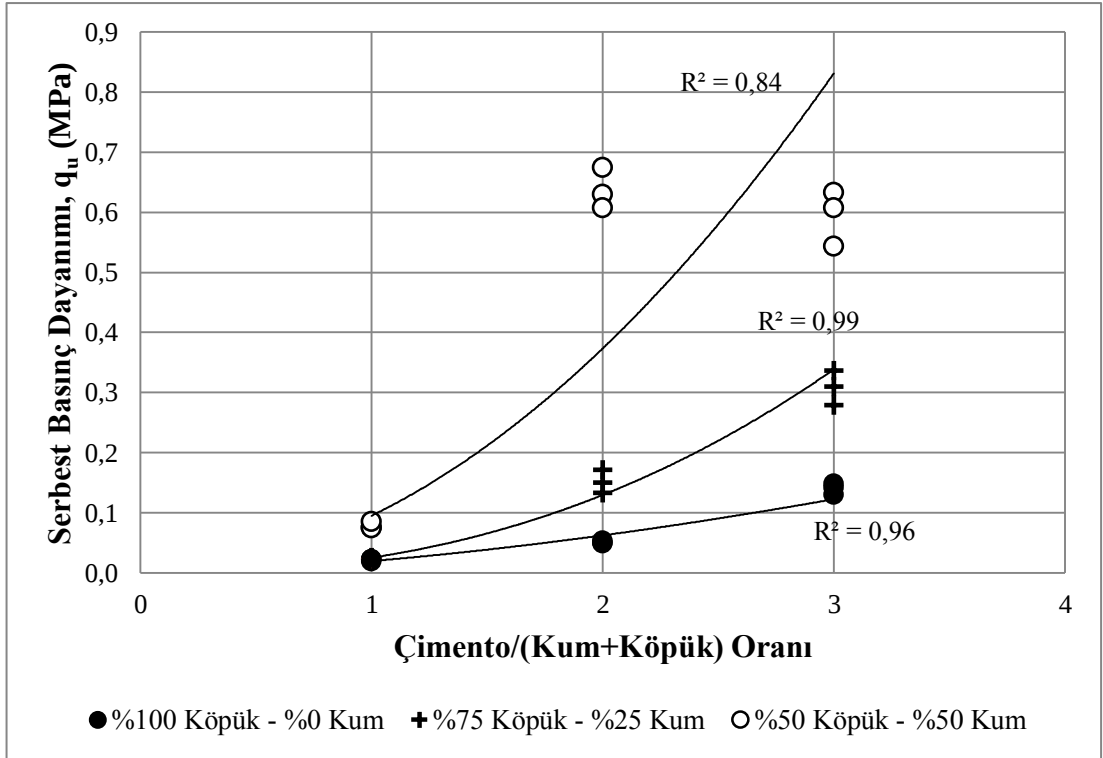
$$q_u = 0,10(\bar{C.O})^{1,97} \quad (5.18)$$

$$q_u = 0,36(\bar{C.O})^{1,55} \quad (5.19)$$

$$q_u = 5,96(\bar{C.O})^{0,20} \quad (5.20)$$



(a)



(b)

Şekil 5.9 : Karışımın serbest basınç dayanımının çimento oranıyla değişimi:
 (a) tüm kum oranlarının birlikte gösterimi. (b) kum oranları %0 ile %50 arasında olan karışımlar.

6. SONUÇLAR

Endüstriyel gelişmelere paralel olarak tüketimdeki artış beraberinde çevresel problemleri de getirmiş olup bu problemlerin bir kolunu da katı atık maddeler oluşturmaktadır. Tüm gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde katı atıklar sosyal, ekonomik ve çevresel sorunların en büyüğünü oluşturmaktadır. Bu atıkların bir bölümü geri kazanılabilir atıklar olup çeşitli işlemlerle tekrar kullanıma sunulabilirler. Ülkemizde bu tür atıkların önemli bir bölümünü cam atıklar oluşturmaktadır (DPT, 2001a). Cam atıklardan elde edilip çeşitli yapısal uygulamalarda kullanılan malzemelerden bir tanesi de cam köpüğüdür. Genel olarak termal ve akustik yalıtım malzemesi olarak kullanılan cam köpüğünün boşluklu ve hafif yapısı bu malzemeyi hafifliğin ön planda olduğu geoteknik uygulamalar için potansiyel bir dolgu malzemesi haline getirmektedir.

Hafif dolgu malzemeleri geoteknik mühendisliğinde çok yumuşak zeminler üzerinde hafif dolgular oluşturarak oturma ve taşıma gücü problemlerinin çözümünde, heyelan ve kayma potansiyeli yüksek şevler üzerinde dolgu teşkil edilmesinde dayanma yapılarına gelen itkilerin azaltılmasında kullanılmaktadır.

Bu çalışmada cam köpüğü malzemesinin hafif dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği üzerinde durulmuş çalışmada kullanılan cam köpüğünün tek başına kullanıldığı takdirde sürtünme etkisine olan dayanıksızlığı nedeniyle cam köpüğünün çimento ile desteklenerek kullanma yoluna gidilmiştir. Bu amaçla mevcut literatürde yapılan araştırmalar sonucunda cam köpüğünün kontrollü düşük dayanımlı malzemeler olarak adlandırılan genelde sıkıştırılmış dolguya alternatif olarak geri dolgu biçiminde kullanılan, kendiliğinden yerleşen, çimentolu kompozit malzemelere ham madde olabileceği düşünülmüştür.

Kontrollü düşük dayanımlı malzemeler (KDDM), basınç dayanımı 8,3 MPa'ı geçmeyen malzemelerdir ve güncel KDDM uygulamalarının çoğunda serbest basınç dayanımı 2,1 MPa'ı aşmamaktadır. Düşük dayanım kriteri malzemenin gelecek zamanlarda olası bir kazı işlemine elverişli olması bakımından gereklidir. Geleneksel KDDM karışımları genellikle su, portland çimentosu, uçucu kül veya benzeri

malzemeler ile agregaların kullanıldığı karışımlardan oluşmaktadır. Bu çalışmada hafif ancak dayanım özellikleri bakımından tek başına yetersiz bir malzeme olan cam köpüğünün kontrollü düşük dayanımlı malzeme karışımlarında hammadde olarak kullanılıp bu karışımların birim hacim ağırlıklarını düşürmede başka bir deyişle karışımları hafifletmede kullanılıp kullanılamayacağı üzerinde durulmuştur.

Tasarlanan kompozit zemin dolgusunun bir haftalık dayanımının 0,7 MPa'ın üzerinde olması hedeflenmiş öte yandan gelecek zamanlarda kompozit zemin üzerinde gerçekleştirilecek olası bir kazı işlemi de hesaba katılarak 28 günlük dayanım değerinin de 1,0 MPa'ı geçmemesi amaçlanmıştır.

Hedeflenen karışımın elde edilmesine yönelik çalışmalara paralel olarak kullanılan cam köpüğü granülometrisinin ve cam köpüğünün yanında karışımlarda belli oranlarda kum kullanmanın karışımın birim ağırlık ve dayanım özelliklerine olan etkisi de araştırılmıştır. Üretilen numuneler üzerinde birim hacim ağırlık, serbest basınç, permeabilite ve CBR deneyleri yapılarak cam köpüğü kullanılarak üretilmiş kontrollü düşük dayanımlı hafif malzemenin bazı mühendislik özellikleri belirlenmiştir.

Değişik kum oranları kullanılarak üretilen karışımların 7 günlük deney sonuçları incelendiğinde optimum sonuçları çimento/(kum+köpük) oranı 2 olan ve granüler malzeme olarak yarı yarıya cam köpüğü ve kum içeren numunelerin verdiği gözlemlenmiştir..

Sonuç olarak elde edilen karışımın ortalama doymuş birim hacim ağırlığı $8,83 \text{ kN/m}^3$, 7 günlük serbest basınç dayanımı değeri ortalama olarak 0,75 MPa, 28 günlük ortalama serbest basınç dayanımı ise 0,91 MPa olarak bulunmuştur. Elastisite modülleri 7 günlük numunelerde 131,2 MPa, 28 günlük numunelerde ise 205,3 MPa olarak ölçülmüştür. Kayma modülleri ise 50,4 ve 79,0 MPa olarak hesaplanmıştır. Karışımın 7 günlük CBR değeri 38,4; 28 günlük CBR değeri ise 78,9'dur. Bu değerlerden karışımın temel veya alt temel uygulamaları için yeterli olduğu söylenebilir. Karışım permeabilite katsayısı, k , yapılan sabit seviyeli permeabilite deneyleri ile 7 günlük numunelerde $7,28 \times 10^{-3} \text{ cm/sn}$, 28 günlük numunelerde $7,05 \times 10^{-3} \text{ cm/sn}$ olarak belirlenmiştir.

Belirlenen cam köpüğü – kum – çimento karışımı üzerinde yapılan deney sonuçları, diğer hafif dolgu malzemelerinin fiziksel ve mühendislik özellikleriyle karşılaştırmak

üzere Çizelge 6. l’de verilmiştir. Diğer hafif dolgu malzemeleriyle karşılaştırıldığında cam köpüğü – kum – çimento karışımının daha yüksek serbest basınç dayanımına ve CBR değerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca karışım diğer hafif dolgu malzemelerine göre daha yüksek bir geçirimsizliğe sahiptir.

Çizelge 6.1 : Cam Köpüğü – Kum – Çimento kullanılarak üretilmiş KDDM karışımının diğer hafif dolgu malzemeleri ile karşılaştırılması

Özellikler	Genleşmiş Polistren Köpük	Volkanik Kül - Çimento Köpük Karışımı	OUK - Çimento-Köpük Karışımı (12 nolu Karışım)	Haliç tarama çamuru-çimento-köpük karışımı (7 nolu karışım)	Cam Köpüğü-Kum-Çimento kullanılarak üretilmiş KDDM
	(	Haşal, 2000	)	(Horoz, 2007)	
Basınç Dayanımı (kPa)	(20 - 100)* (70 - 190)**	150 ⁽¹⁾ 350 ⁽²⁾	200 ⁽¹⁾ 500 ⁽²⁾	135 ⁽¹⁾ 230 ⁽²⁾	750 ⁽¹⁾ 910 ⁽²⁾
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	0,15 - 0,30	11,00	5,20 - 5,60	14,30	8,83 ⁽¹⁾ 8,95 ⁽²⁾
Proje Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	1,00	-	6,00	11,00 - 15,00 arası	-
Permeabilite Katsayısı, k (cm/sn)		(2,1 × 10 ⁻⁴) ⁽²⁾	(1,23x10 ⁻⁶) ⁽¹⁾ (1,45x10 ⁻⁷) ⁽²⁾	(2,27x10 ⁻⁶) ⁽²⁾	(7,28x10 ⁻³) ⁽¹⁾ (7,05x10 ⁻³) ⁽²⁾
CBR (%)	< 2	10,7 ⁽²⁾	2,5 ⁽¹⁾ (alt) 6,5 ⁽¹⁾ (üst) 6,4 ⁽²⁾ (alt) 12 ⁽²⁾ (üst)	6,45 ⁽¹⁾ 8,4 ⁽²⁾	38,4 ⁽¹⁾ 78,9 ⁽²⁾

Not: KDDM karışımında malzeme oranları ağırlıkça: çimento/(köpük+kum) = 2 kum/köpük = 1
su/çimento = 0,45

(*) % 1 deformasyonda (**) % 10 deformasyonda

(1) Üretimden sonra 7 gün

(2) Üretimden sonra 28 gün

Cam köpüğü – kum – çimento kullanılarak üretilmiş KDDM karışımı, çok yumuşak ve konsolidasyonu devam eden zeminler üzerinde hafif dolgular oluşturularak oturma ve taşıma gücü problemlerinin çözümünde, kayma potansiyeli yüksek şevler üzerinde dolgu teşkil edilmesinde, dayanma yapılarına gelen itkilerin azaltılmasında kullanılabilir. Bu karışımın kullanıldığı uygulamalarda yanal basınçlar, karışımın hafifliği katılaştıktan sonra kendisini tutabilme özelliği sayesinde azalacaktır. Karışımın birim hacim ağırlığı doğal zeminlerin birim hacim ağırlığının yarısından daha az olduğu için dolgu olarak kullanılması halinde alttaki zeminde oluşacak düşey basıncı doğal dolgu malzemelerine göre yarıya indirecektir. Ayrıca cam köpüğünün gözenekli yapısının karışıma kazandırmış olduğu drenaj özelliği cam köpüğü kullanılarak üretilmiş KDDM karışımlarının sürekli olarak yağmur ve kar suları ile

karşı karşıya kalan kaldırım ve yol alt yapılarında kullanımını da avantajlı hale getirmektedir.

KAYNAKLAR

- AASHTO Guide for Design of Pavement Structures**, 1986. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- ACI**, 2000. Cement and Concrete Terminology, ACI 116R-00 Committee Report.
- ACI**, 1999. Controlled Low-Strength Materials, ACI 229R-99 Committee Report.
- ACI**, 2009. Report on Soil Cement, ACI 230.1R-09 Committee Report .
- ACI**, 2006. Guide for Cast-in-Place Low-Density Cellular Concrete, ACI 523.R Committee Report.
- Adaska, W. S.**, 1997. Controlled Low-Strength Materials, Concrete International, Vol. 19, No: 4, pp. 41-43.
- Adaska, W. S., ed.**, 1994. Controlled Low-Strength Materials, SP-150, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 113.
- American National Standard for Polyethylene Encasement for Ductile Iron Piping for Water and Other Liquids**, 1988. ANSI/AWWA C105/A21.5-88, AWWA, Denver, pp. 7.
- Bowles, J.E.**, 1988. Engineering Properties of Soils and Their Measurement, McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- Buss, W. E.**, 1989. Iowa Flowable Mortar Saves Bridges and Culverts, Transportation Research Record 1234, Concrete and Construction New Developments in Management TRB National Research Council, Washington, D.C.
- Celis III, W.**, 1997. Mines Long Abandoned to Dark Bringing New Dangers to Light, USA Today, Mar. 24.
- Das, B. M.**, 2006. Principles of Geotechnical Engineering, Sixth Edition, Nelson Press, Thompson Canada Limited.
- Dolance, R. C., and Giovannitti, E. F.**, 1997. Utilization of Coal Ash/Coal Combustion Products for Mine Reclamation, Proceedings of the American Power Conference, Vol. 59-II, pp. 837-840.
- DPT**, 2001a VIII. Beş Yıllık Kalkınma Planı İçme Suyu, Kanalizasyon, Arıtma Sitemler ve Katı Atık Denetimi İhtisas Komisyonu, Katı Atık Denetimi Alt Komisyonu Raporu, DPT Yayınları, Ankara.
- DPT**, 2001b VIII. Beş Yıllık Kalkınma Planı Taş ve Toprağa Dayalı Ürünler Sanayi Özel İhtisas Komisyonu Raporu (Cam sanayii) DPT Yayınları, Ankara.
- Emery, J. and Johnston, T.**, 1986. Unshrinkable Fill for Utility Cut Restorations, Concrete in Transportation, SP-93, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 187-212.

- Flechsigt, J. L.**, 1990. Downtown Seattle Transit Project, International Symposium on Unique Underground Structures, Denver, June 1990.
- Fox, T. A.**, 1989. Use of Coarse Aggregate in Controlled Low-Strength Materials, Transportation Research Board 1234.
- Frydenlund, T. E. and Aab  , R.**, 2002. Use of Waste Materials For Lightweight Fills, Proceedings of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials, March 26-27, Tokyo – Japan, pp. 269-277.
- Glogowski, P. E. and Kelly, J. M.**, 1988. Laboratory Testing of Fly Ash Slurry, Electric Power Research Institute, EPRI CS-6100, Project 2422-2.
- Golbaum, J., Hook, W. and Clem, D. A.**, 1997. Modification of Bridges with CLSM, Concrete International, Vol. 19, No: 5, May 1997, pp. 44-47.
- Gujarati, D.**, 2008. Temel Ekonometri, Literat  r Yayınları, (  ev.   mit   enesen, G  lay Günlük   enesen).
- Ha  al, M. E.**, 2000. U  ucu K  l –   imento - K  p  k Karı  ımının Hafif Dolgu Malzemesi Olarak Geoteknik   zellikleri, Yüksek Lisans Tezi,   .T.  . Fen Bilimleri Enstit  s  ,   stanbul.
- Hill, J. C. and Sommers, J.**, 1997. Production and Marketing of Flowable Fill Utilizing Coal Combustion Byproducts, Proceedings: 12th International Symposium on Coal Combustion Byproduct (CCB) Management and Use, EPRI TR-107055-V2 3176.
- Hoopes, R. J.**, 1997. Engineering Properties of Air-Modified Controlled Low-Strength Material, The Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (Flowable Fill), ASTM STP 1331, A. K. Howard and J. L. Hitch, eds., ASTM.
- Horoz,   .**, 2007. Hali   Tarama   amuru –   imento - K  p  k Karı  ımının Hafif Dolgu Malzemesi Olarak Geoteknik   zellikleri, Yüksek Lisans Tezi,   .T.  . Fen Bilimleri Enstit  s  ,   stanbul.
- Howard, A. K. and Hitch, J. L., eds.**, 1997. The Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (Flowable Fill), ASTM STP 1331, Symposium on the Design and Application of CLSM (Flowable Fill), St.Louis, Mo., June 19-20.
- Hurley, J.**, 2003. A UK Market Survey For Foam Glass, Research and Development Final Report, The Waste and Resources Action Programme.
- Illinois Ready Mixed Concrete Association**, 1991. Flowable Fill, Illinois Ready Mixed Concrete Association Newsletter.
- Krell, W. C.**, 1989. Flowable Fly Ash, Concrete International, Vol. 11, No: 11, pp. 54-58.
- Landwermyer, J. S. and Rice, E. K.**, 1997. Comparing Quick-Set and Regular CLSM, Concrete International, Vol. 19, No: 5, pp. 34-39.
- Langton, C. A. and Rajendran, N.**, 1995. Chemically Reactive CLSM for Radionuclides Stabilization, ACI Fall Convention, Montreal, Canada.

- Langton, C. A. and Rajendran, N.,** 1995. Utilization of SRS Pond Ash in Controlled Low-Strength Material (U), U.S. Department of Energy Report WSRC-RP-95-1026.
- Larsen, R. L.,** 1990. Sound Uses of CLSM in the Environment, Concrete International, Vol. 12, No: 7, pp. 26-29.
- Larsen, R. L.,** 1988. Use of Controlled Low-Strength Materials in Iowa, Concrete International, Vol. 10, No: 7, pp. 22-23.
- Lowitz, C. A. and Defroot, G.,** 1968. Soil-Cement Pipe Bedding, Canadian River Aqueduct, Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 94, No: C01.
- McLaren, R. J. and Balsamo, N. J.,** 1986. Fly Ash Design Manual for Road and Site Applications; Volume 2: Slurried Placement, Electric Power Research Institute, Research Report No: CS-4419.
- Mineral Strategies Pty Ltd.,** 2005. The Development of Cellular (Foam) Glass Products Utilizing Wasteglass and Specific Industrial Waste Materials - Commercial In Confidence, pp. 9.
- Naik, T. R. and Singh, S.,** 1997. Flowable Slurry Containing Foundry Sands, AE Materials Journal.
- Naik, T. R. and Singh, S.,** 1997. Permeability of Flowable Slurry Materials Containing Foundry Sand and Fly Ash, ASCE Journal of Geotechnical Engineering.
- Naik, T. R., Ramme, B. W. and Kolbeck, H. J.,** 1991. Controlled Low-Strength Material (CLSM) Produced with High-Lime Fly Ash, Proceedings, Shanghai 1991 Ash Utilization Conference, Electric Power Research Institute Publication GS-7388, Vol. 3, pp. 110/1-11.
- Naik, T. R., Ramme, B. W. and Kolbeck, H. J.,** 1990. Filling Abandoned Underground Facilities with CLSM Fly Ash Slurry, Concrete International, Vol. 12, No: 7, pp. 19-25.
- Naik, T. R., Singh, S., Taraniyil, M. and Wendorf, R.,** 1996. Application of Foundry Byproduct Materials in Manufacture of Concrete and Masonry Products, ACI Materials Journal, Vol. 93, No: 1, pp. 41-50.
- Nmai, C. K., McNeal, F. and Martin, D.,** 1997. New Foaming Agent for CLSM Applications, Concrete International, Vol. 19, No: 4, pp. 44-47.
- Onitsuka, K., Shen, J., Hara, Y., Sato, M.,** 2001. Utilization of Foaming Waste Glass as Construction Materials, Recycling and Reuse of Glass Cullet, Tomas Telford Publishing, London, pp. 197.
- Parmar, D.,** 1991. Current Practices for Underground Cable Thermal Backfill, UTTF Meeting, Montreal, Canada.
- Parmar, D.,** 1992. Optimizing the Use of Controlled Backfill to Achieve High Ampacities on Transmission Cable, Proceedings of Power Engineering Society Insulated Conductors Committee.
- Petzrick, P. A.,** 1997. Ash Utilization for Elimination of Acid Mine Drainage, Proceedings of the American Power Conference, Vol. 59-II, pp. 834-836.

- Rajendran, N. and Venkata, R.,** 1997. Strengthening of CMU Wall through Grouting, Concrete International, Vol. 19, No: 5, pp. 48- 49.
- Ramme, B. W.,** 1997. Progress in CLSM: Continuing Innovation, Concrete International, Vol. 19, No: 5, pp. 32-33.
- Ramme, B. W. and Naik, T. R.,** 1997. Controlled Low-Strength Materials (CLSM) State-of-the-Art New Innovations, Supplementary Proceedings of Third CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, Auckland, New Zealand.
- Ramme, B. W., Naik, T. R. and Kolbeck, H. J.,** 1995. Construction Experience with CLSM Fly Ash Slurry for Underground Facilities, Fly Ash, Slag, Silica Fume, and Other Natural Pozzolans, Proceedings, Fifth International Conference, SP-153, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 403–416.
- Saruhan, Ş., Özdemirci, A.,** 2011. Bilim, Felsefe ve Metodoloji, İstanbul, Beta Yayınevi s.190.
- Sato, M., Onitsuka, K., Hara, Y., Momozaki, S.,** 2002. Case Studies On Design and Construction of Lightweight Fill Materials Using Foamed Waste Glass, Proceedings of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials, March 26-27, Tokyo – Japan, pp. 195-201.
- Smith, A.,** 1991. Controlled Low-Strength Material, Concrete Construction, May 1991.
- Soil-Cement Pumped for Unique Siphon Project,** 1986. Rocky Mountain Construction.
- Steinmanis, J. E.,** 1981. Underground Cable Thermal Backfill, Proceedings of the Symposium on Underground Cable Thermal Backfill, Toronto, Canada.
- Straud, Troy F.,** 1989. Corrosion Control Measures for Ductile Iron Pipe, Proceedings of Corrosion 89, Paper 585, 38 pp.
- Suggested Specifications for Controlled Density Fill,** 1992. Washington Aggregates and Concrete Association, Seattle, Wash.
- Sullivan, R. W.,** 1997. Boston Harbor Tunnel Project Utilizes CLSM, Concrete International, V. 19, No. 5, pp. 40-43.
- Tansley, R., and Bernard, R.,** 1981. Specification for Lean Mix Backfill, U.S. Department of Housing and Urban Development, Contract No. H-5208..
- What, Why and How? Flowable Fill Materials,** 1989. National Ready Mixed Concrete Association, CIP17.

EKLER

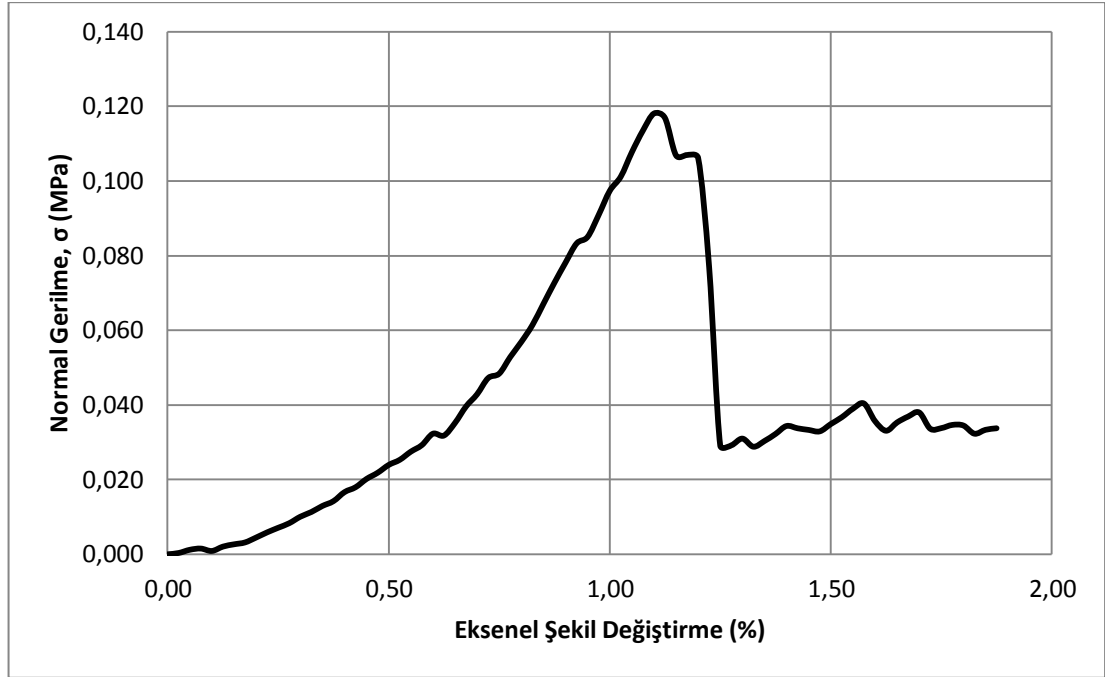
EK A : Serbest Basınç Deneylerinden Elde Edilen Grafikler

EK A.1: Değişik köpük granülometrileri kullanılarak üretilmiş karışımların serbest basınç deneylerinden elde edilen grafikler.

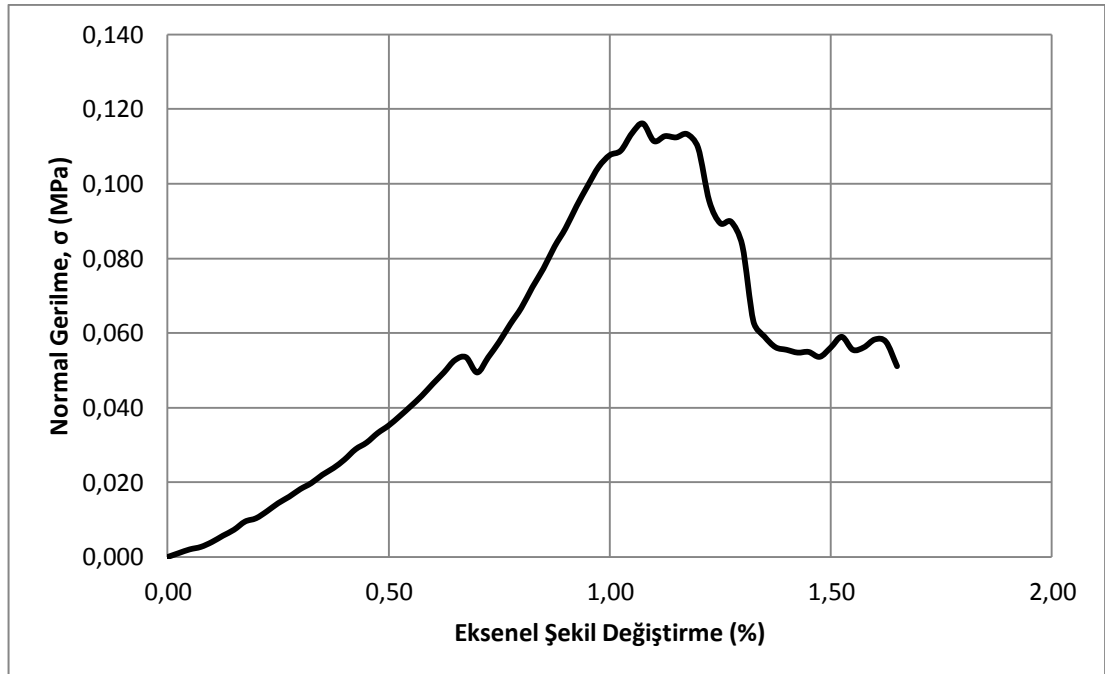
EK A.2: Değişik kum oranları kullanılarak üretilmiş karışımların serbest basınç deneylerinden elde edilen grafikler.

EK A.3: Belirlenen çimento-kum-köpük karışımlarının serbest basınç deneylerinden elde edilen grafikler

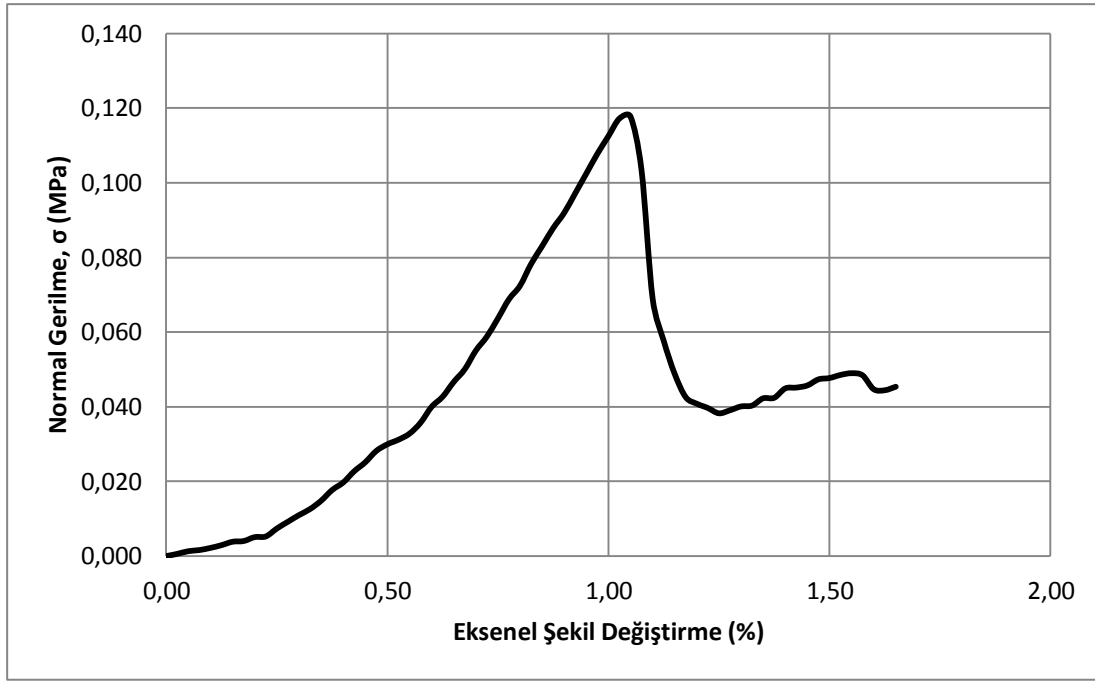
EK A.1



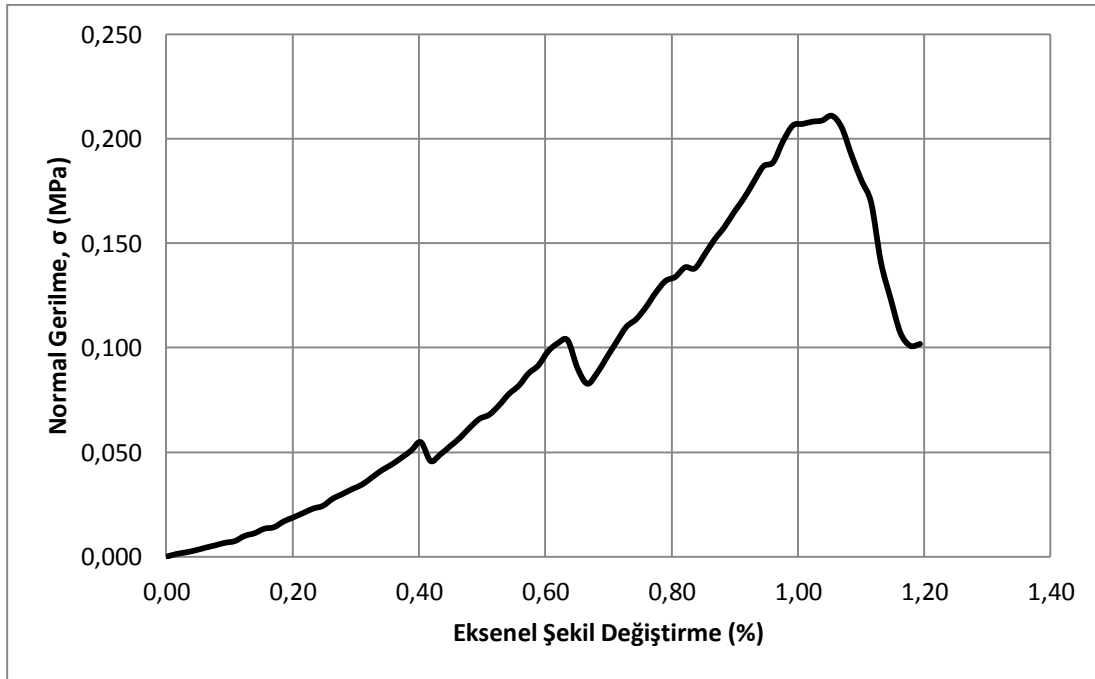
Şekil A.1 : 1-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



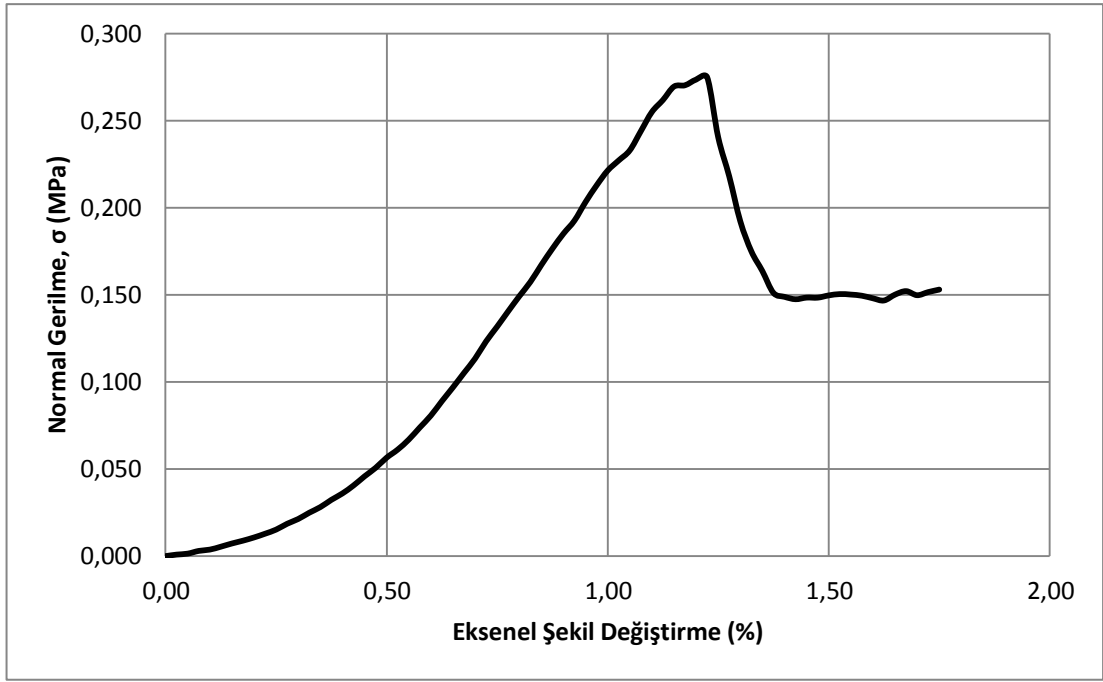
Şekil A.2 : 1-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



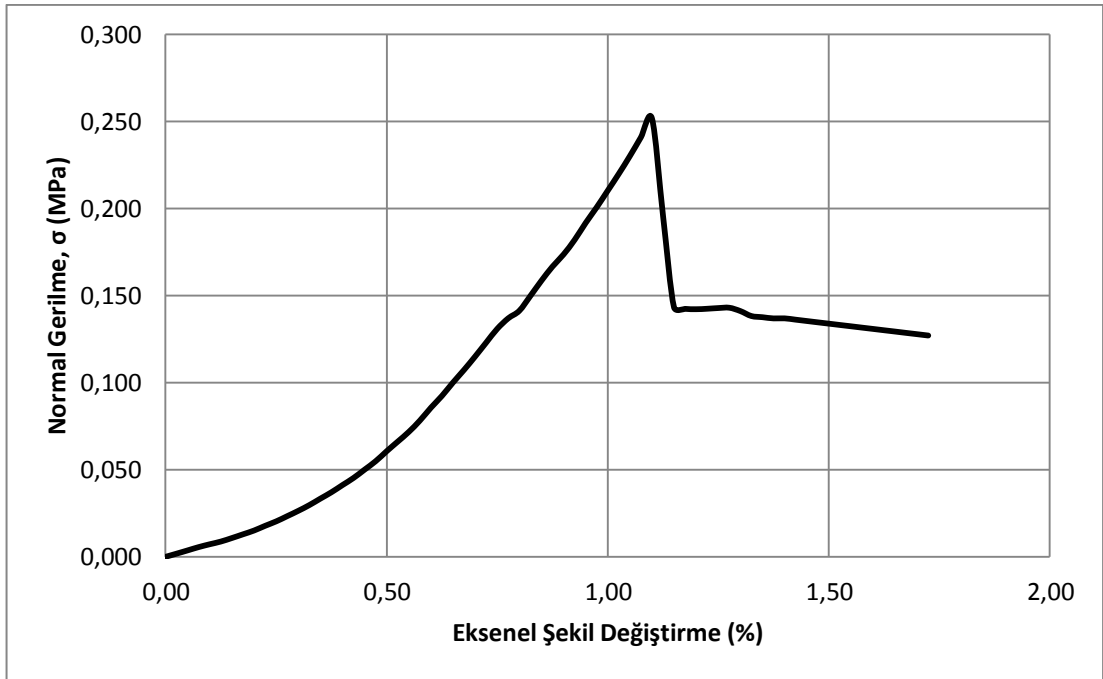
Şekil A.3 : 1-3 kodlu numunenin normal gerilme – aksenal şekil değiştirme davranışı



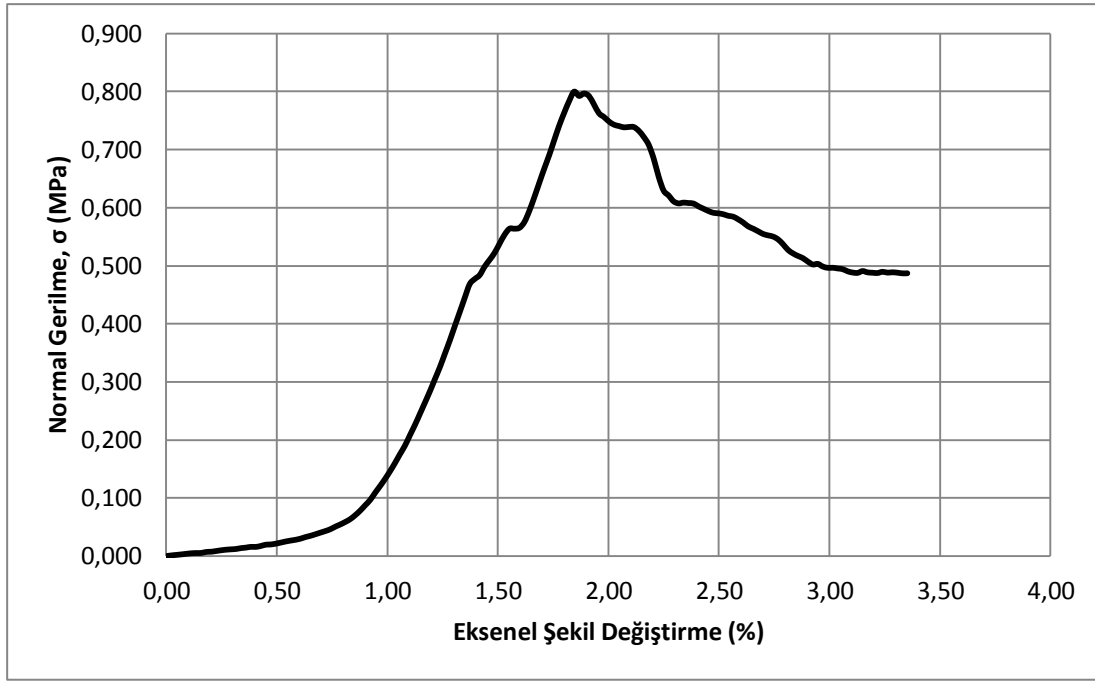
Şekil A.4 : 2-1 kodlu numunenin normal gerilme – aksenal şekil değiştirme davranışı



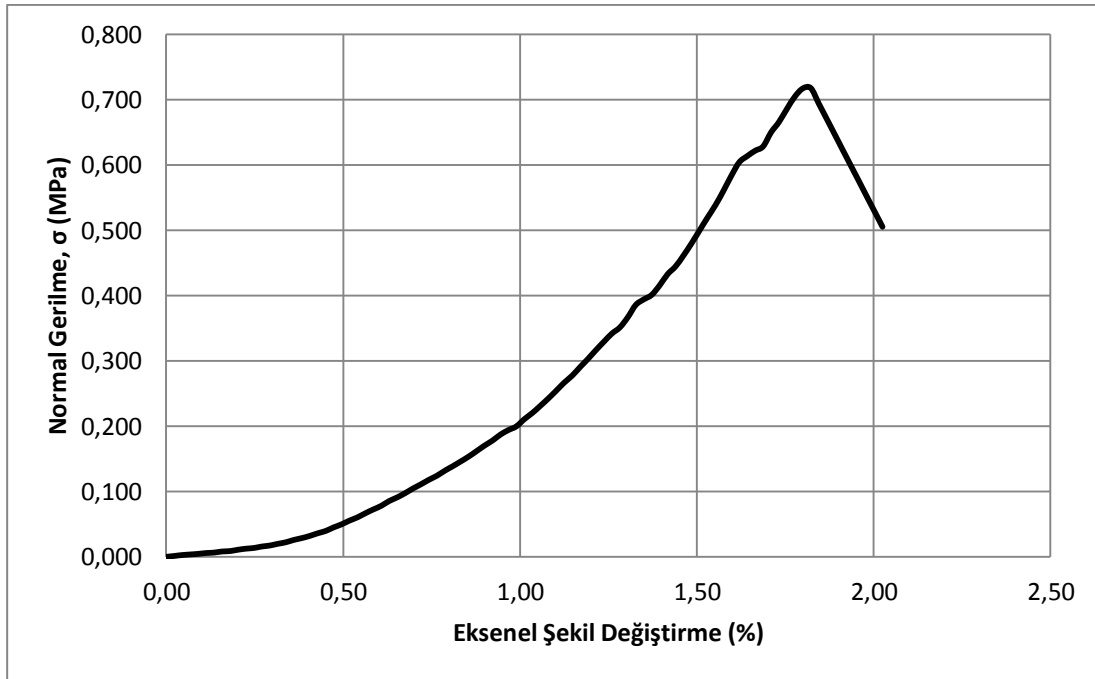
Şekil A.5 : 2-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



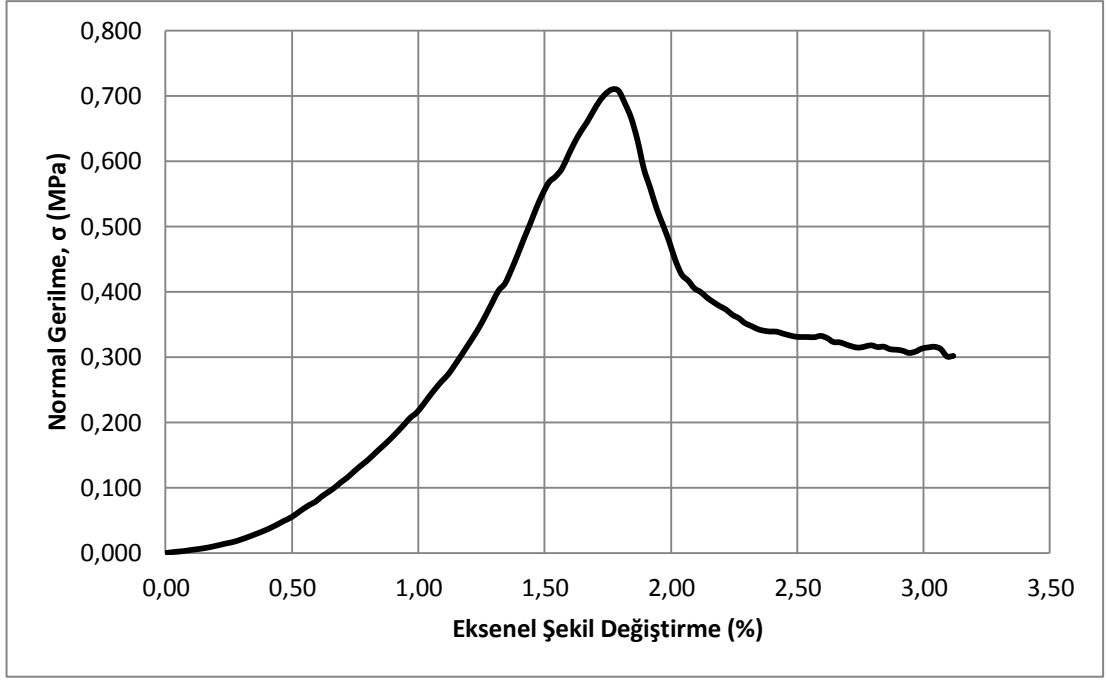
Şekil A.6 : 2-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



Şekil A.7 : 3-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı

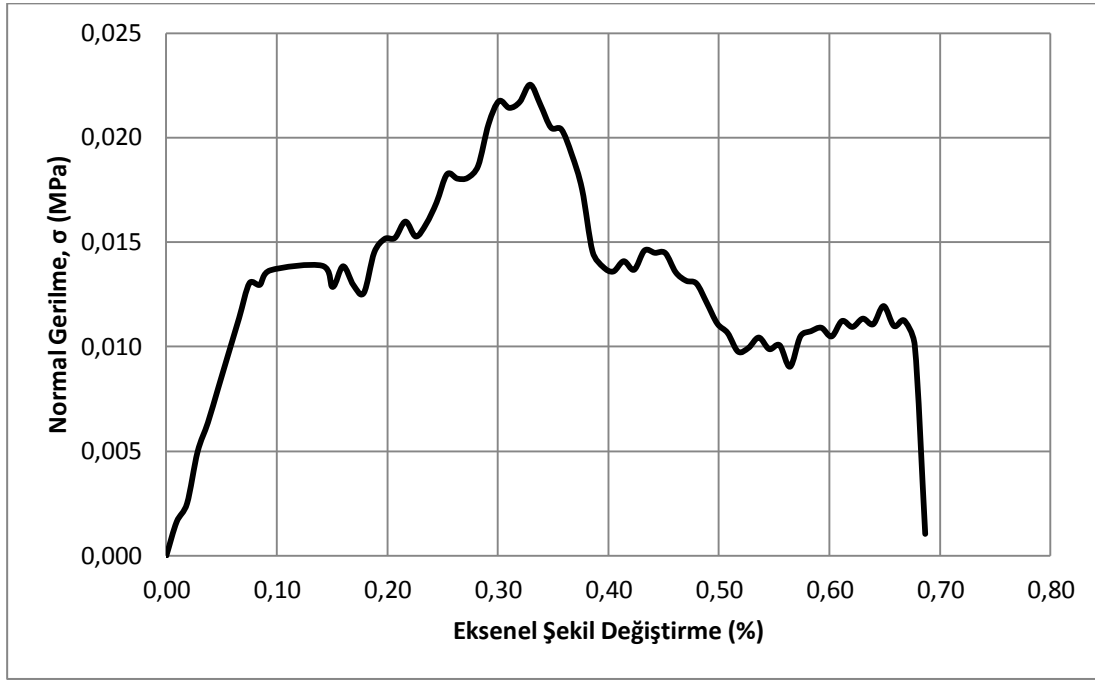


Şekil A.8 : 3-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı

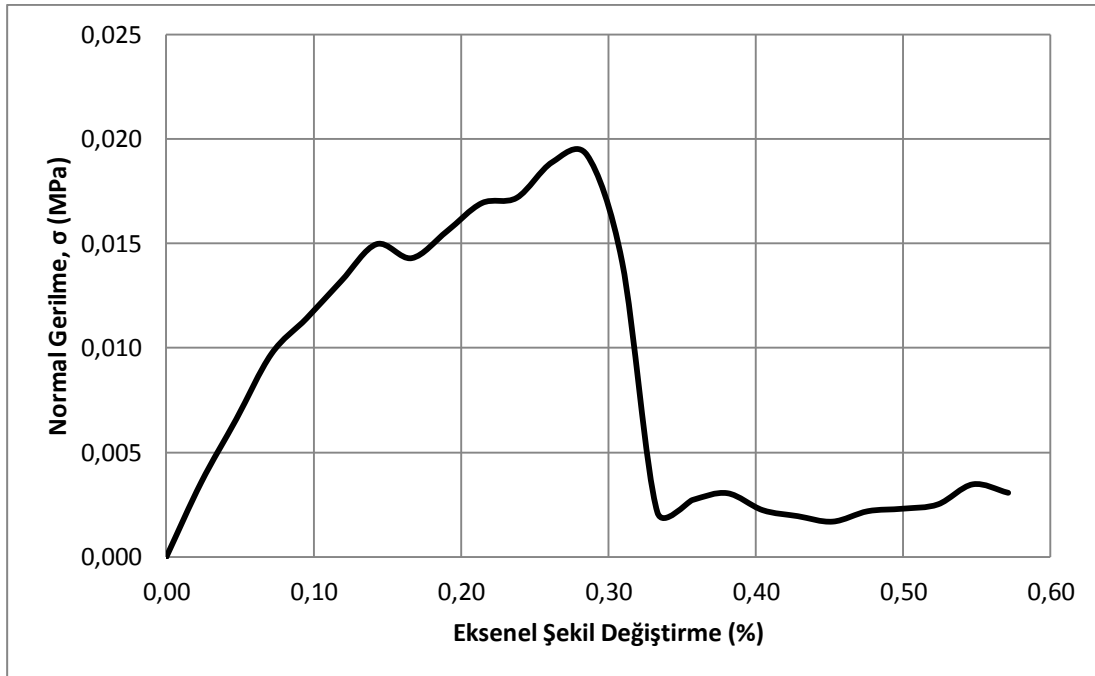


Şekil A.9 : 3-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı

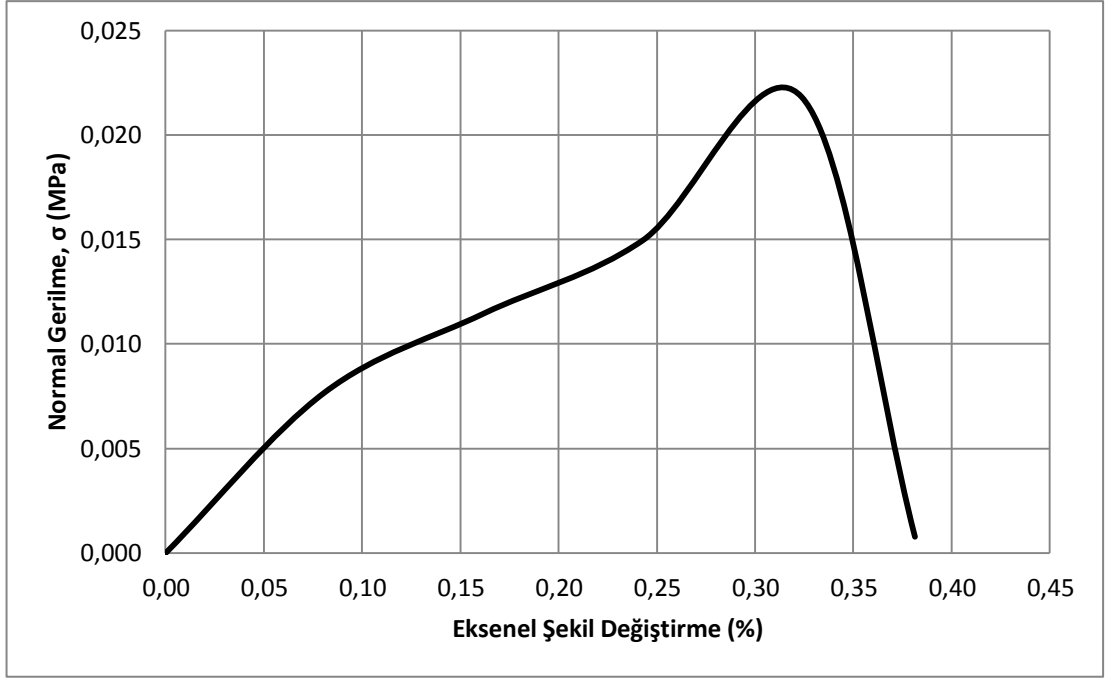
EK A.2



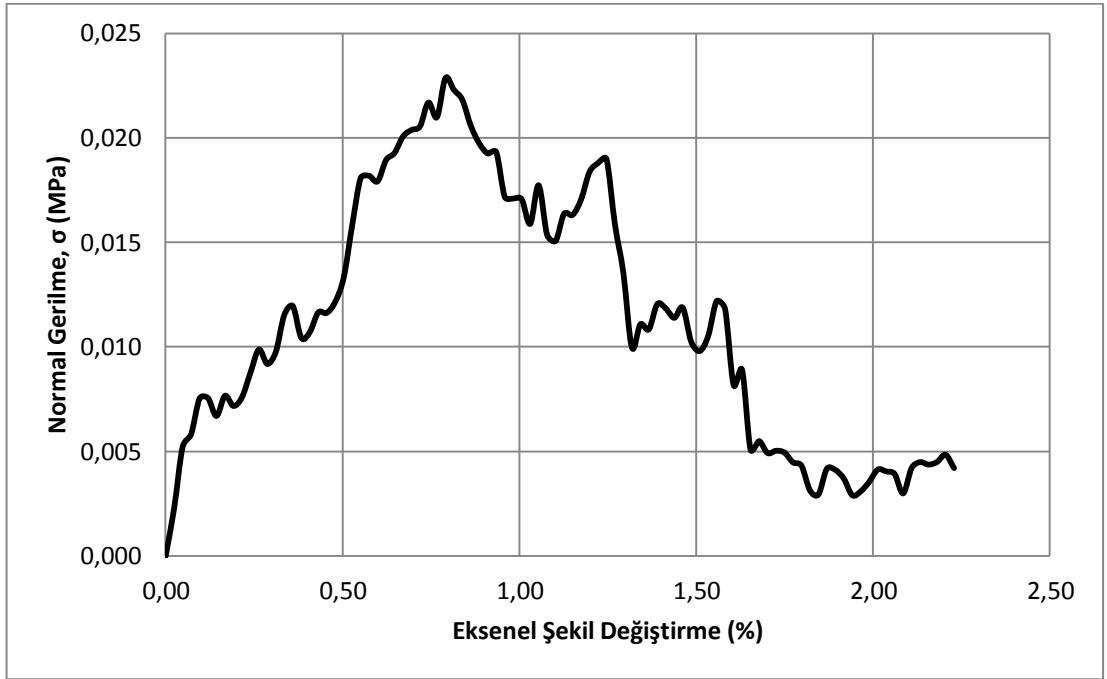
Şekil A.10 : 1-1-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



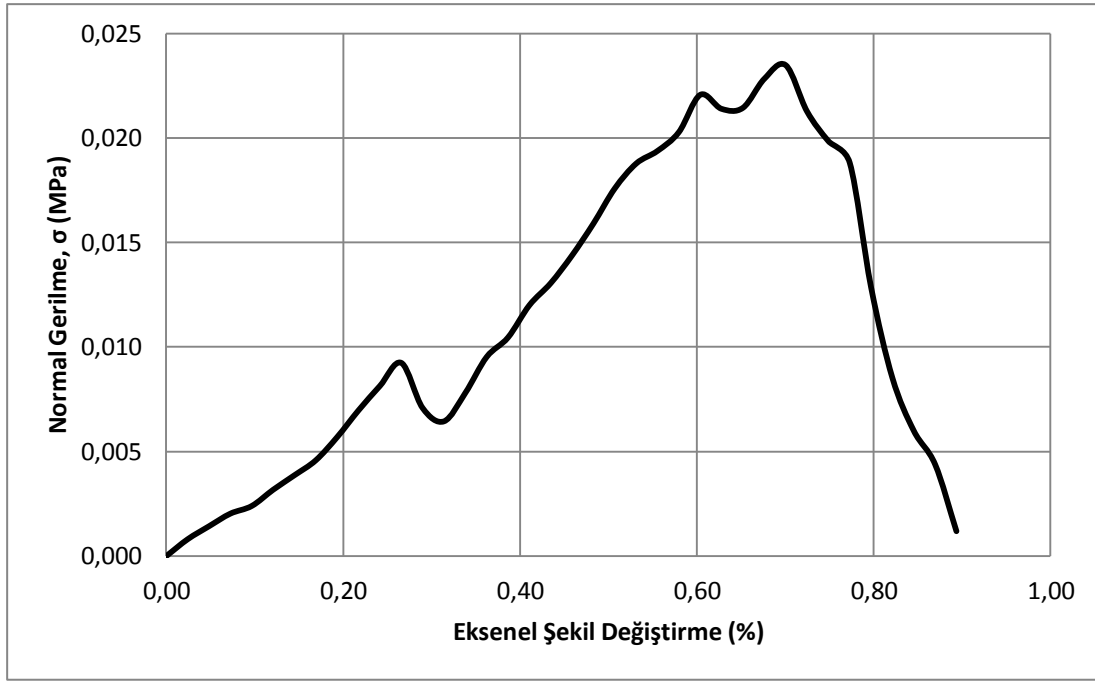
Şekil A.11 : 1-1-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



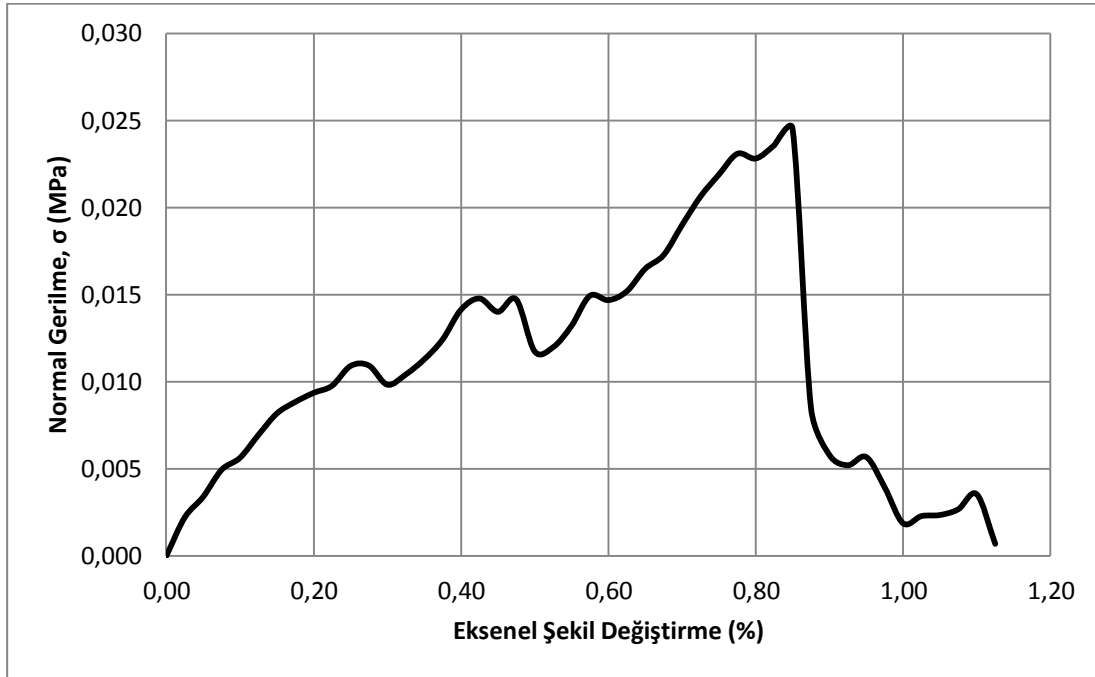
Şekil A.12 : 1-1-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



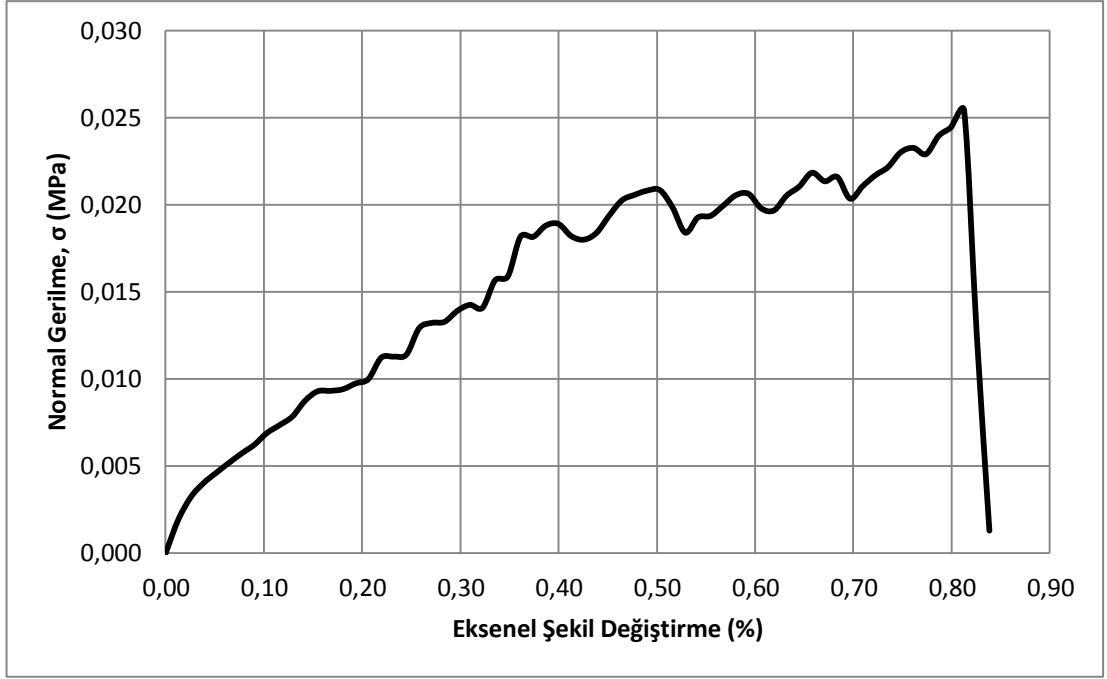
Şekil A.13 : 1-2-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



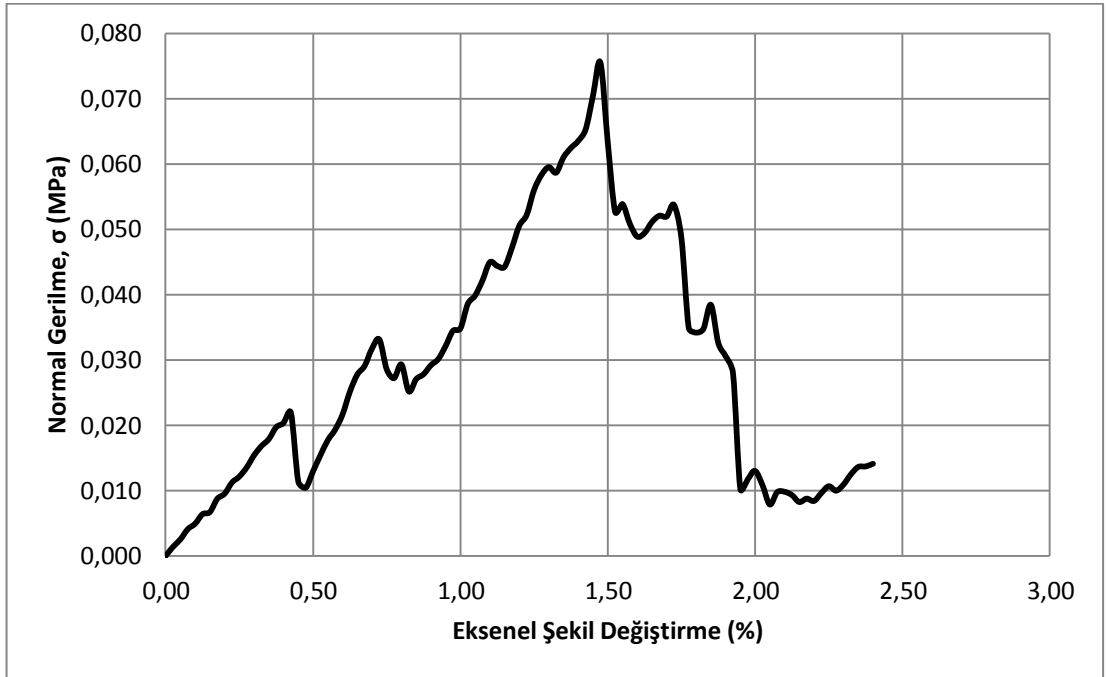
Şekil A.14 : 1-2-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



Şekil A.15 : 1-2-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



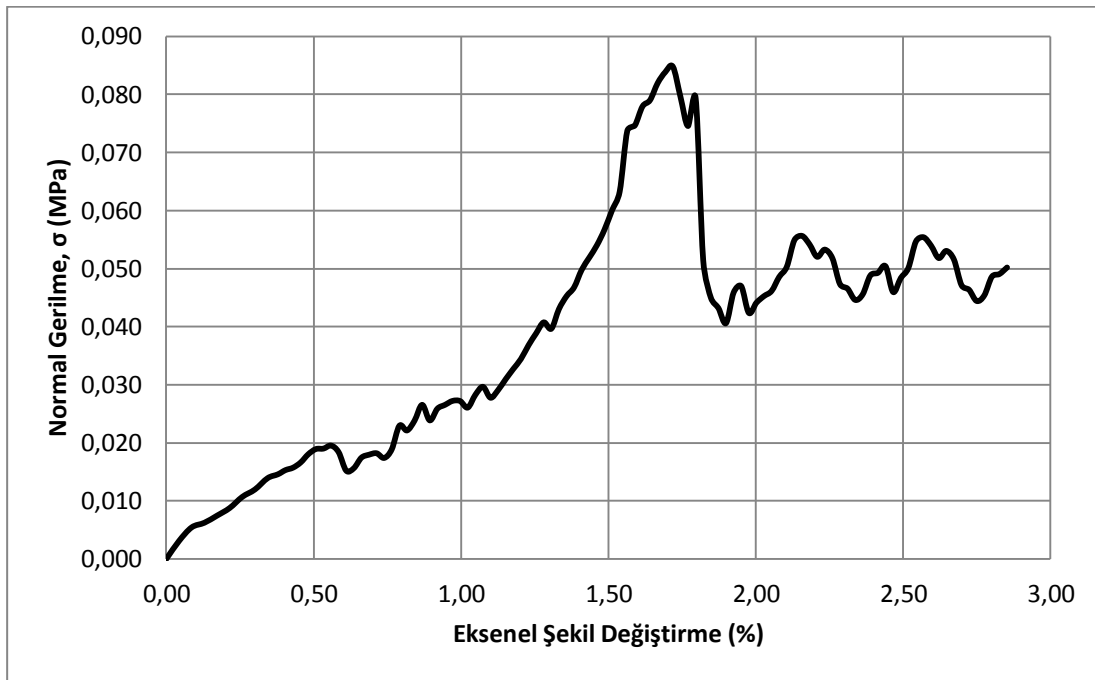
Şekil A.16 : 1-2-4 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



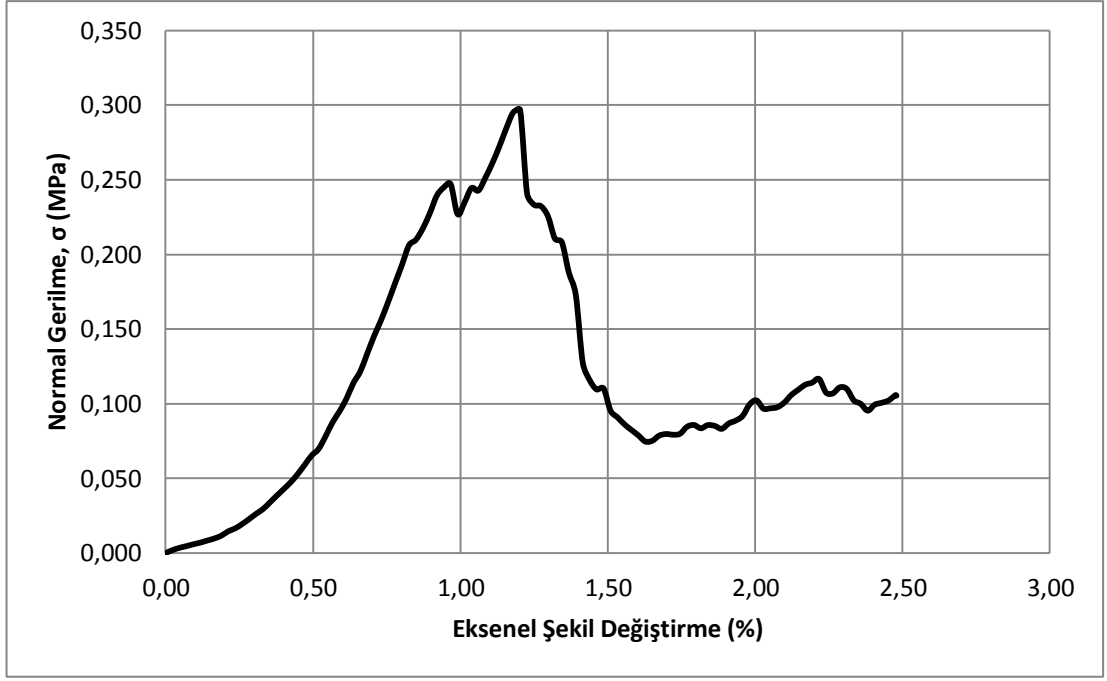
Şekil A.17 : 1-3-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



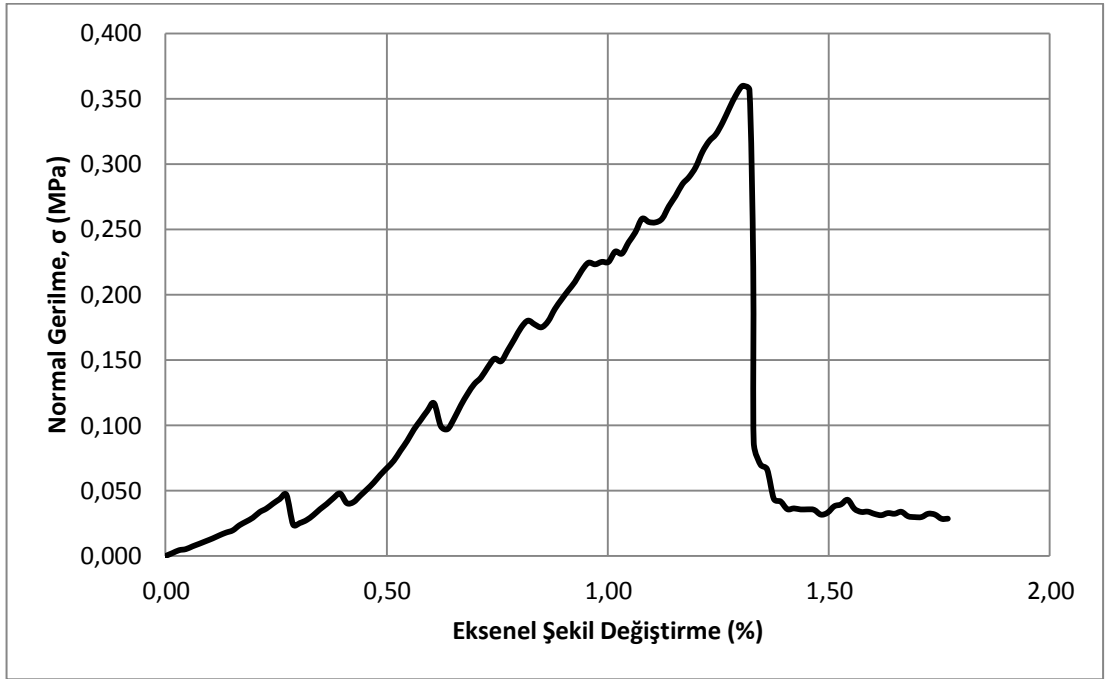
Şekil A.18 : 1-3-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



Şekil A.19 : 1-3-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



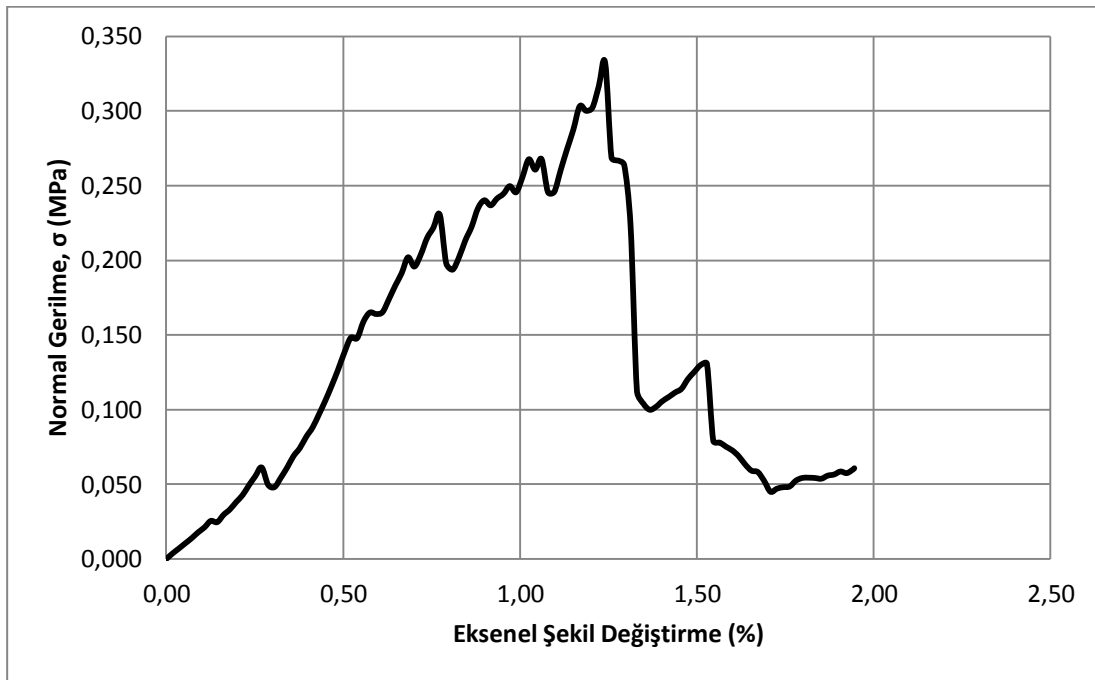
Şekil A.20 : 1-4-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



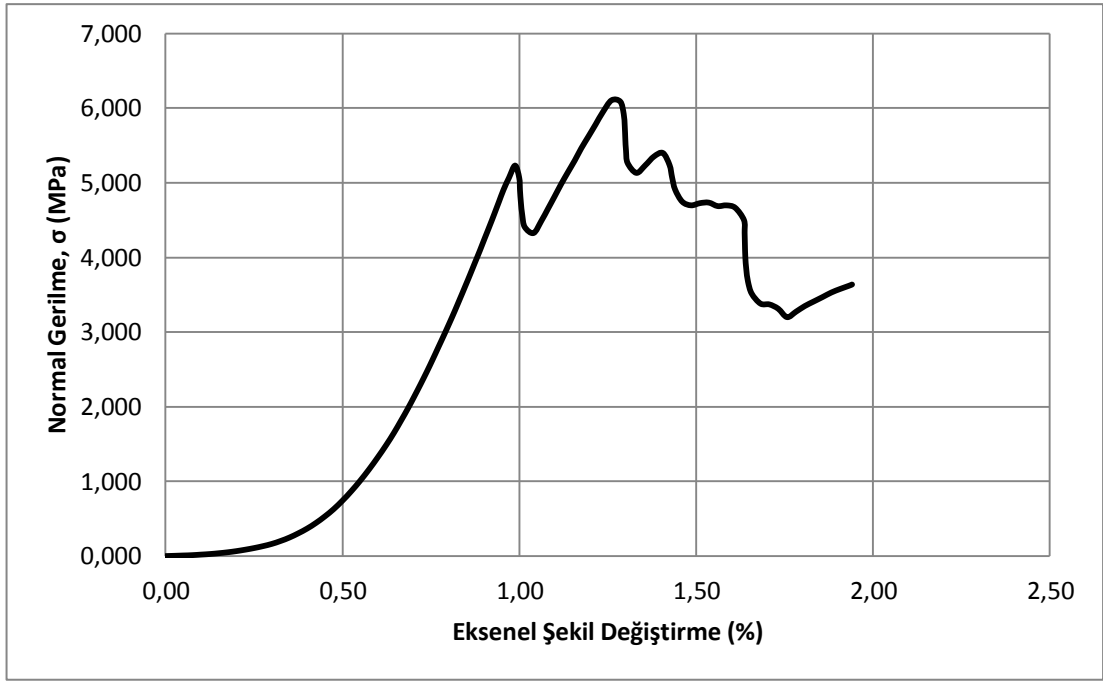
Şekil A.21 : 1-4-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



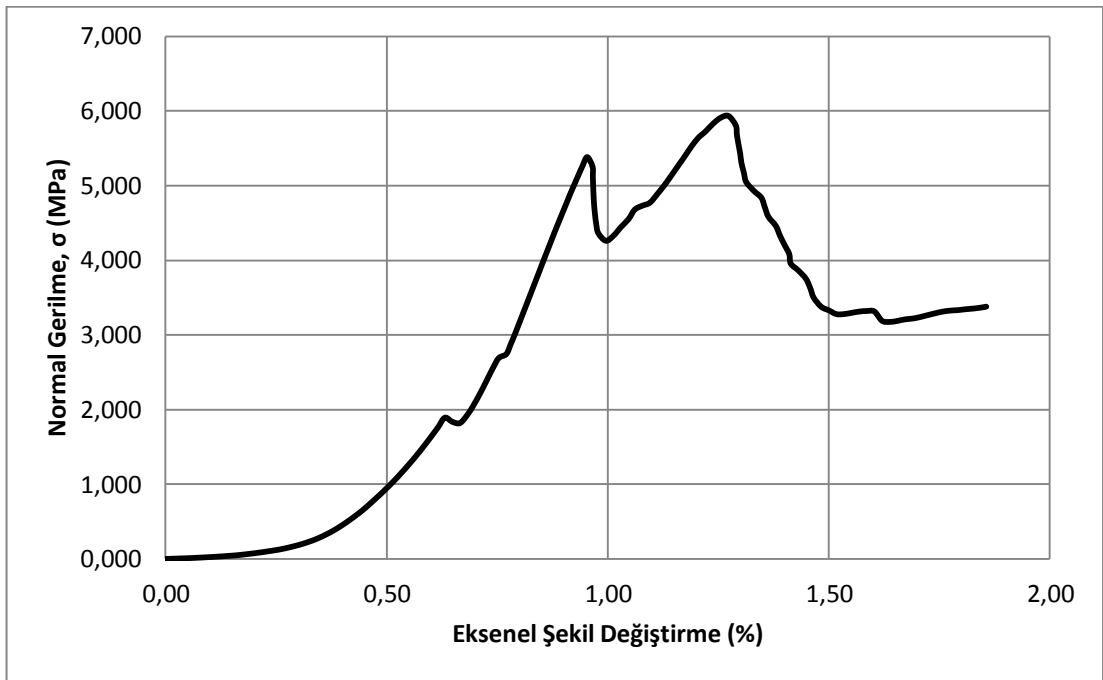
Şekil A.22 : 1-4-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



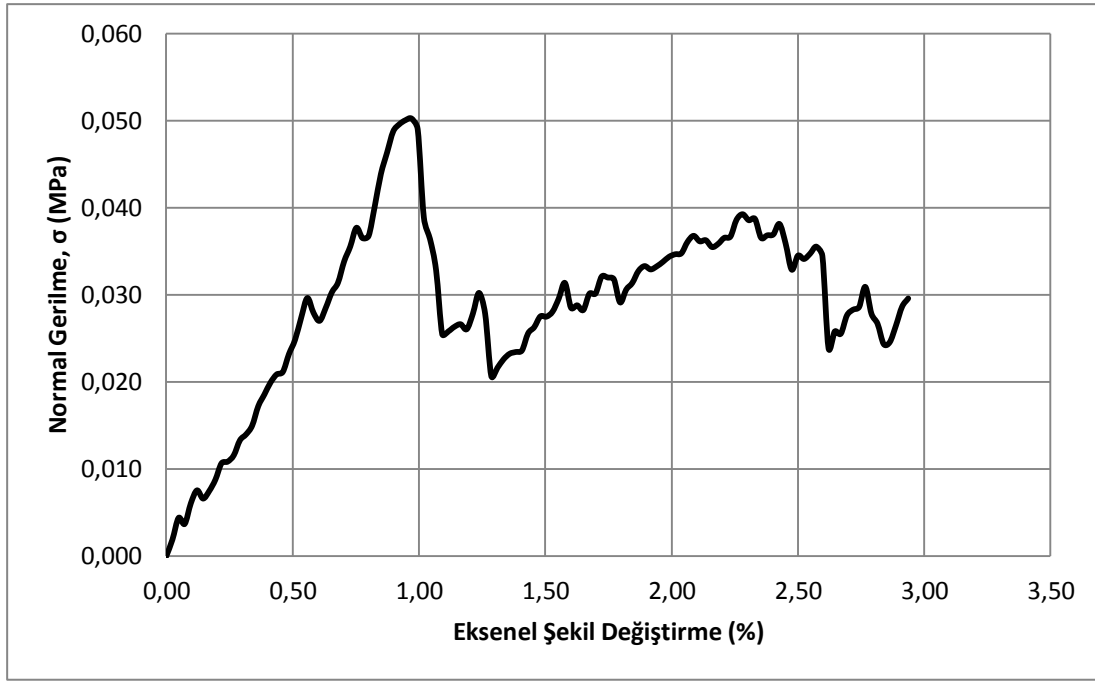
Şekil A.23 : 1-4-4 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



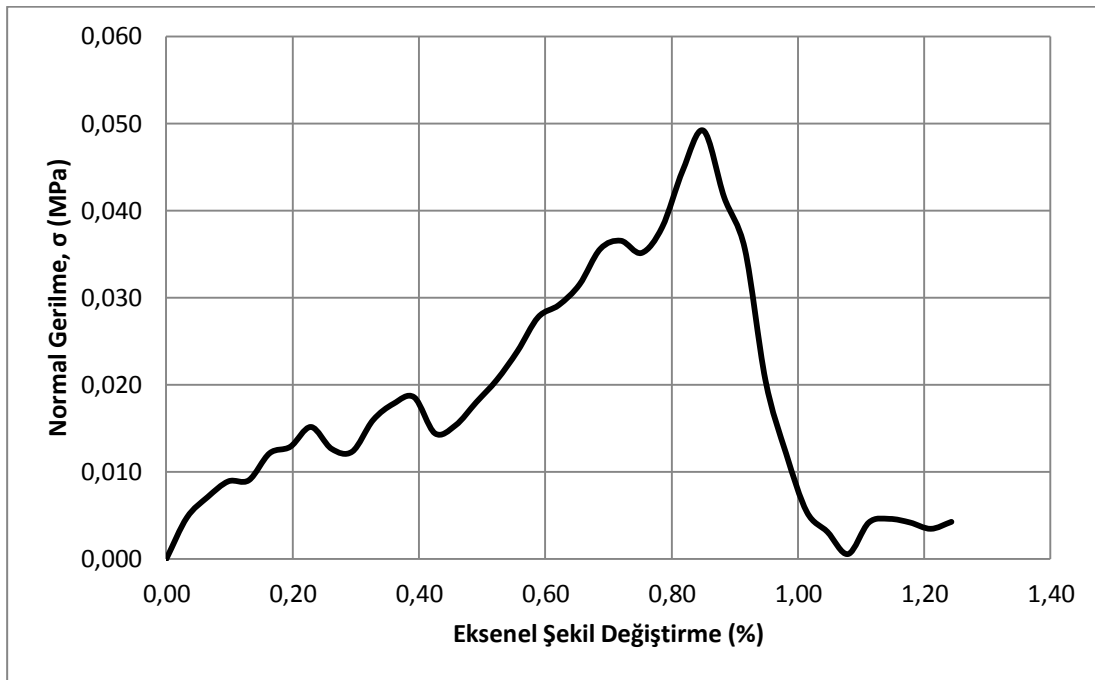
Şekil A.24 : 1-5-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



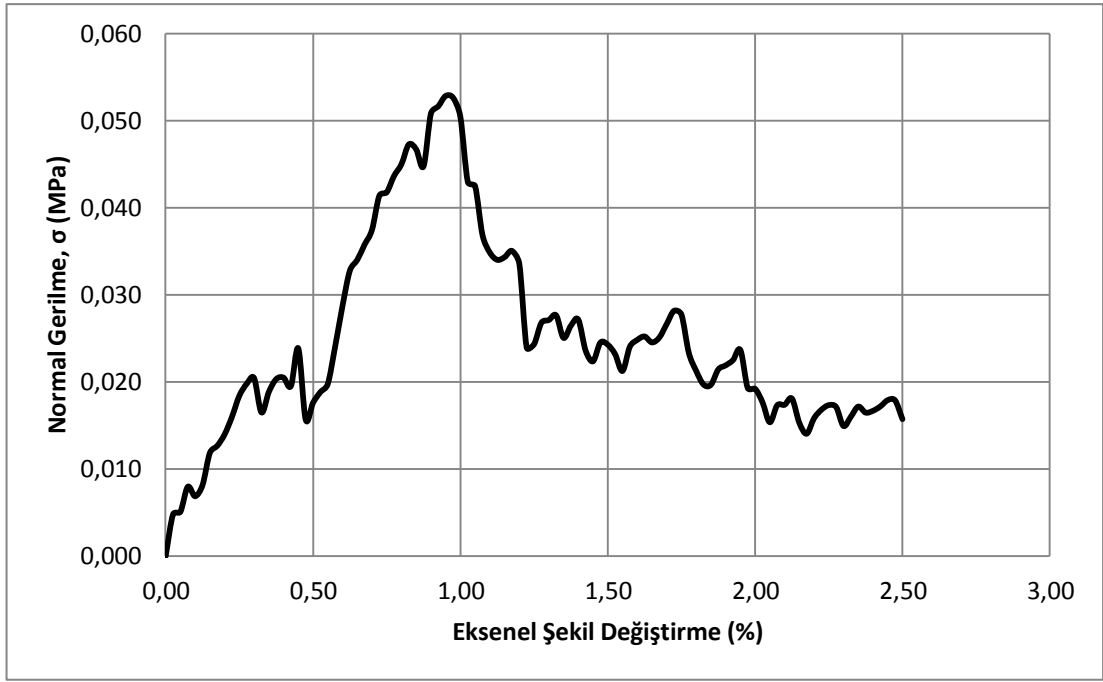
Şekil A.25 : 1-5-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



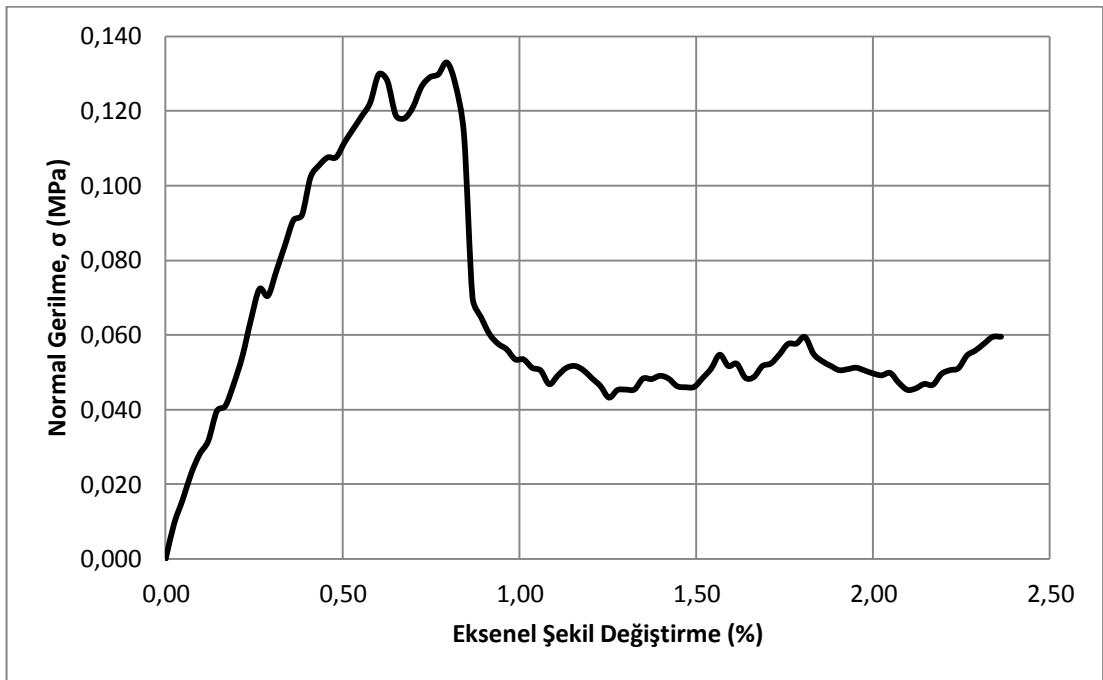
Şekil A.26 : 2-1-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



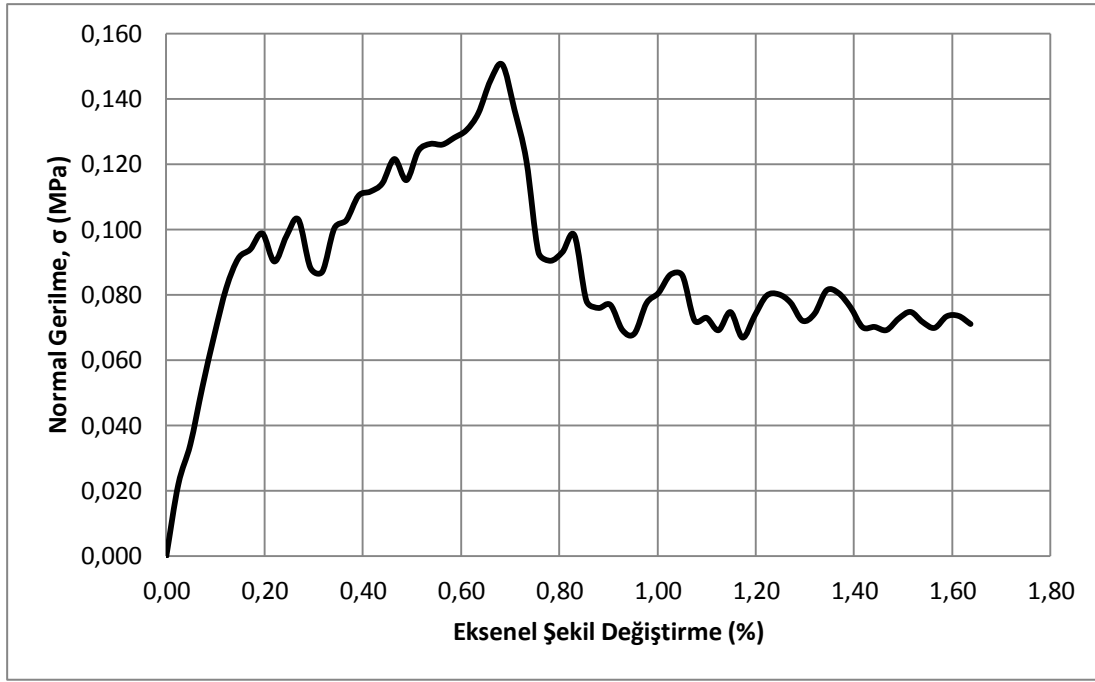
Şekil A.27 : 2-1-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



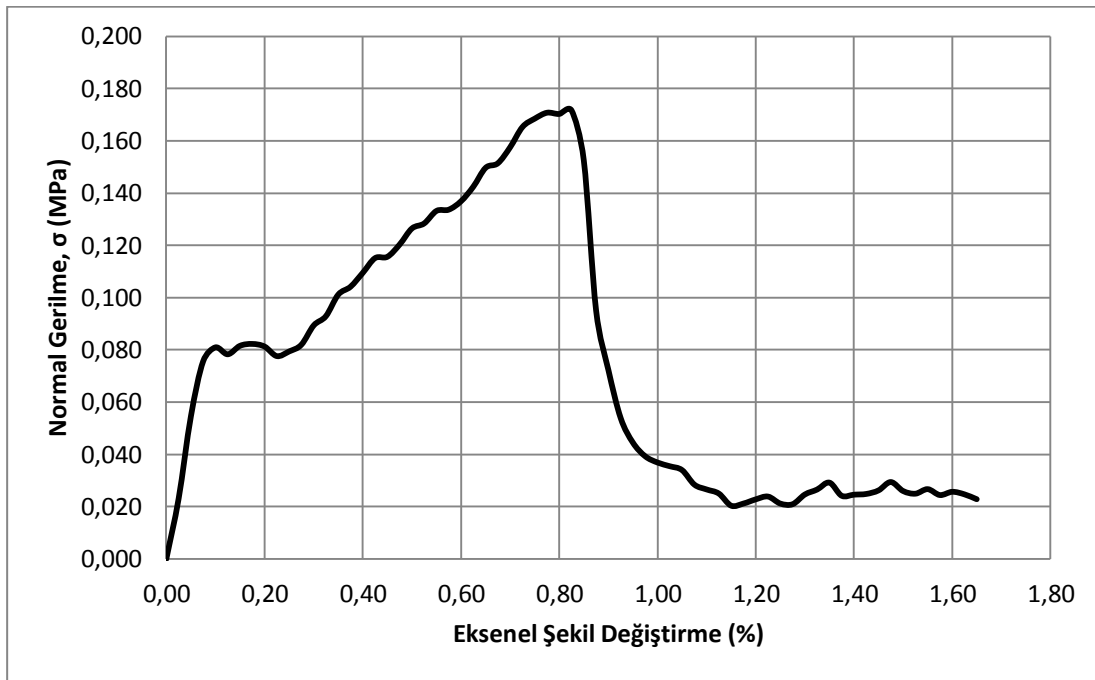
Şekil A.28 : 2-1-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksnel şekil değışirme davranış



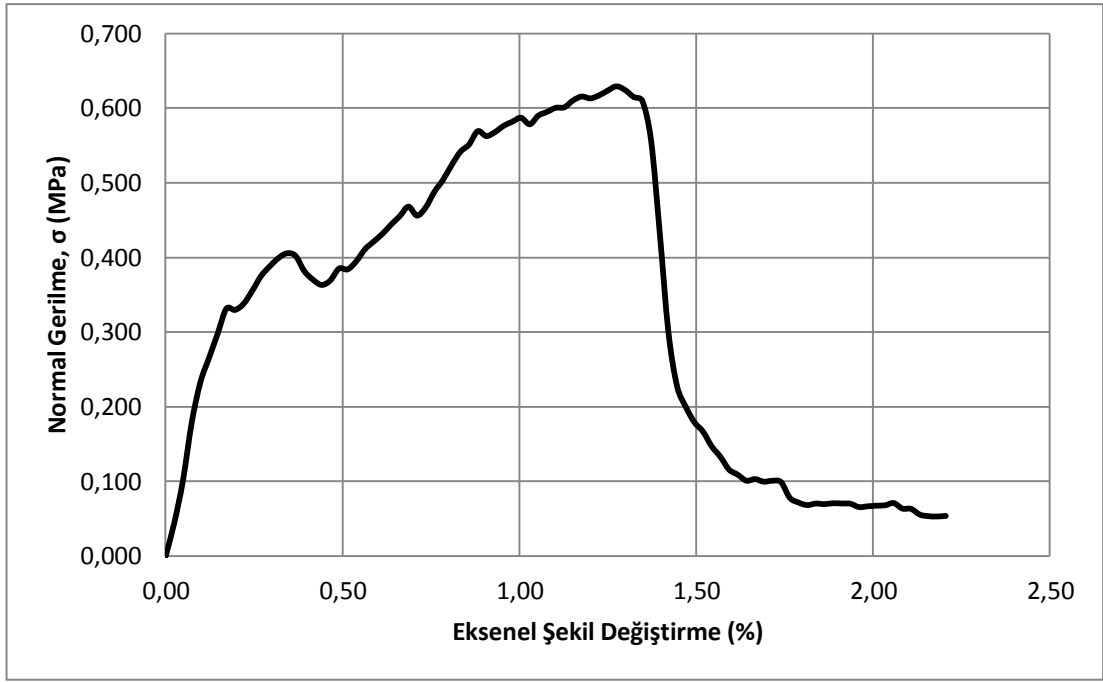
Şekil A.29 : 2-2-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksnel şekil değışirme davranış



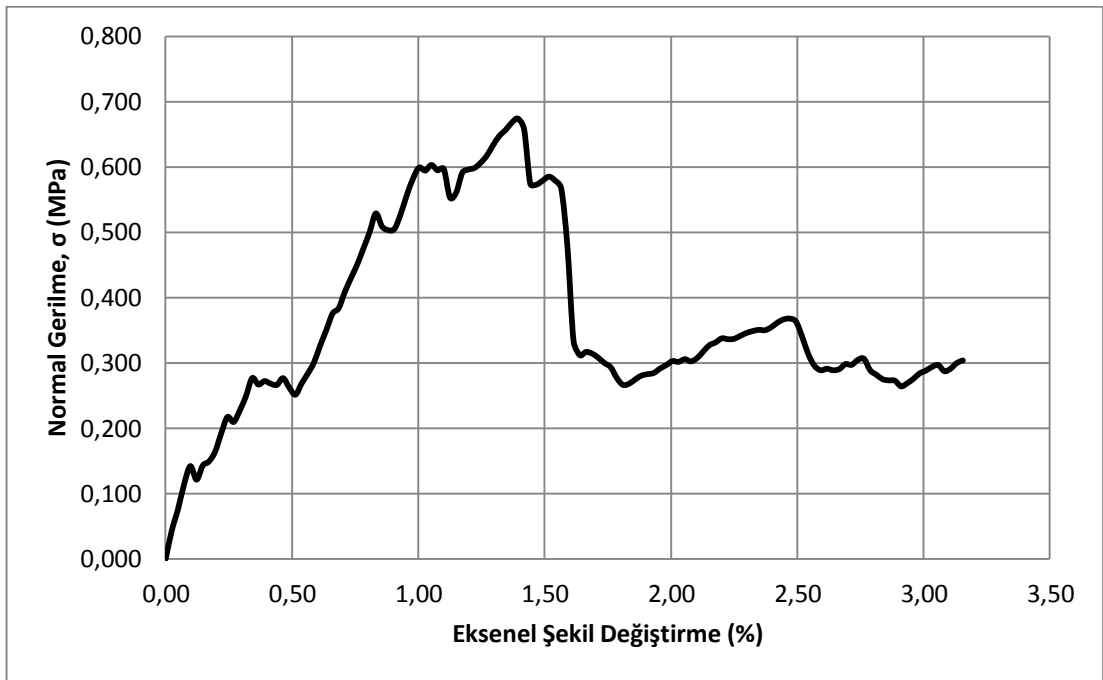
Şekil A.30 : 2-2-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



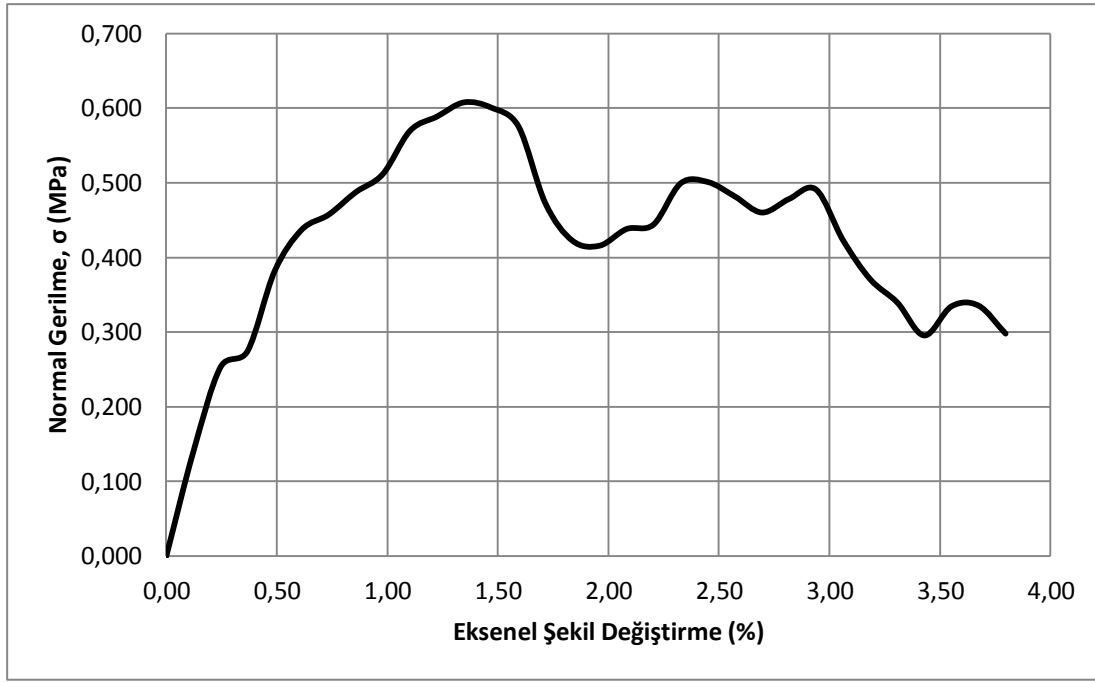
Şekil A.31 : 2-2-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



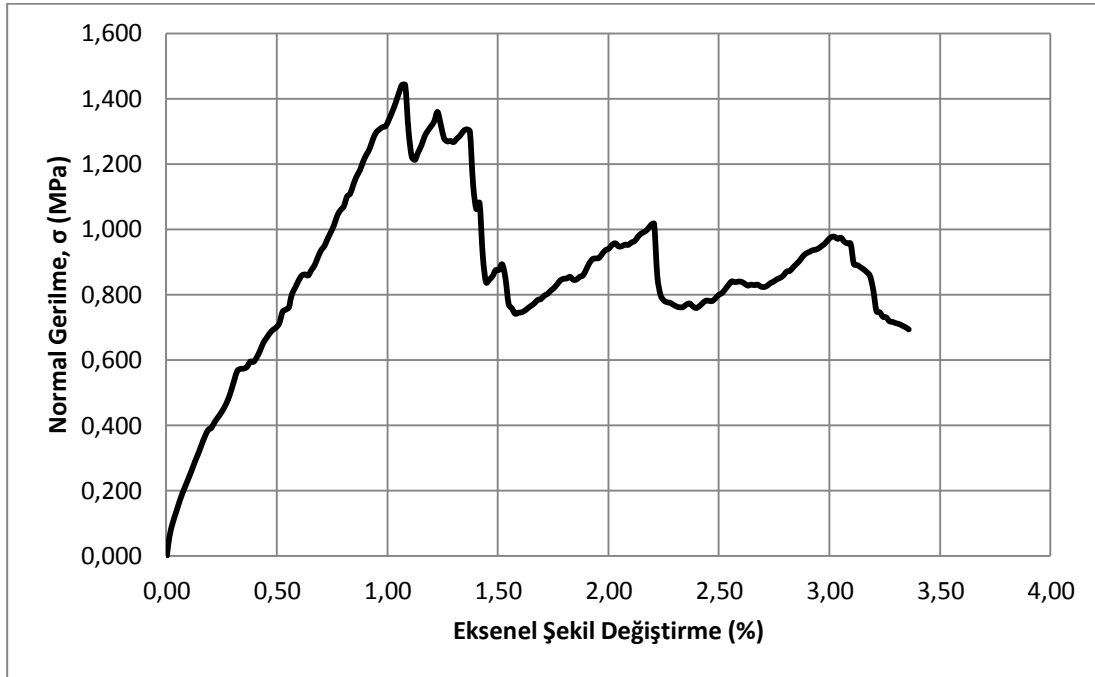
Şekil A.32 : 2-3-1 kodlu numunenin normal gerilme – aksenal şekil değiştirme davranışı



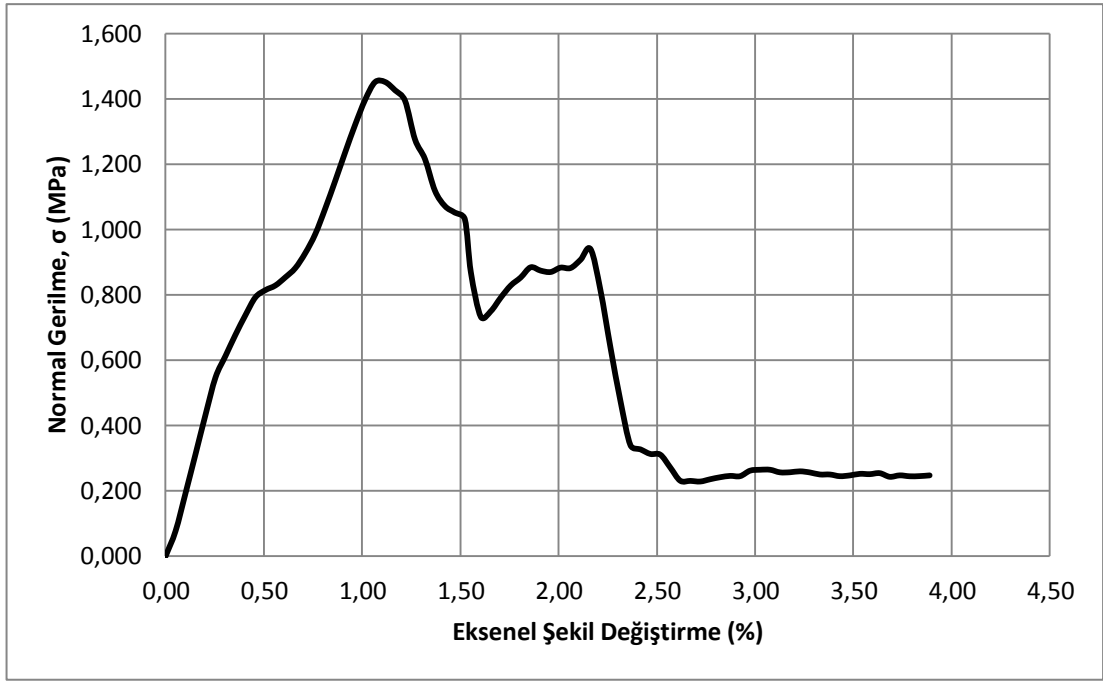
Şekil A.33 : 2-3-2 kodlu numunenin normal gerilme – aksenal şekil değiştirme davranışı



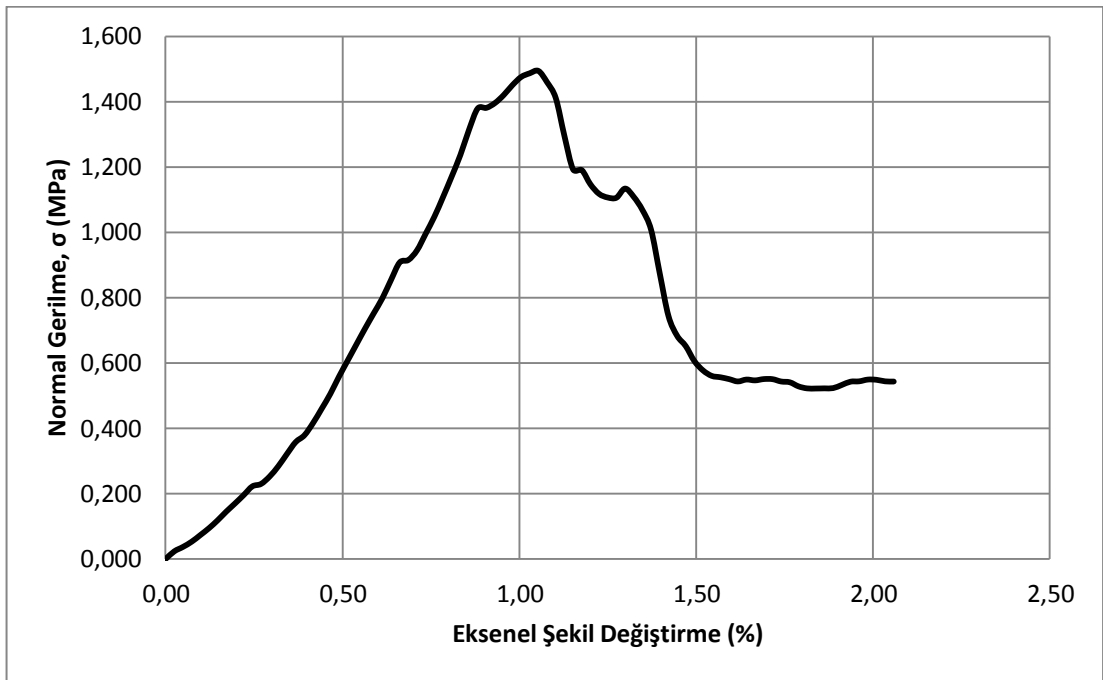
Şekil A.34 : 2-3-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



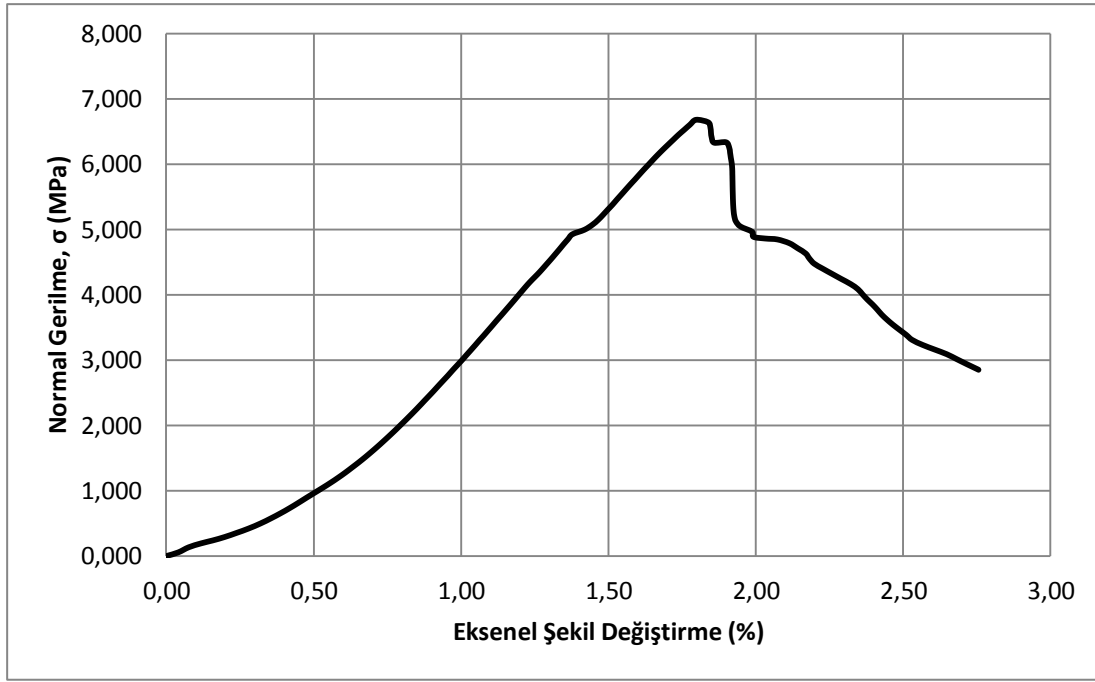
Şekil A.35 : 2-4-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



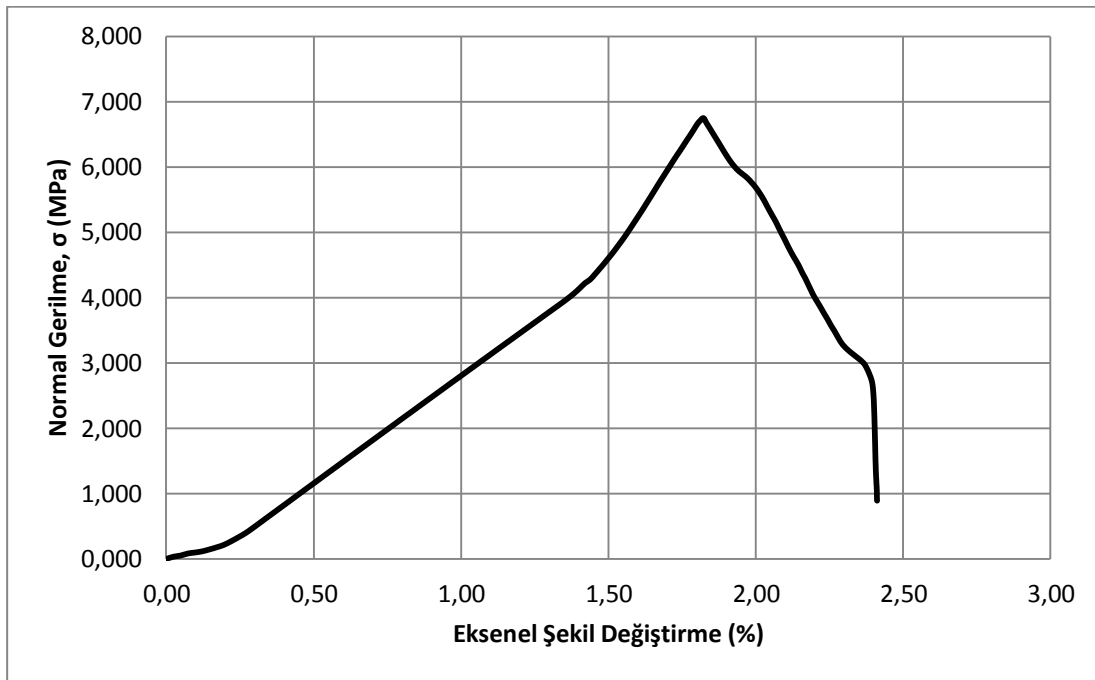
Şekil A.36 : 2-4-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



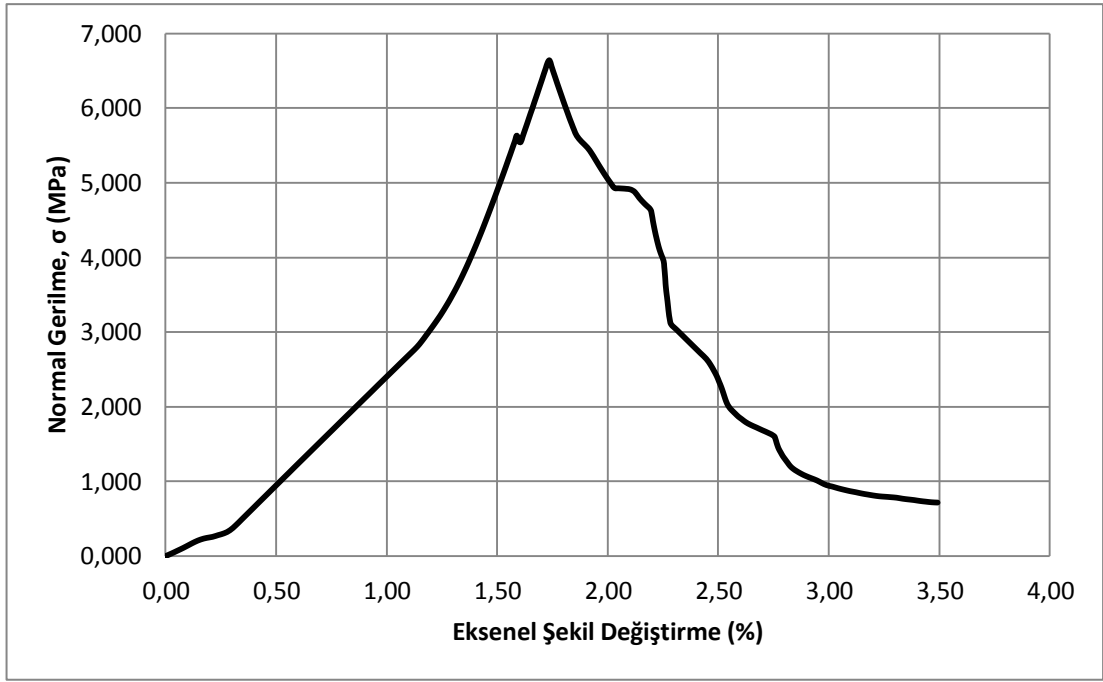
Şekil A.37 : 2-4-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



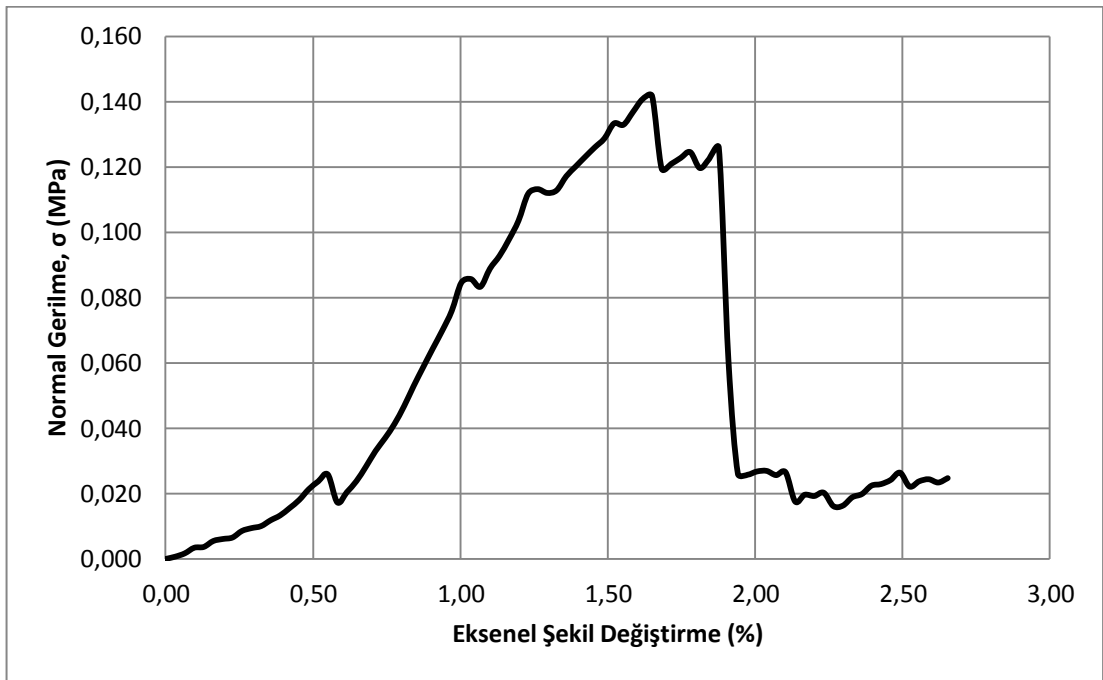
Şekil A.38 : 2-5-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



Şekil A.39 : 2-5-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



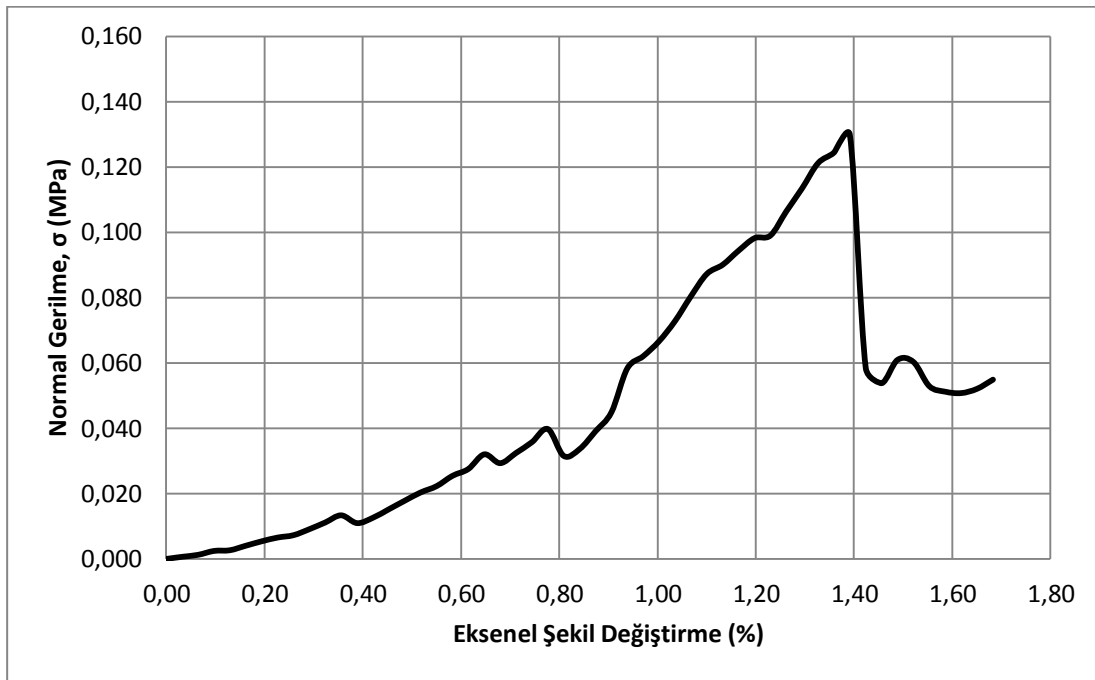
Şekil A.40 : 2-5-3 kodlu numunenin normal gerilme – aksenal şekil değiştirme davranışı



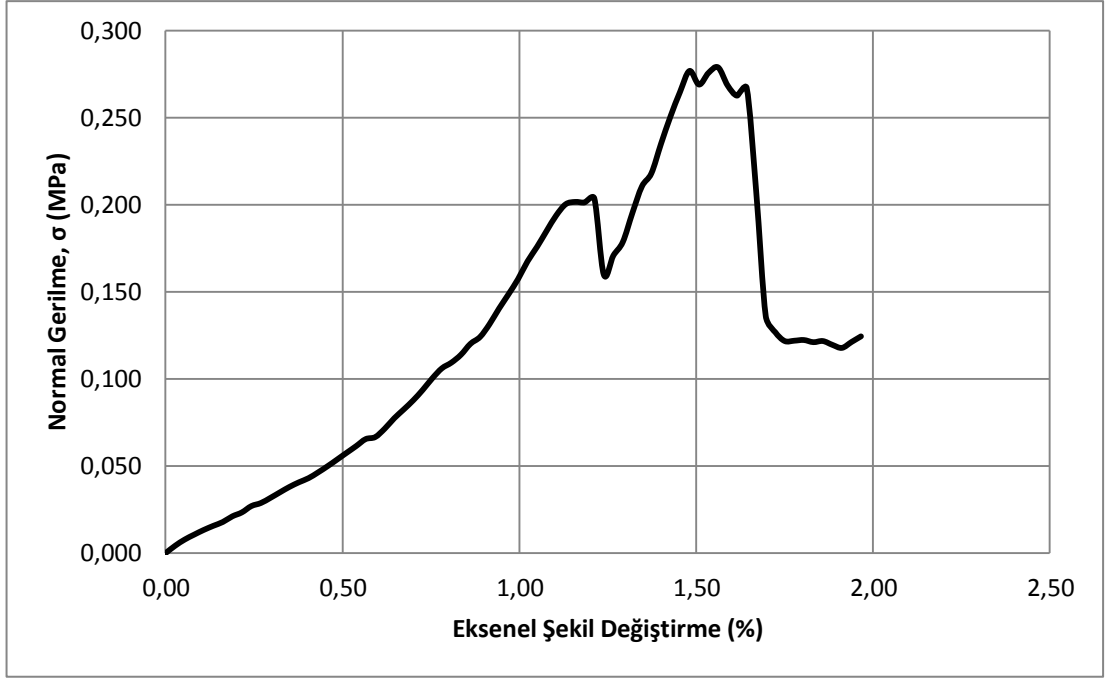
Şekil A.41 : 3-1-1 kodlu numunenin normal gerilme – aksenal şekil değiştirme davranışı



Şekil A.42 : 3-1-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



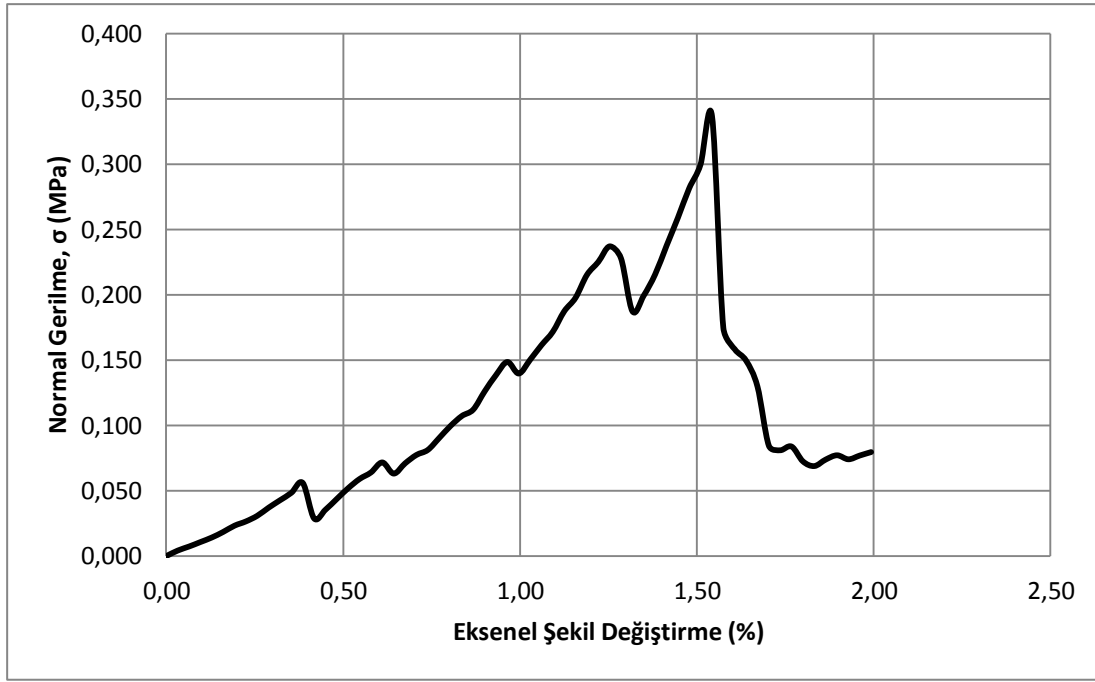
Şekil A.43 : 3-1-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



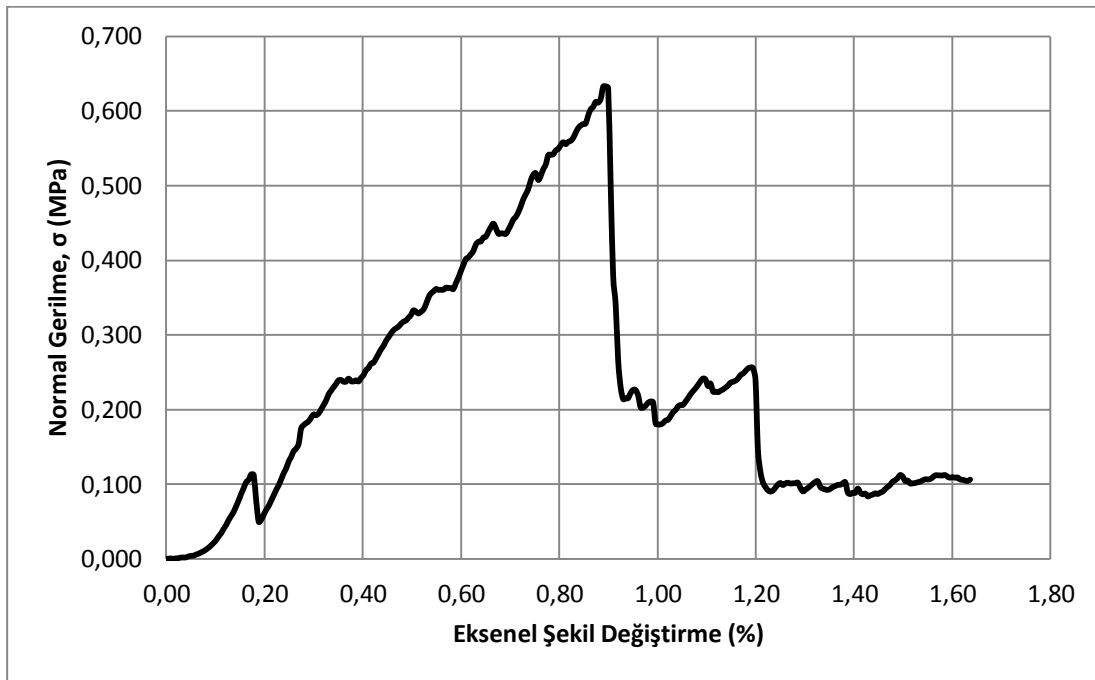
Şekil A.44 : 3-2-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



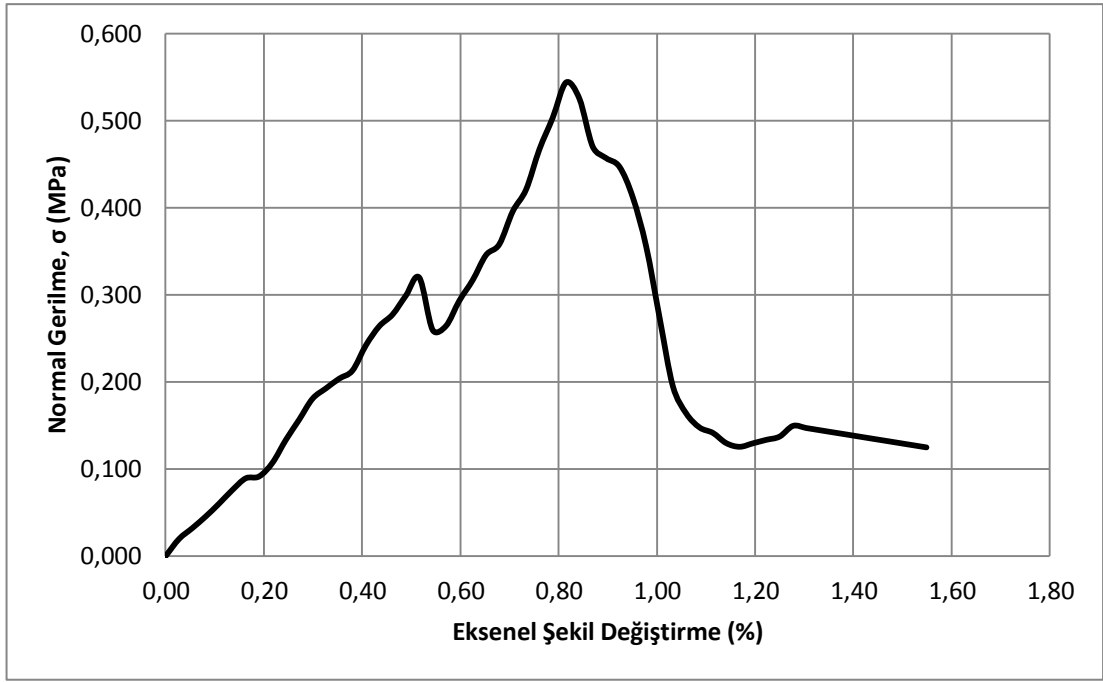
Şekil A.45 : 3-2-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



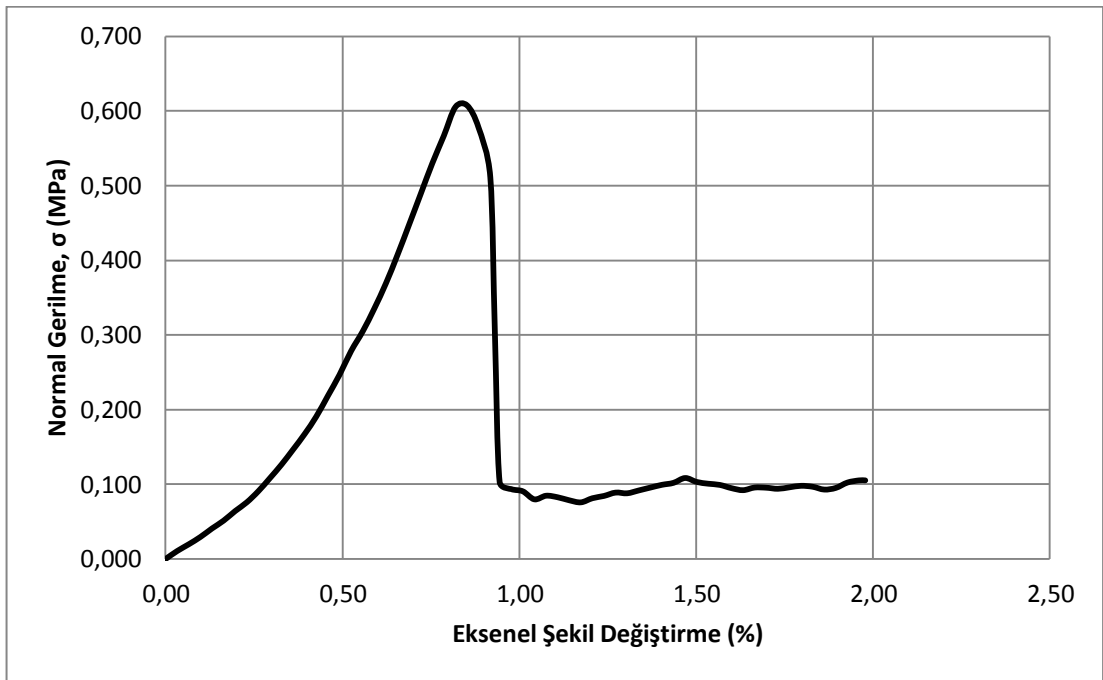
Şekil A.46 : 3-2-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



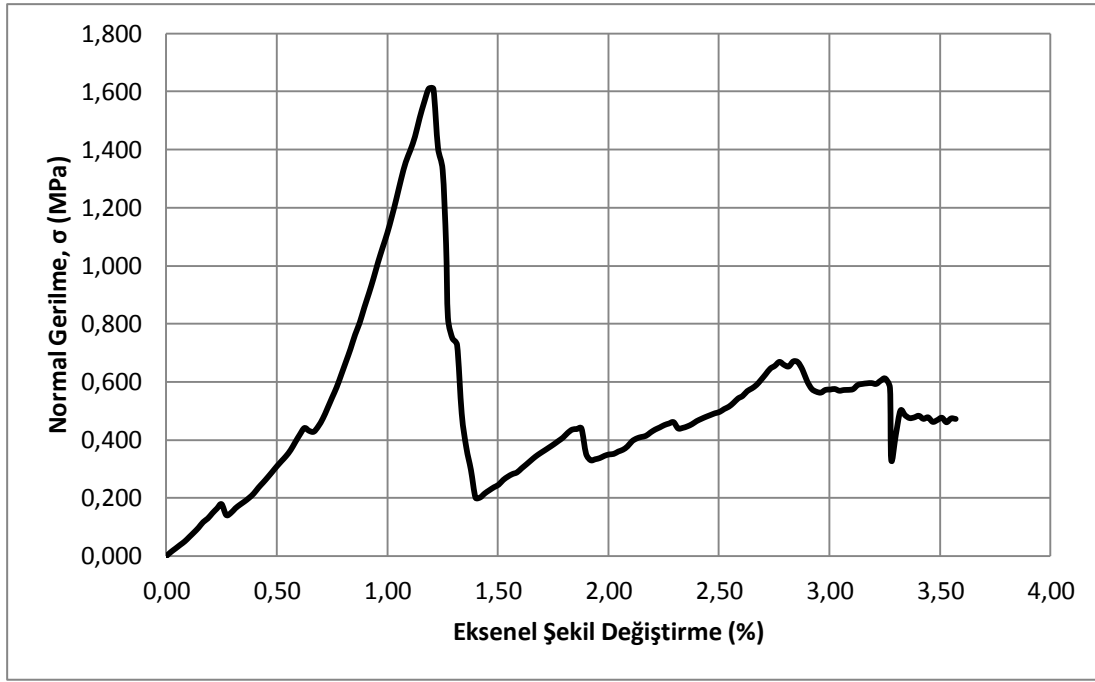
Şekil A.47 : 3-3-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



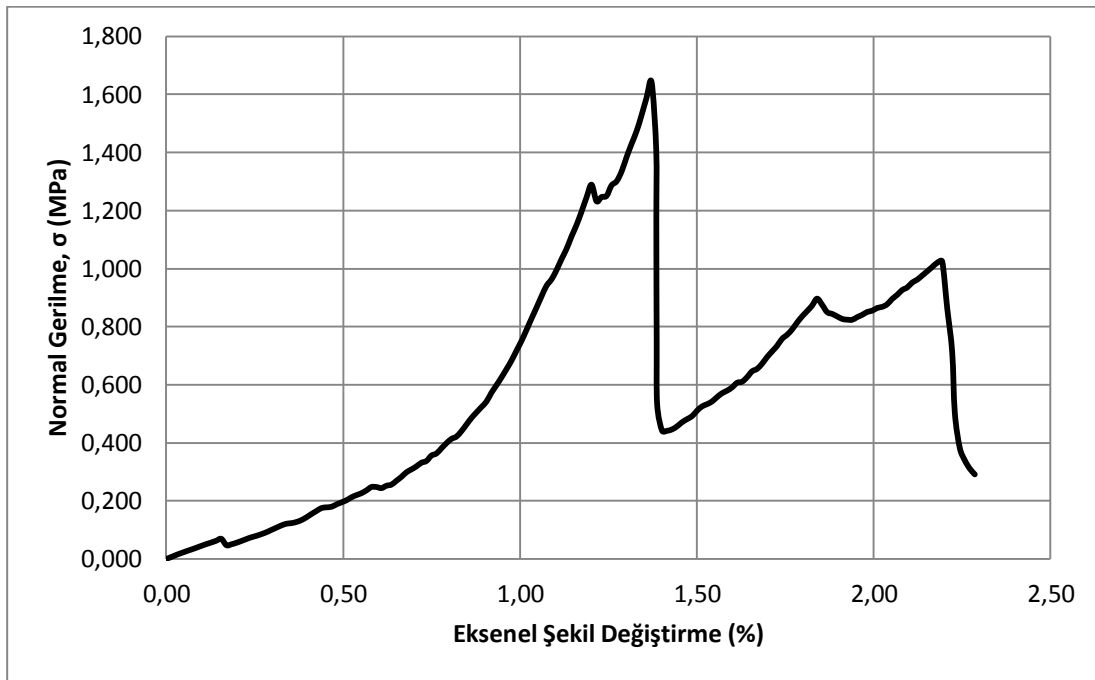
Şekil A.48 : 3-3-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



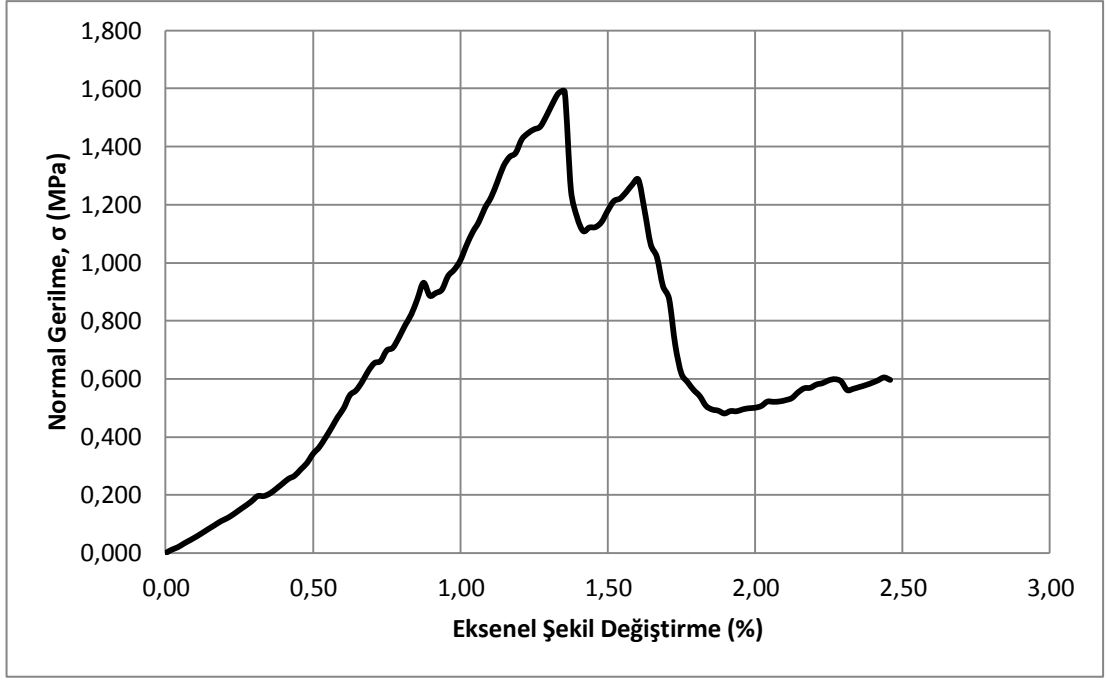
Şekil A.49 : 3-3-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



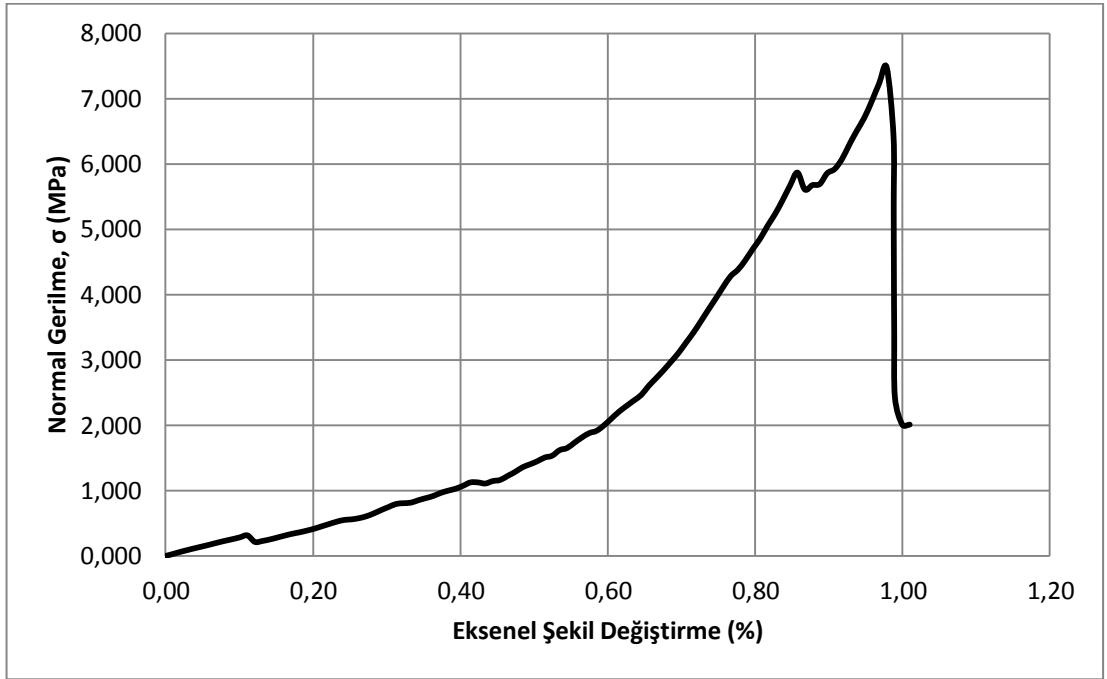
Şekil A.50 : 3-4-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



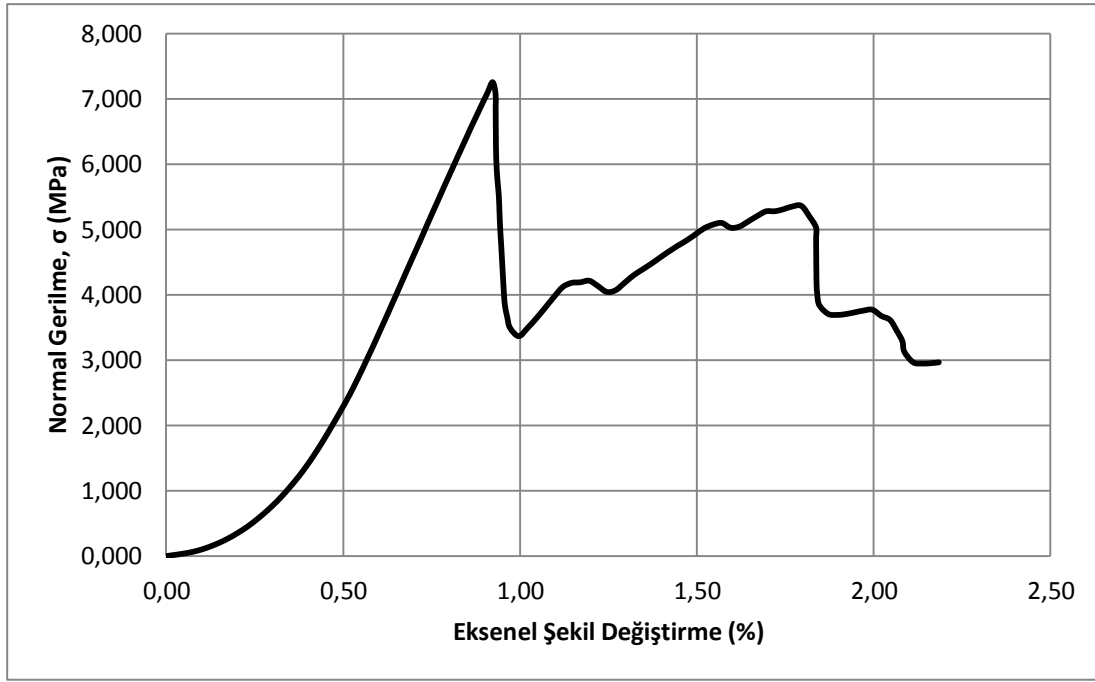
Şekil A.51 : 3-4-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



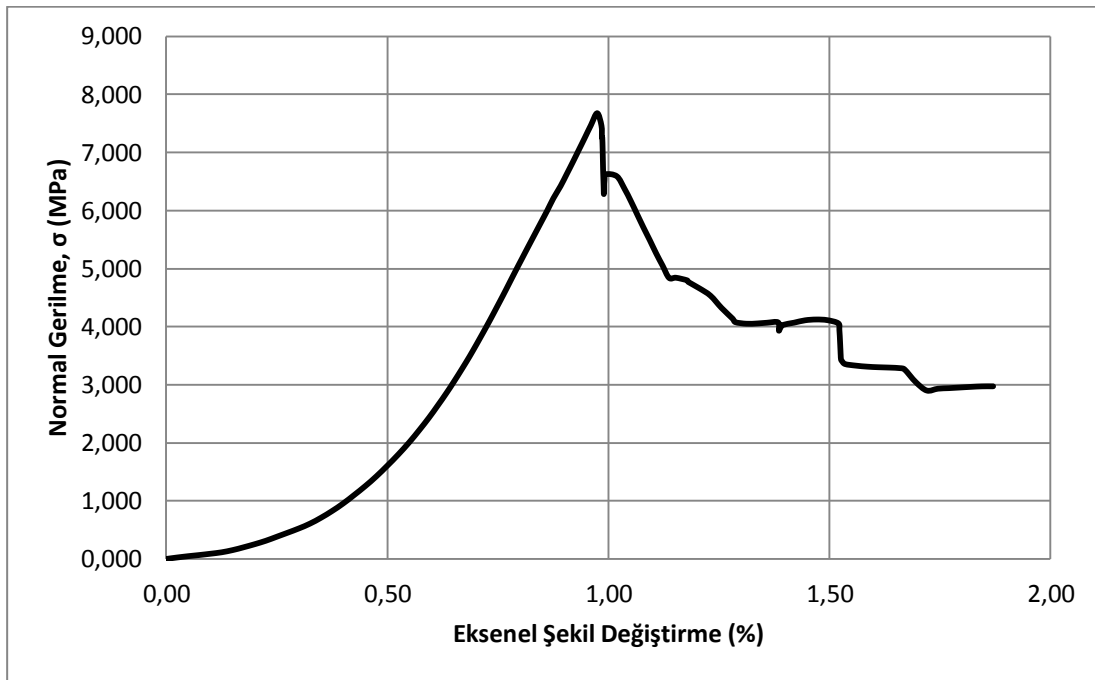
Şekil A.52 : 3-4-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



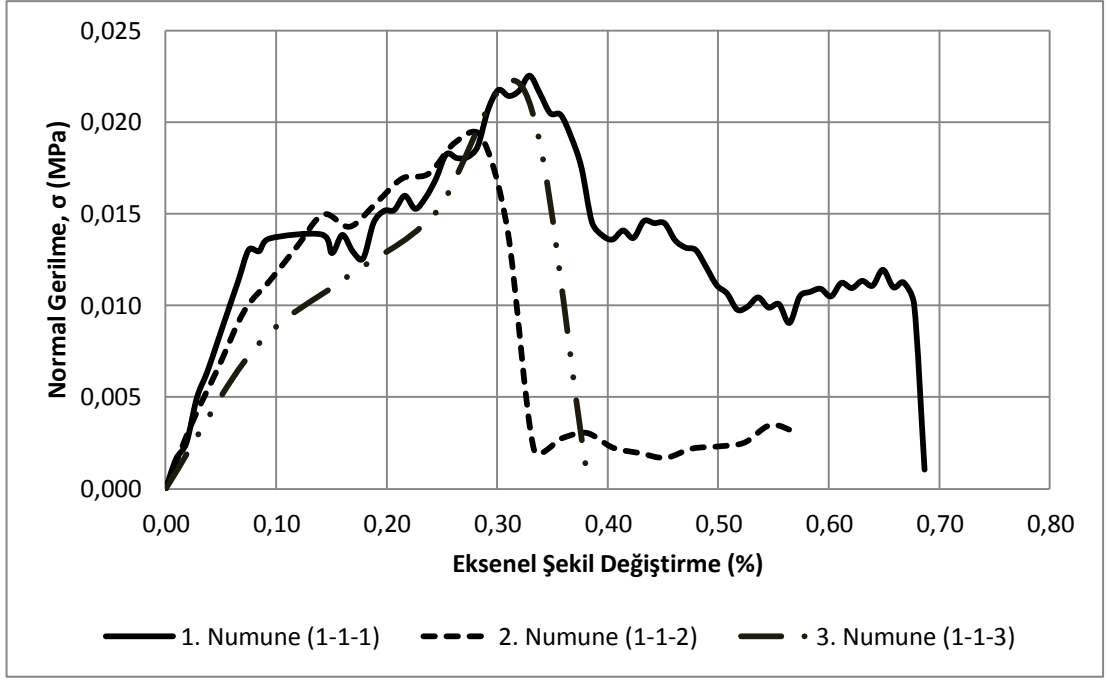
Şekil A.53 : 3-5-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



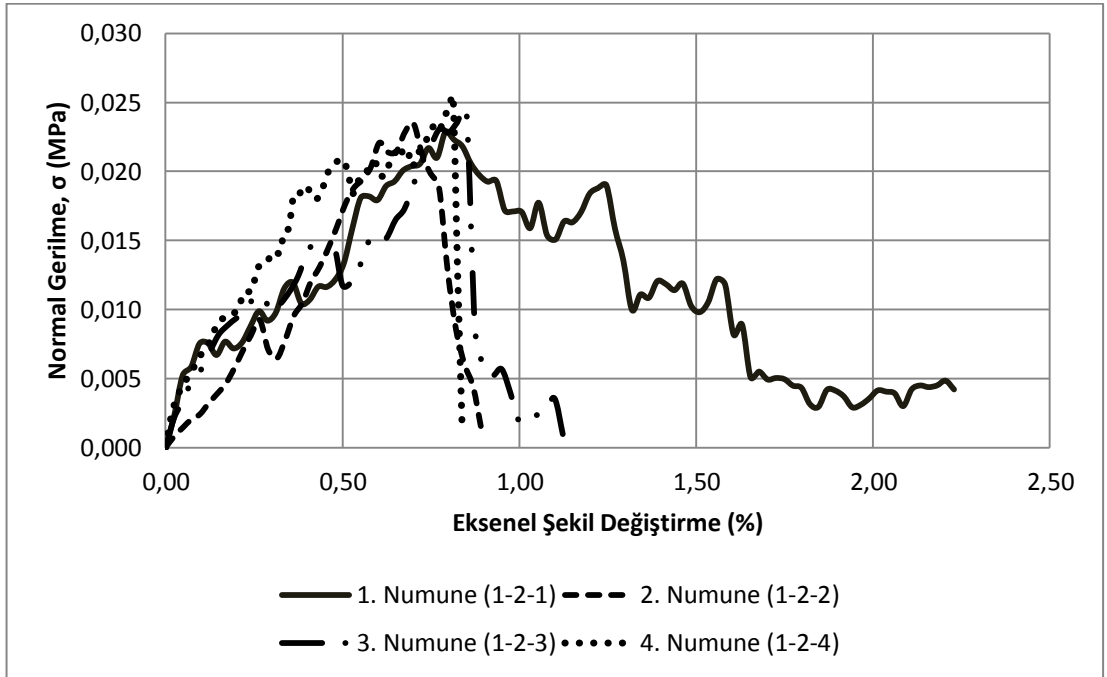
Şekil A.54 : 3-5-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



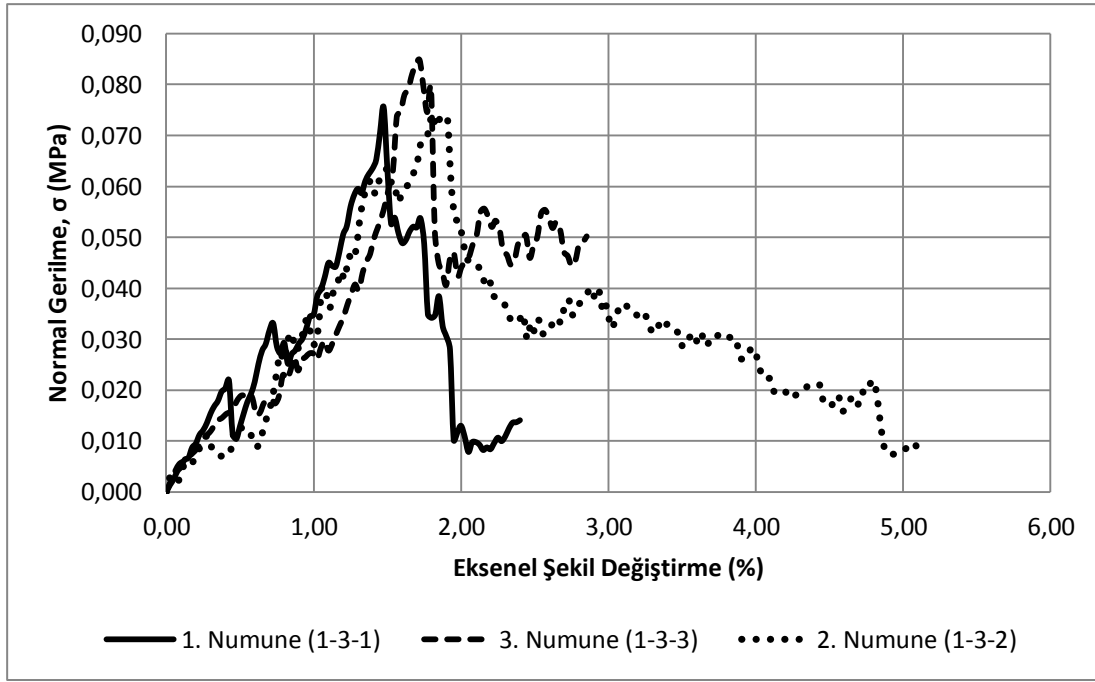
Şekil A.55 : 3-5-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



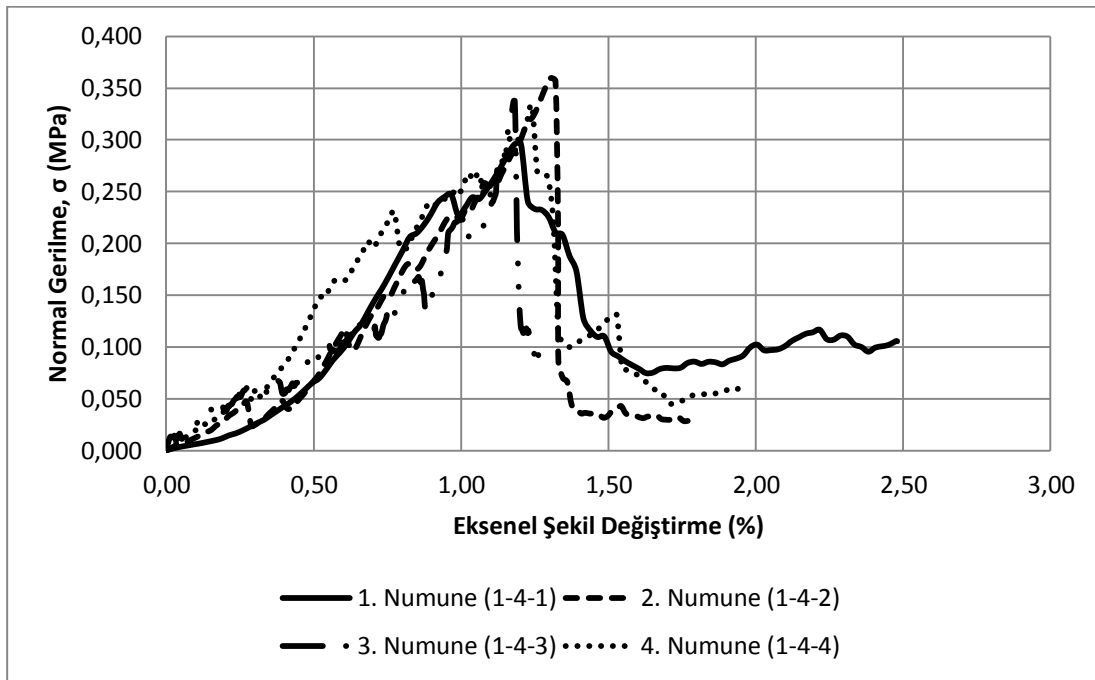
Şekil A.56 : %100 köpük kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 1)



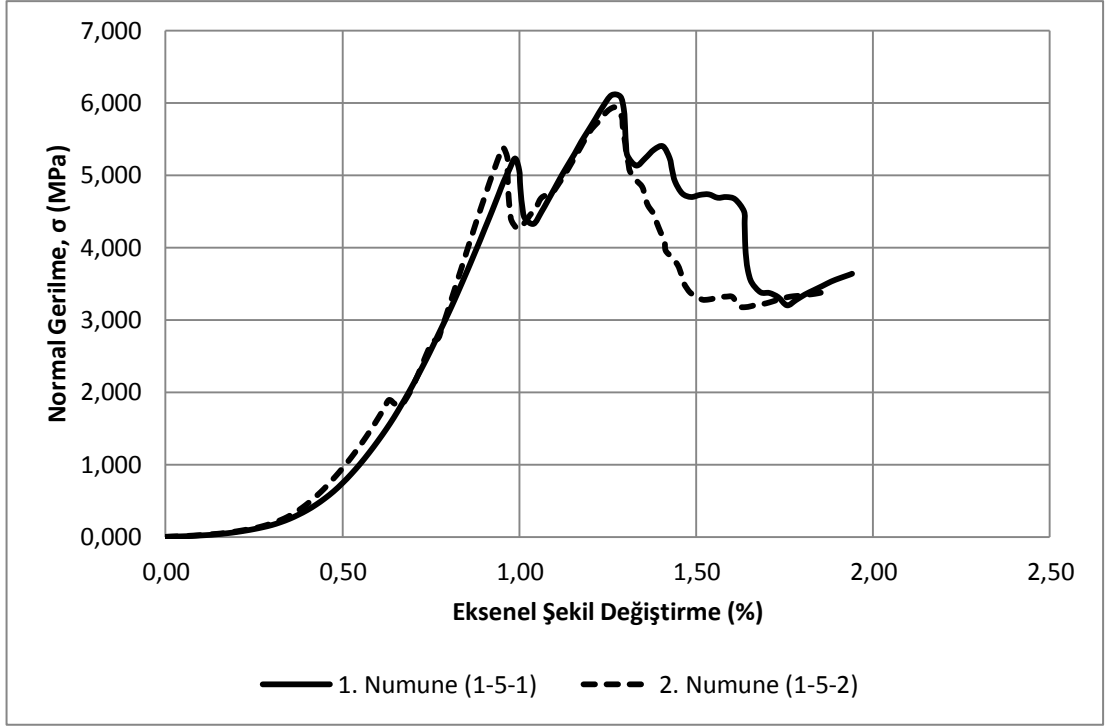
Şekil A.57 : %75 köpük - %25 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 1)



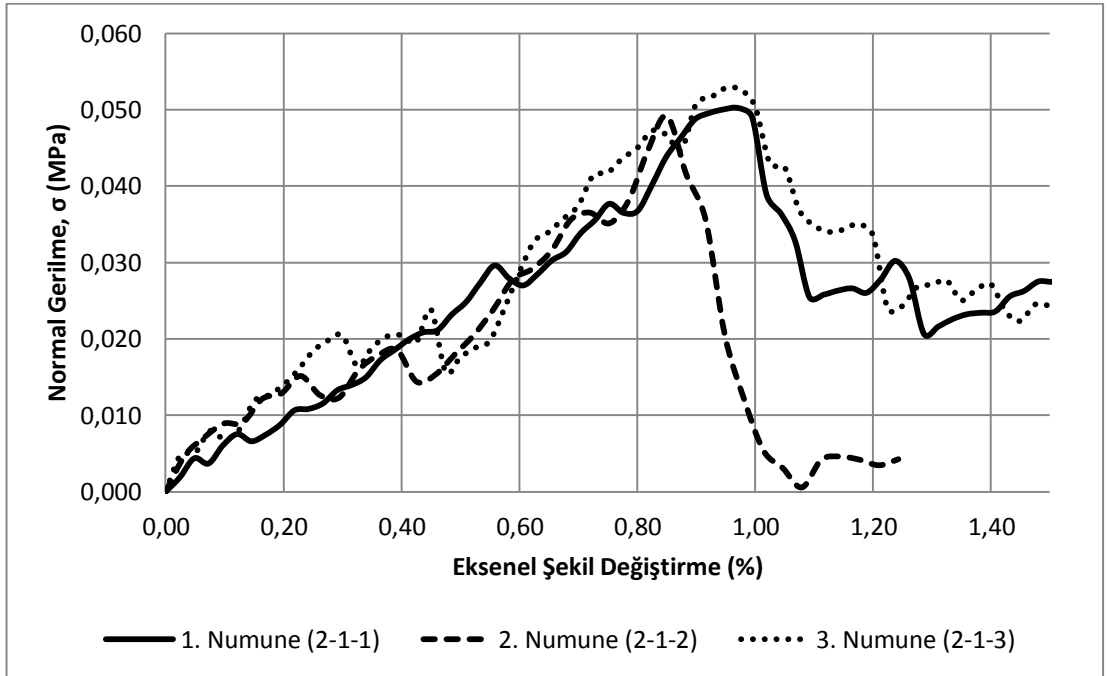
Şekil A.58 : %50köpük - %50 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 1)



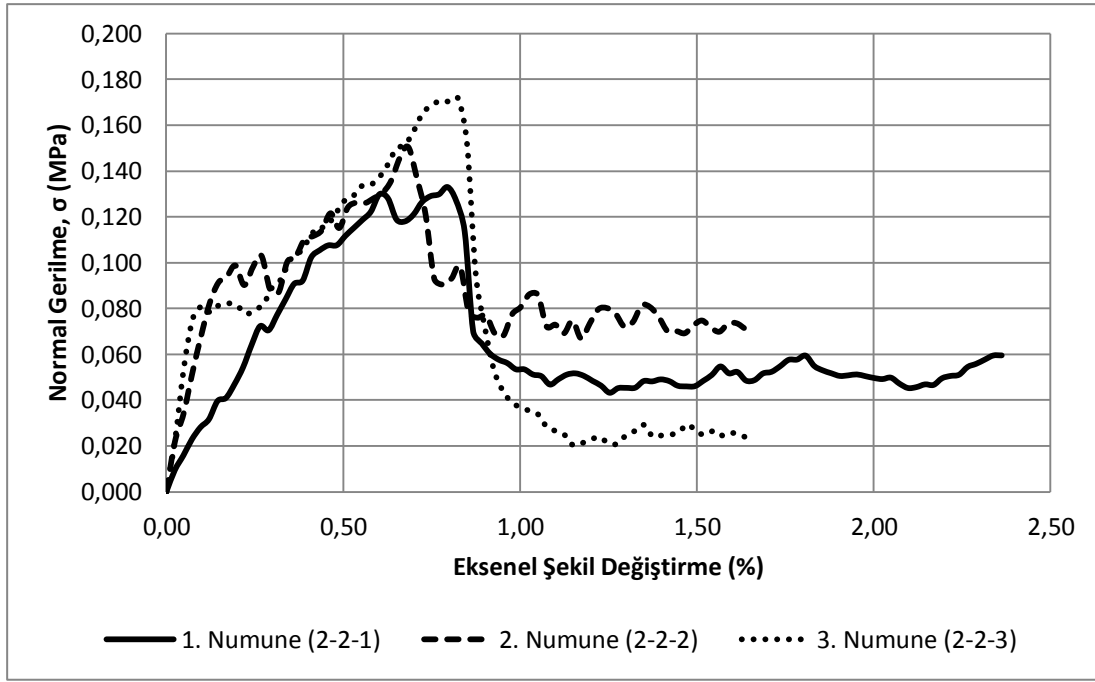
Şekil A.59 : %25 köpük - %75 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 1)



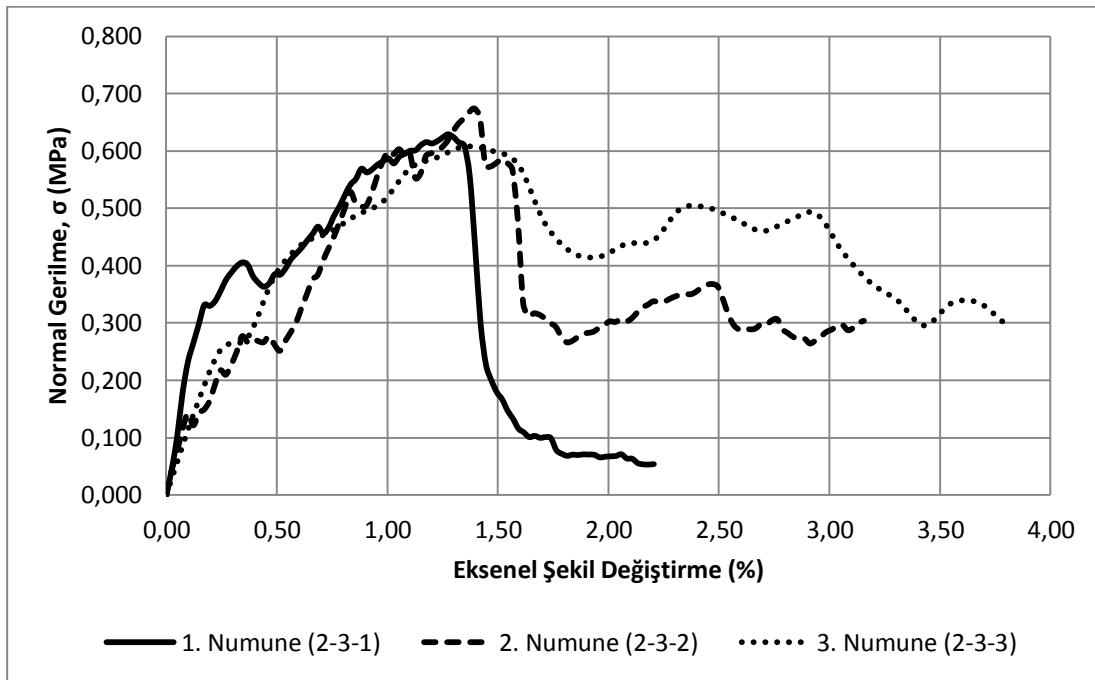
Şekil A.60 : %100 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 1)



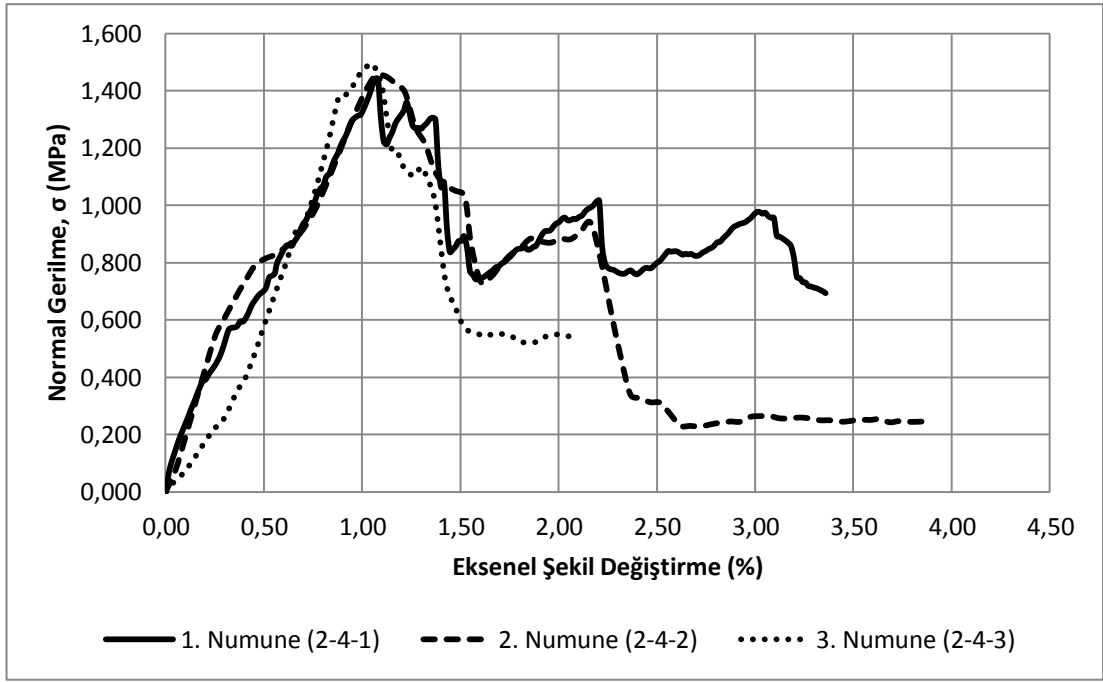
Şekil A.61 : %100 köpük kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 2)



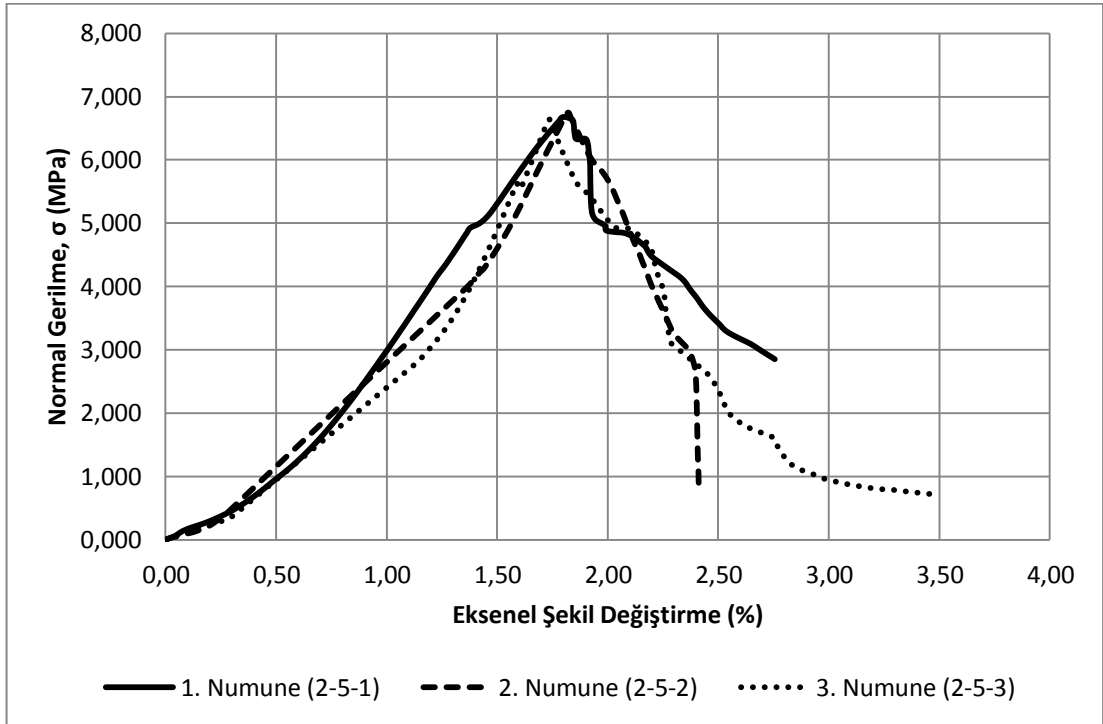
Şekil A.62 : %75 köpük - %25 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 2)



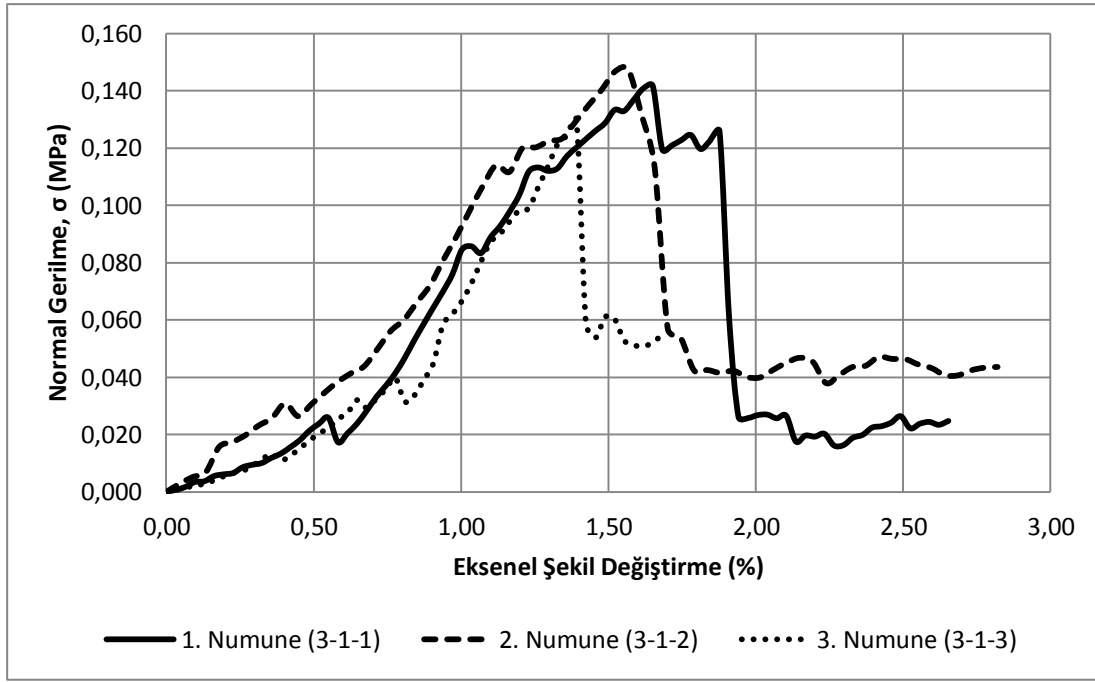
Şekil A.63 : %50 köpük - %50 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 2)



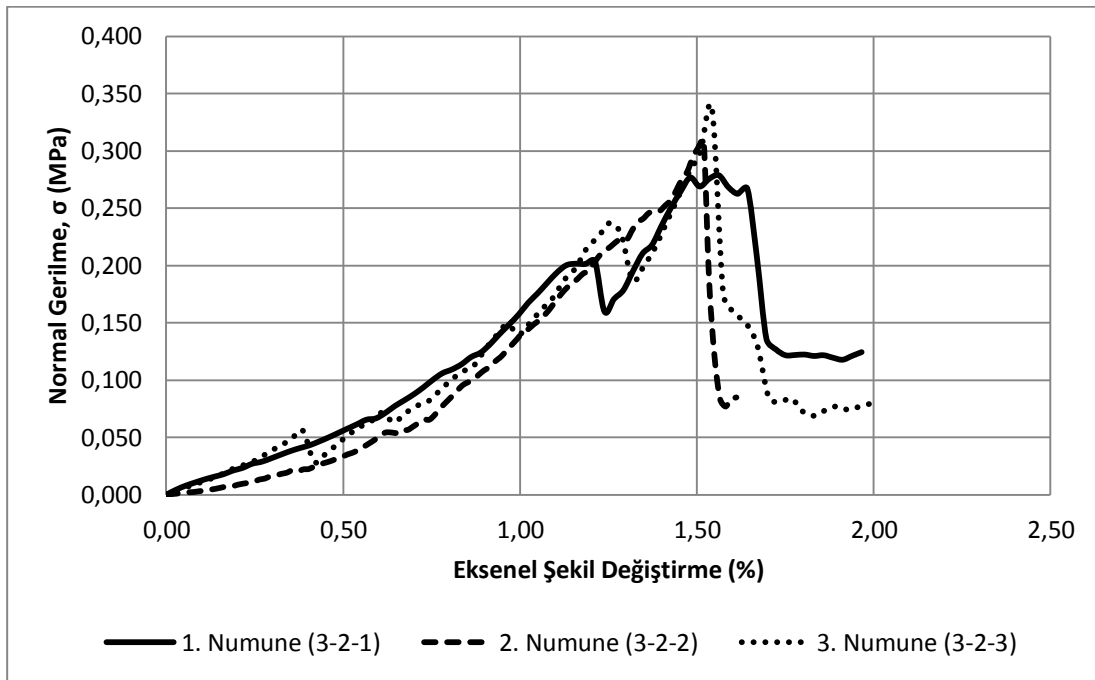
Şekil A.64 : %25 köpük - %75 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 2)



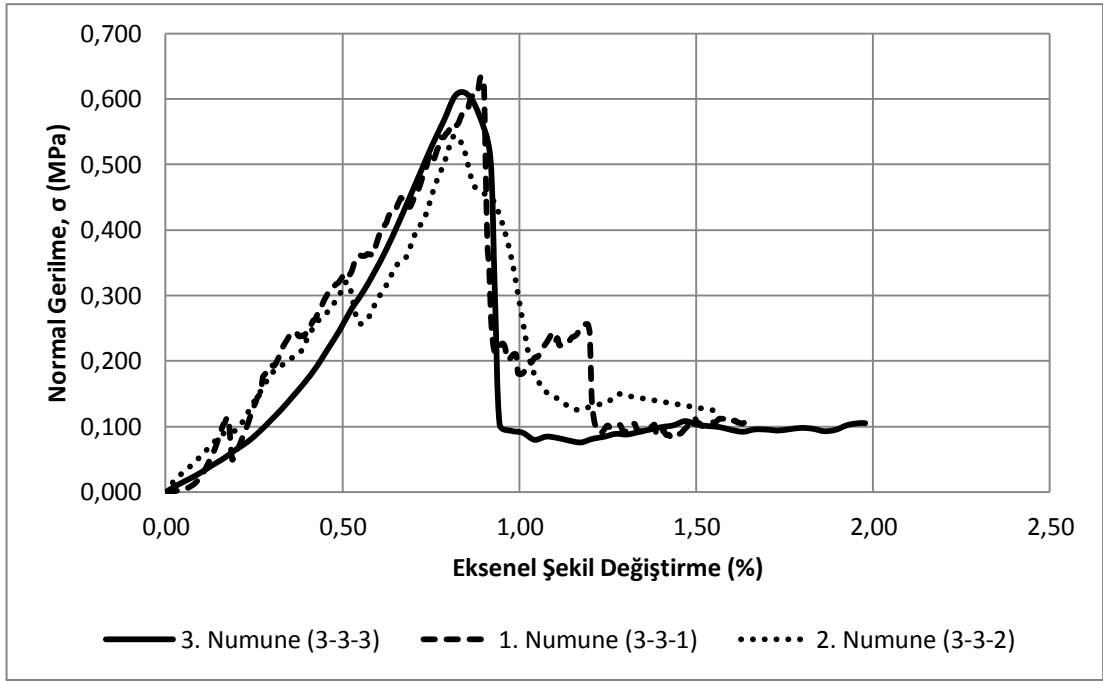
Şekil A.65 : %100 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 2)



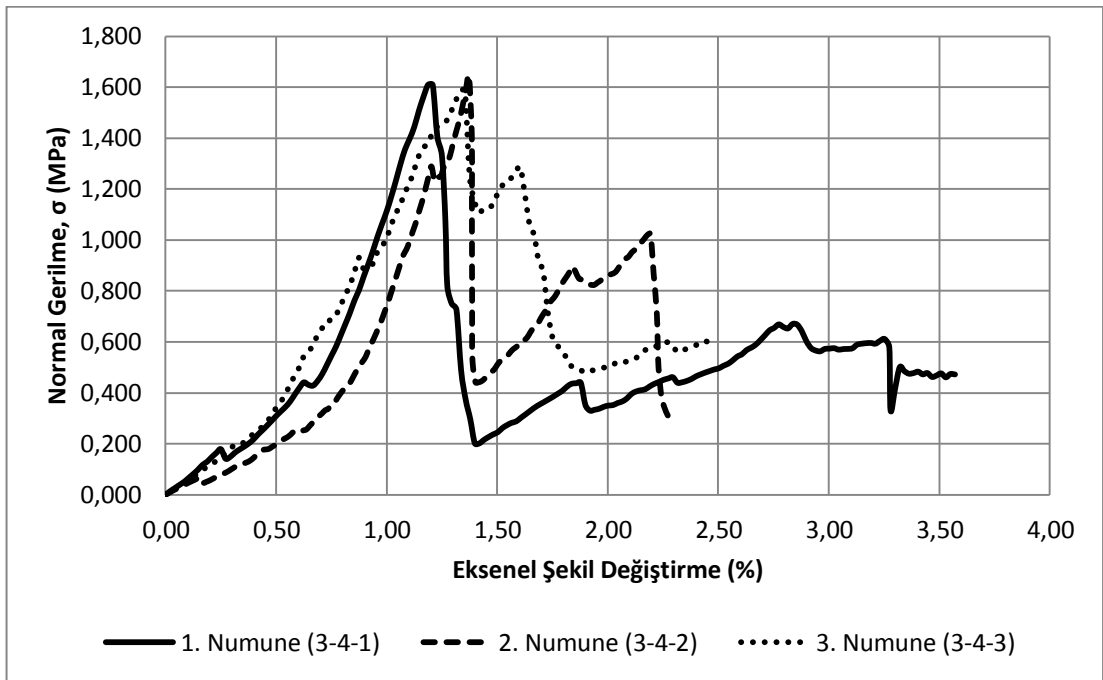
Şekil A.66 : %100 köpük kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 3)



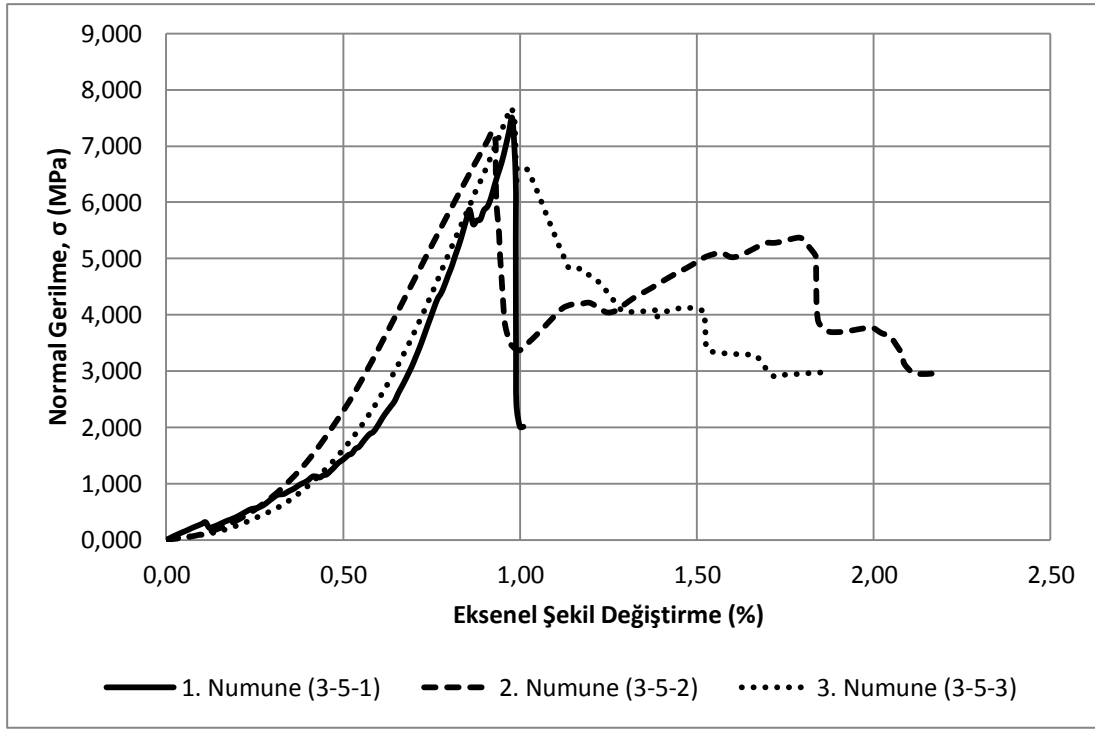
Şekil A.67 : %75 köpük - %25 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 3)



Şekil A.68 : %50 köpük - %50 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 3)

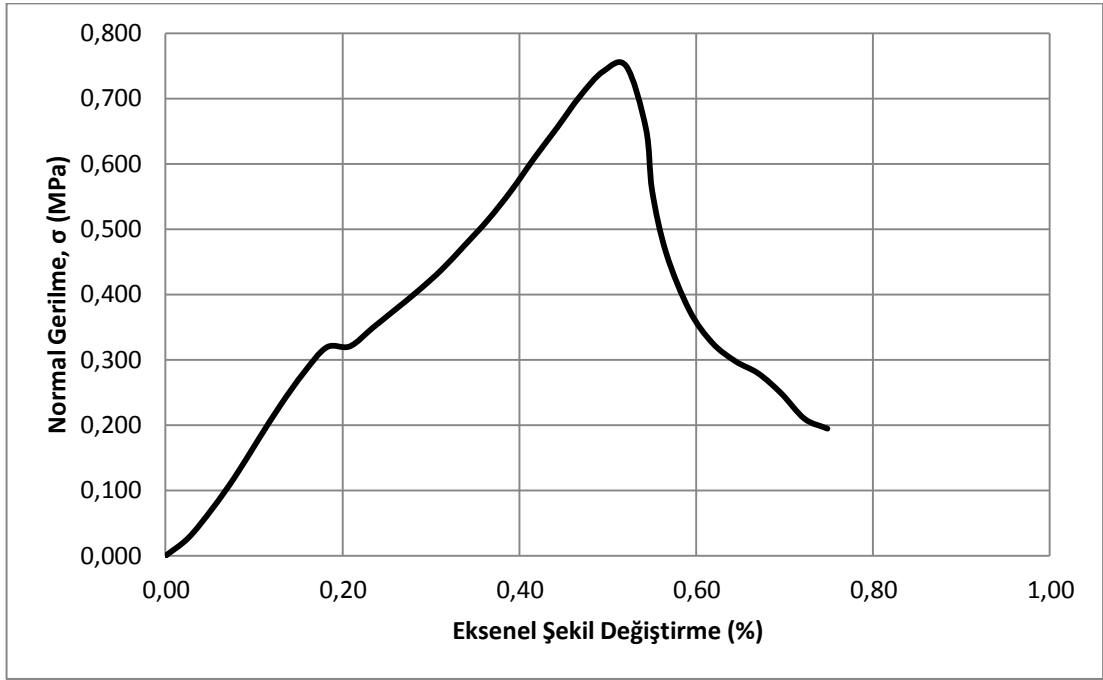


Şekil A.69 : %25 köpük - %75 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 3)

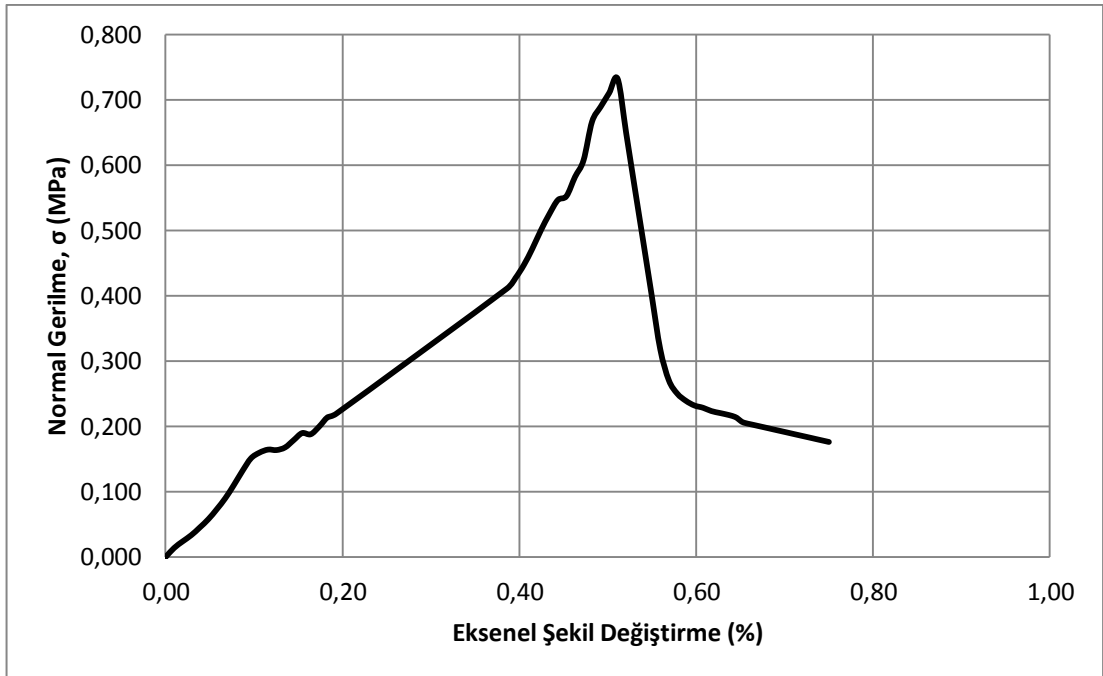


Şekil A.70 : %100 kum kullanılarak üretilmiş karışımların normal gerilme – aksenal şekil değiştirme davranışı (Ç.O. = 3)

EK A.3



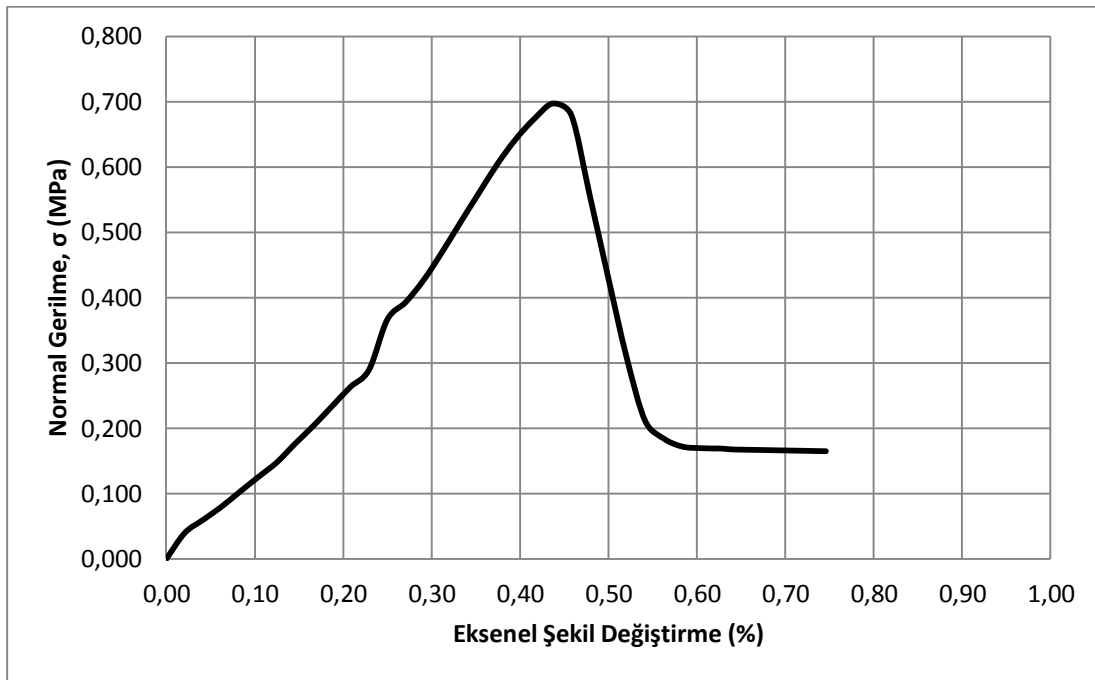
Şekil A.71 : 7-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



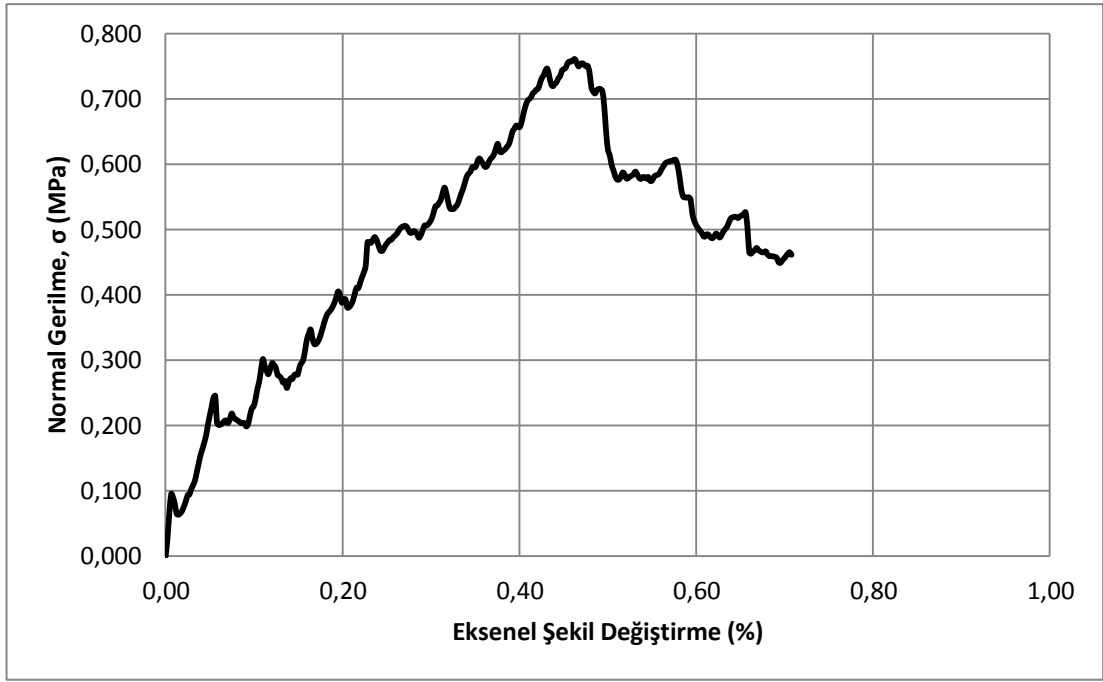
Şekil A.72 : 7-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



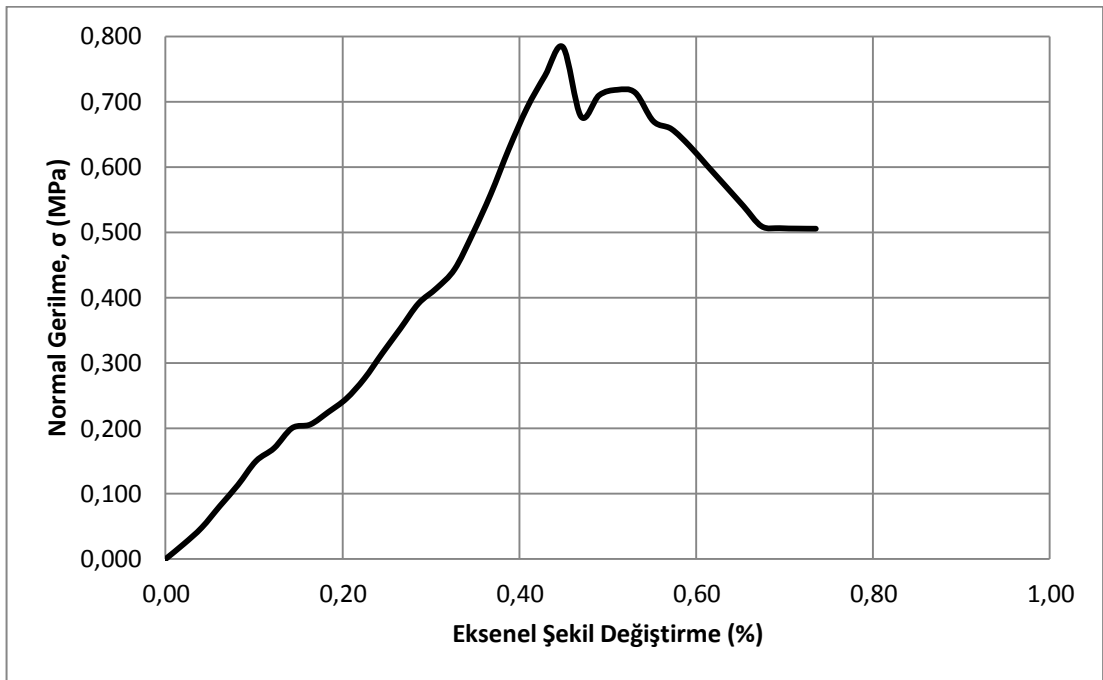
Şekil A.73 : 7-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



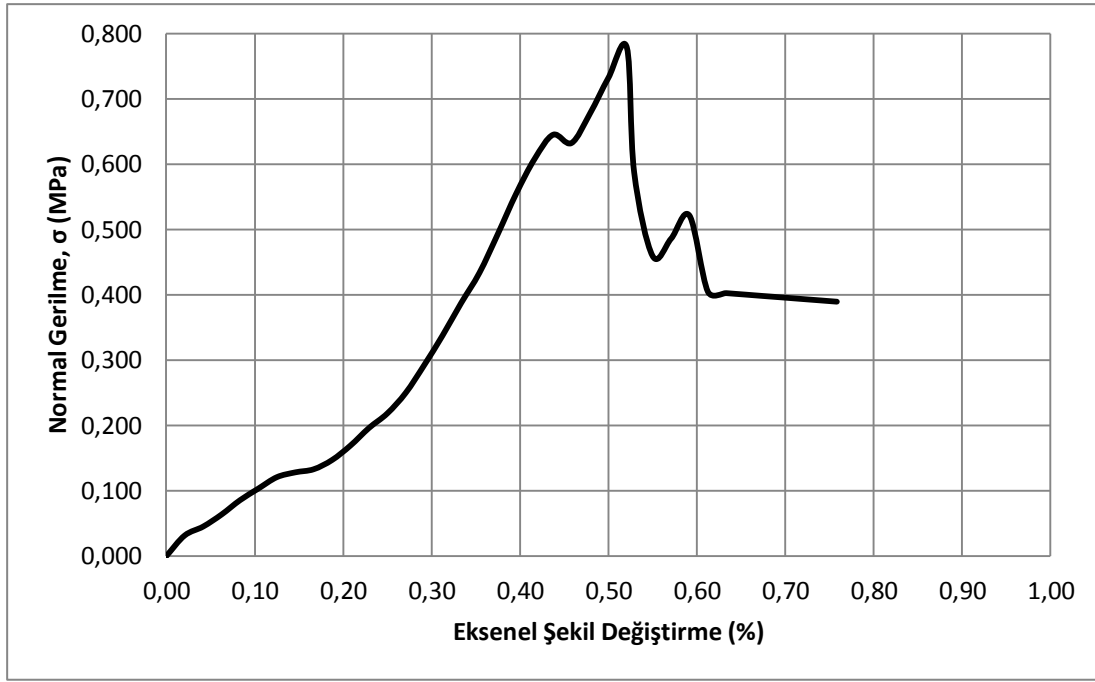
Şekil A.74 : 7-4 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



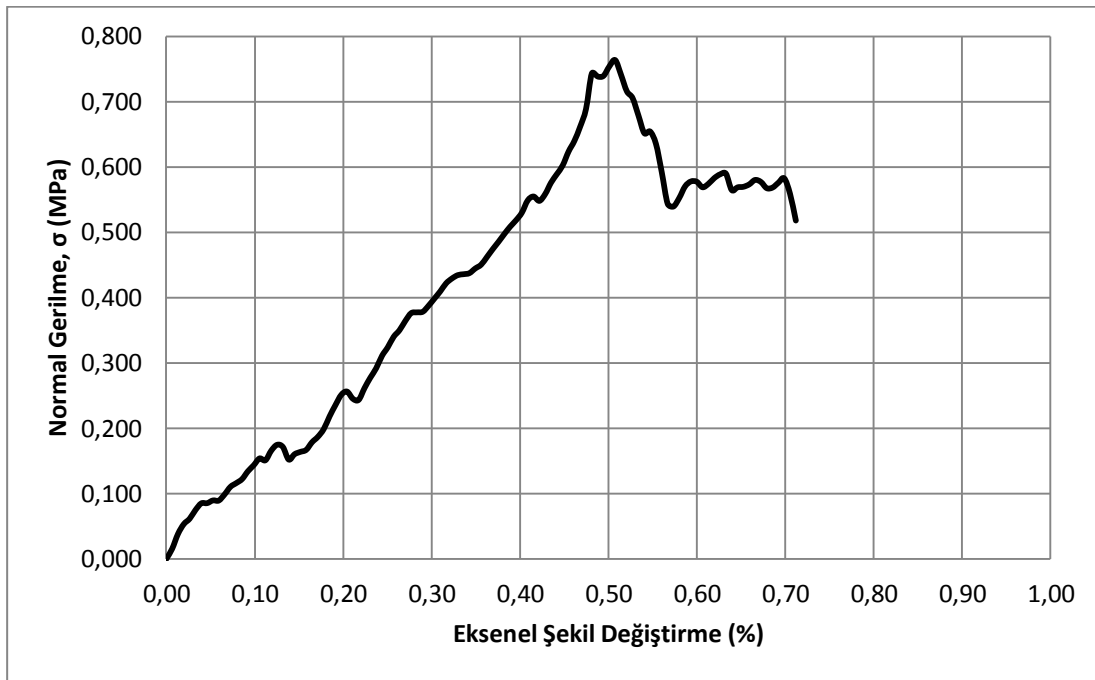
Şekil A.75 : 7-5 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



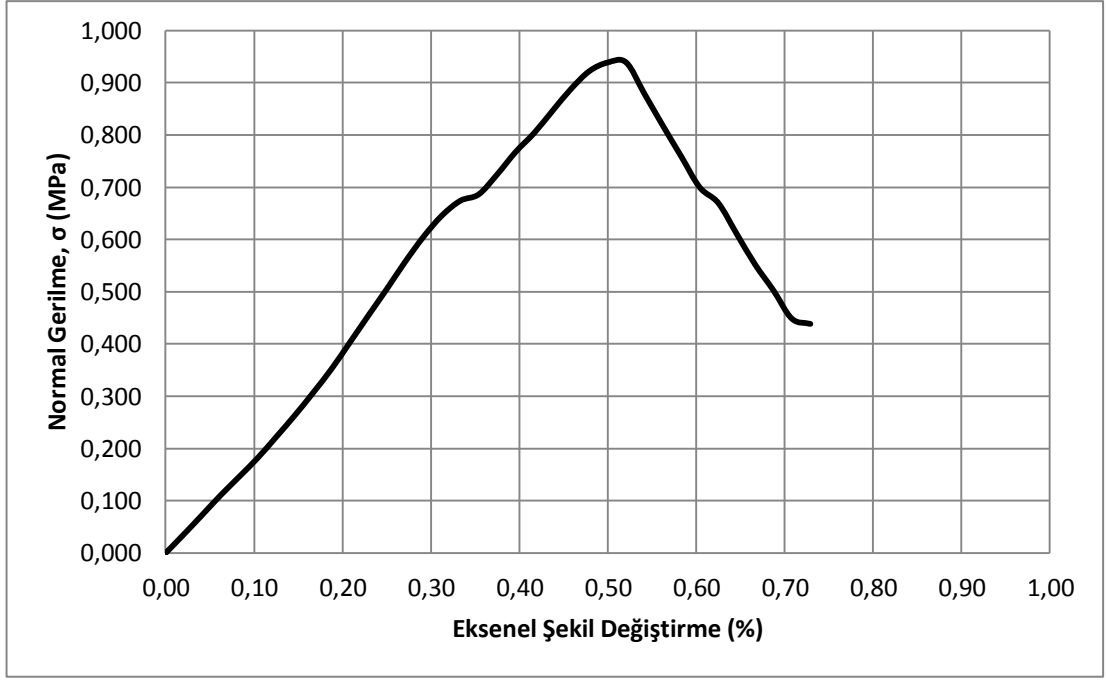
Şekil A.76 : 7-6 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



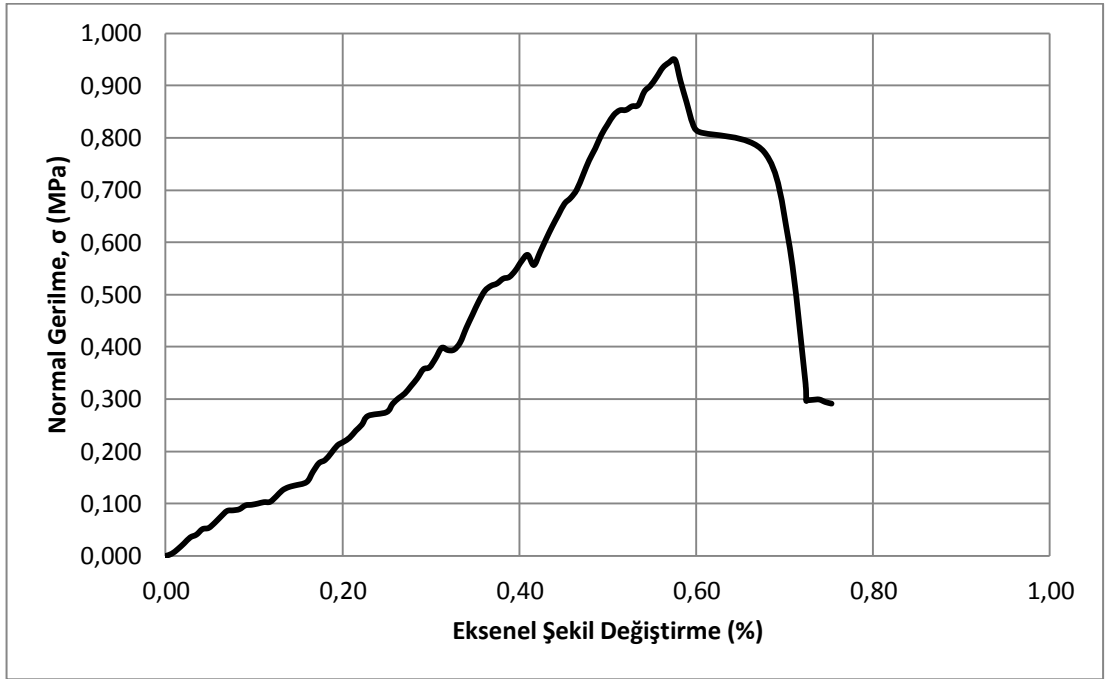
Şekil A.77 : 7-7 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



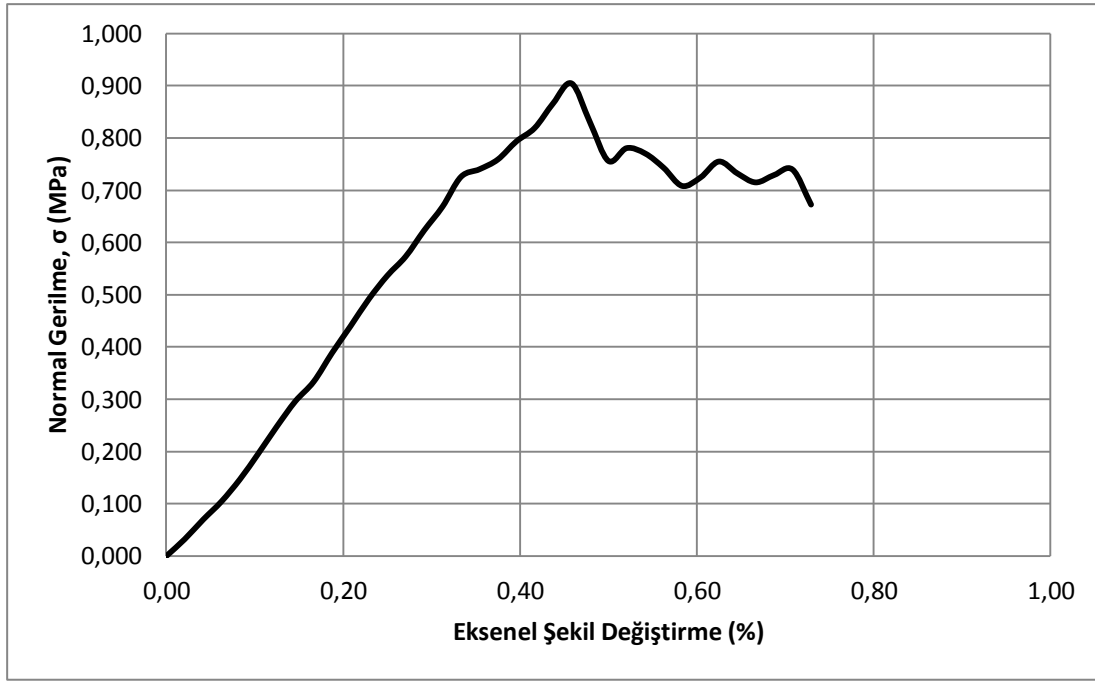
Şekil A.78 : 7-8 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



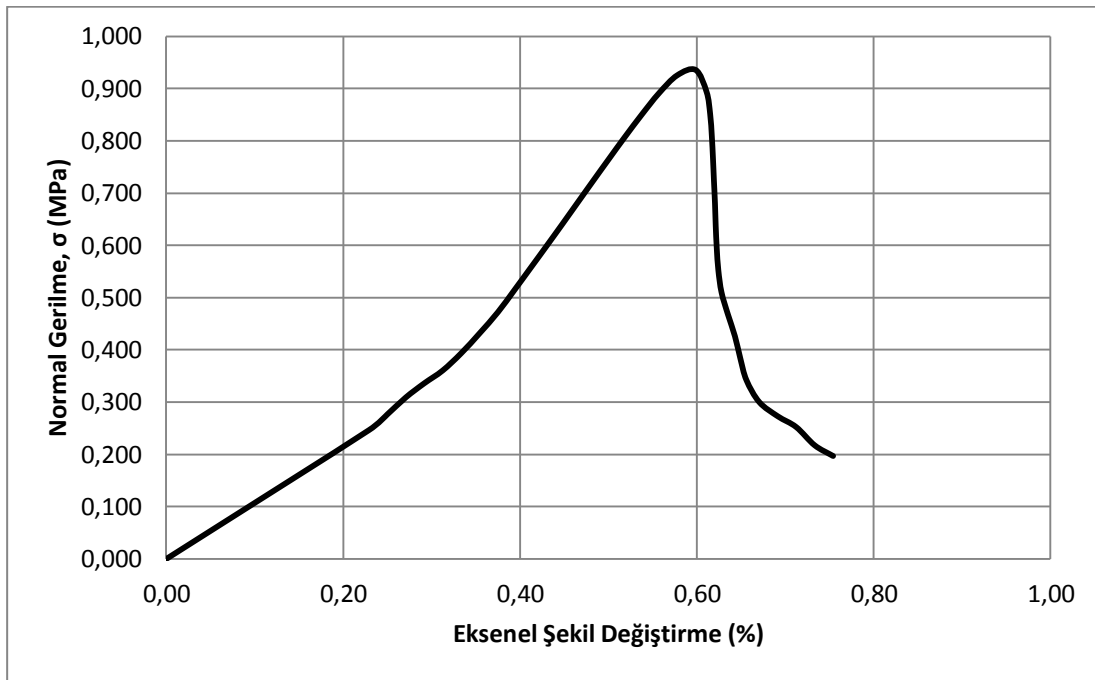
Şekil A.79 : 28-1 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



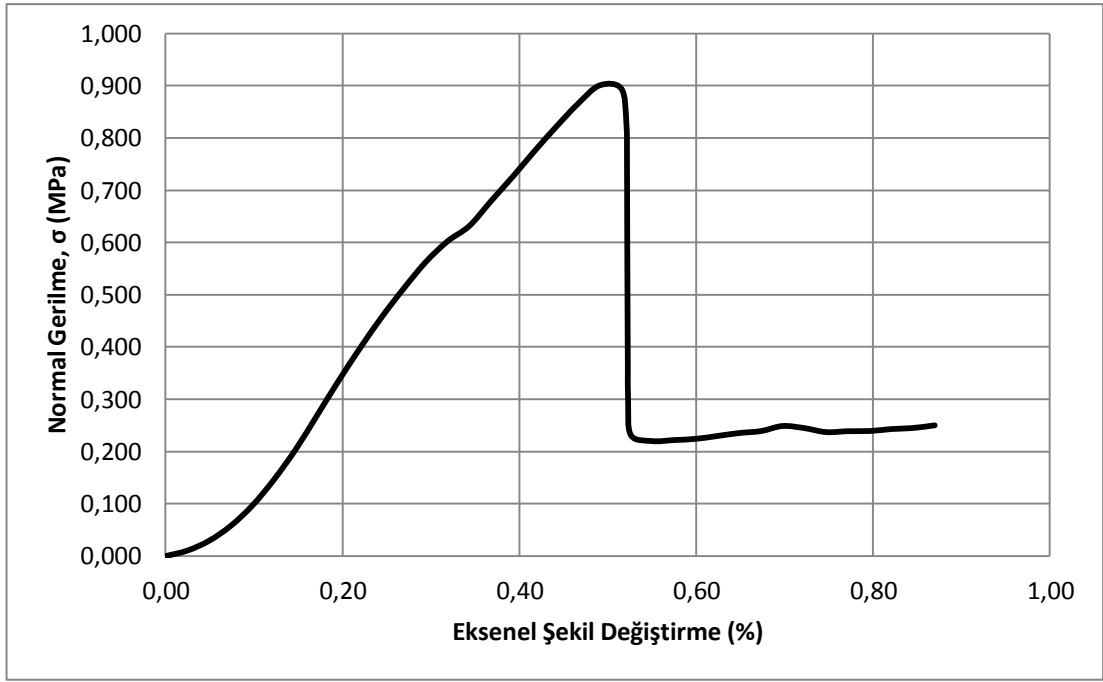
Şekil A.80 : 28-2 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



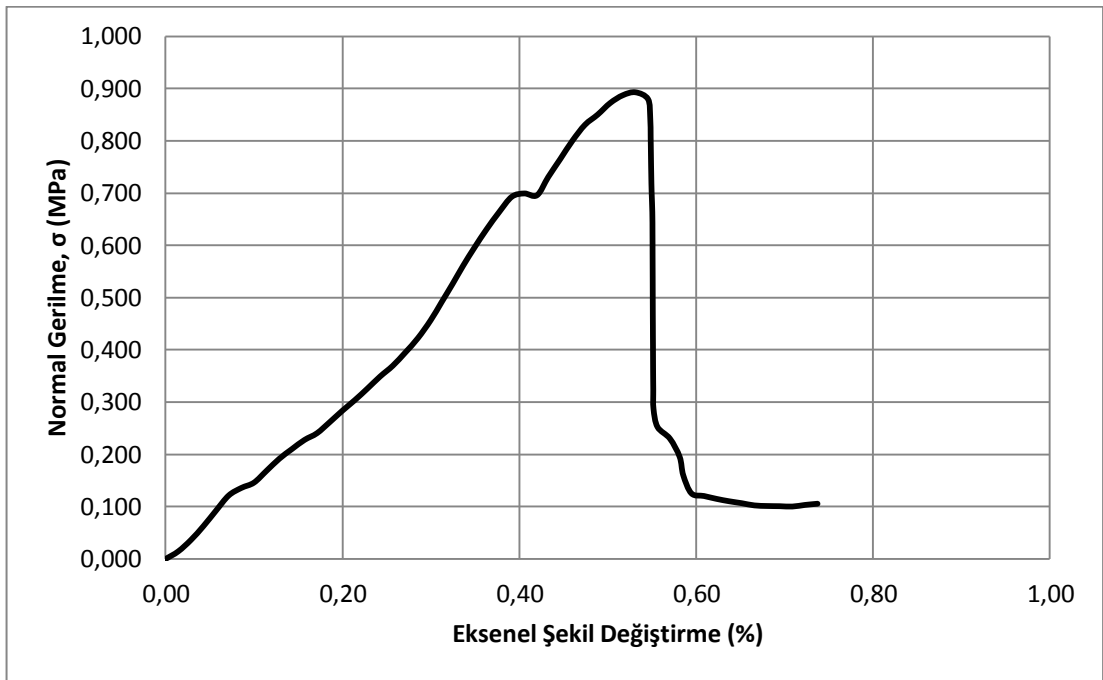
Şekil A.81 : 28-3 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



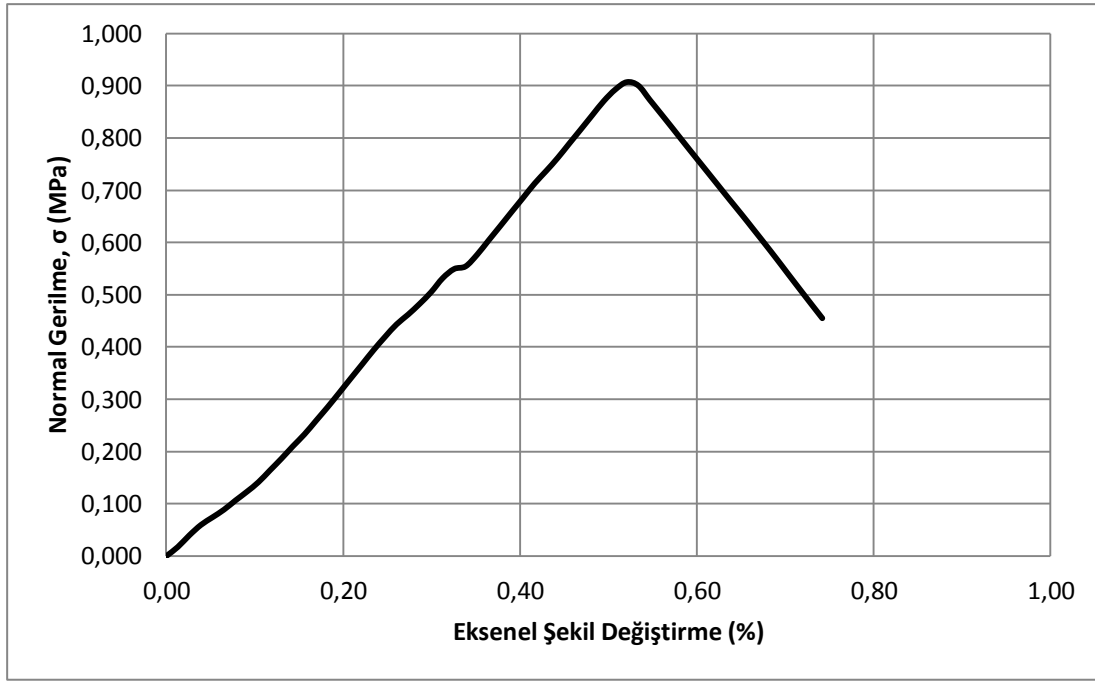
Şekil A.82 : 28-4 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



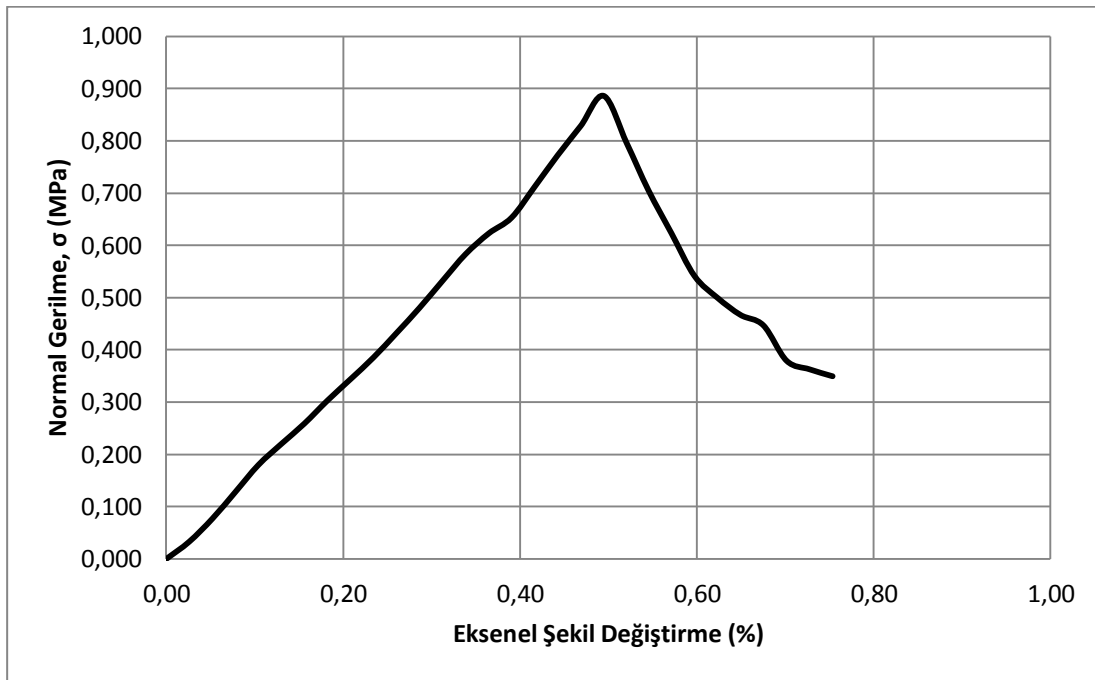
Şekil A.83 : 28-5 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



Şekil A.84 : 28-6 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



Şekil A.85 : 28-7 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı



Şekil A.86 : 28-8 kodlu numunenin normal gerilme – eksenel şekil değiştirme davranışı

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Erman Yiğit Tuncel

Doğum Yeri ve Tarihi: Ankara, 1987

Adres: İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, Yapı Malzemesi Laboratuvarı

E-Posta: tuncele@itu.edu.tr

Lisans: İ.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü