

**SIKIŞTIRILMIŞ KİL DUVARLARIN YAPISAL
DAVRANIŞLARININ VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN
DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ**

İNŞ. YÜK. MÜH. BATUHAN AYKANAT

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. MEHMET EMİN ARSLAN**

DÜZCE, 2024

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SIKIŞTIRILMIŞ KİL DUVARLARIN YAPISAL
DAVRANIŞLARININ VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN
DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Batuhan AYKANAT tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Mehmet Emin ARSLAN

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mehmet Emin ARSLAN

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Alper BİDECİ

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet EMİROĞLU

Sakarya Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 08/01/2024

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

08 Ocak 2024

Batuhan AYKANAT

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim boyunca akademik teamül ve davranışların en güzel örneklerini bana öğreten ve yoğun çalışma programına rağmen çalışmamı en başından yazımına kadar sürekli takip edip, bu süre içinde bana bilimsel düşünce disiplini kazandıran, tezimin her aşamasında bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım danışman hocam Prof. Dr. Mehmet Emin ARSLAN'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen tez izleme komitesindeki değerli hocalarım Prof. Dr. Serkan SUBAŞI ve Doç. Dr. Alper BİDECİ'ye teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Tez konumun belirlenmesinde, deneysel çalışmalarımın doğru şekilde ilerlemesinde ve deney sonuçlarının değerlendirilmesinde büyük katkıları bulunan ayrıca çalışmalarım tamamlandığında jüri üyeliği gibi önemli bir görevi de üstlenerek tezimi titizlikle inceleyen Prof. Dr. Mehmet EMİROĞLU'na minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Çalışma sürecimi yakından takip eden ve akademik hayatıma yaptığı yönlendirmeler ve katkılarla beni sürekli destekleyen, tezimin değerlendirilmesinde büyük emeği bulunan Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK'a teşekkürlerimi sunarım.

Burada, öğrenim hayatım boyunca bana emeği geçen tüm hocalarımı saygı ile anarken, çalışmam süresince bana olumlu düşünceleri ve pozitif enerjisi ile her türlü desteği sağlayan eşim Merve KURTAY AYKANAT'a, ömürlerini yetiŐmeme adayan, fedakârlıklarını asla unutamayacağım annem Esin AYKANAT ve babam Tuncay AYKANAT'a minnettar olduğumu belirtmek ister ve teşekkürlerimi sunarken yapmış olduğum tezin ülkemiz için yararlı olmasını içtenlikle dilerim.

Bu çalışma boyunca, Düzce'de bulunan değerli sanayi kuruluşlarından olan Fibrobeton Yapı Elemanları ve İntek Kalıp ve İskele'ye yardımlarını ve desteklerini esirgemedikleri için minnettar olduğumu belirtmek isterim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xi
SİMGELER	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
EXTENDED ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. KİLLİ TOPRAK	4
1.1.1. Killerin Sınıflandırılması	5
1.1.1.1. <i>Minerolojik Özelliklerine Göre Killer</i>	5
1.1.1.2. <i>Yapılarına Göre Killer</i>	7
1.1.1.3. <i>Fiziksel Özelliklerine Göre Killer</i>	7
1.1.1.4. <i>Kimyasal Özelliklerine Göre Killer</i>	8
1.1.1.5. <i>Buldukları Yere ve Yataklarına Göre Killer</i>	8
1.1.2. Killerin Kullanım Alanları	8
1.2. YAPILARIN DAVRANIŞLARINI ETKİLEYEN BAZI PARAMETRELER	9
1.2.1. Rijitlik Değişimi	9
1.2.2. Süneklik Değişimi	10
1.2.3. Enerji Tüketme Kapasitesi Değişimi	11
1.3. YIĞMA YAPILAR HAKKINDA GENEL BİLGİLER	12
1.3.1. Yığma Yapıların Genel Özellikleri	12
1.3.2. Yığma Yapıların Bazı Avantajları	12
1.3.3. Yığma Yapıların Bazı Dezavantajları	13
1.3.4. Yığma Yapılarda Kullanılan Malzemeler	13
1.3.4.1. <i>Kerpiç</i>	14
1.3.4.2. <i>Doğal Taş</i>	14
1.3.4.3. <i>Ahşap</i>	14
1.3.4.4. <i>Tuğla</i>	15
1.3.4.5. <i>Gazbeton Bloklar</i>	15
1.3.4.6. <i>Beton Briket</i>	15
1.3.4.7. <i>Harç</i>	15
1.3.4.8. <i>Donatı Çeliği</i>	15
1.3.5. Yığma Yapı Çeşitleri	16
1.3.5.1. <i>Donatısız Yığma Yapılar</i>	16
1.3.5.2. <i>Donatılı Yığma Yapılar</i>	17
1.3.5.3. <i>Sarılmış Yığma Yapılar</i>	17
1.3.5.4. <i>Ön Gerilmeli Yığma Yapılar</i>	18
1.3.6. Yığma Yapı Elemanları	19
1.3.6.1. <i>Temeller</i>	19
1.3.6.2. <i>Taşıyıcı Duvarlar</i>	19
1.3.6.3. <i>Kemerler</i>	20
1.3.6.4. <i>Hatıllar ve Lentolar</i>	20
1.3.6.5. <i>Döşemeler</i>	21
1.3.6.6. <i>Tonozlar</i>	21

1.3.6.7. Kubbe	21
1.4. STATİK VE DİNAMİK YÜKLER ALTINDA YIĞMA YAPILARIN DAVRANIŞLARI	22
1.4.1. Statik Yük Etkisi Altında Yığma Duvar Davranışı	22
1.4.1.1. Eksenel Basınç	23
1.4.1.2. Eksenel Çekme	24
1.4.1.3. Kayma (Kesme) Etkisi	24
1.4.1.4. Yatay Yük Etkisi	25
1.4.2. Dinamik Yük Etkisi Altında Yığma Yapı Davranışı	27
1.5. DEPREM ETKİSİ ALTINDA YIĞMA YAPI ELEMANLARINDA MEYDANA GELEN ETKİLER VE HASAR NEDENLERİ.....	28
1.5.1. Yığma Yapı Elemanlarında Meydana Gelen Deprem Kaynaklı Etkiler	28
1.5.2. Yığma Yapı Elemanlarında Hasar Oluşum Nedenleri	28
1.6. YIĞMA YAPILAR İÇİN DEPREME DAYANIKLI TAŞIYICI SİSTEM TASARIMI.....	32
1.6.1. Yığma Yapıların Mimari Tasarımları	32
1.6.2. Yığma Yapıların Kat Sayıları ve Yükseklikleri	33
1.6.3. Yığma Yapılarda Taşıyıcı Duvar Kalınlıkları ve Yükseklikleri.....	33
1.6.4. Taşıyıcı Duvarlarda Uzunluk Sınırları	34
1.6.5. Düşey Hatıllar ve Yığma Yapılardaki Donatı Detayları	34
1.6.6. Taşıyıcı Duvarlarda Bırakılacak Boşluk Sınırları	38
1.6.7. Yığma Yapılarda Deprem Hesabı.....	39
1.6.8. Yığma Yapılarda Taşıma Gücü Yöntemine Göre Hesap	40
1.7. SIKIŞTIRILMIŞ KİL DUVARLAR VE ÜRETİM ŞEKİLLERİ.....	42
1.8. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	43
2. MATERYAL VE METOD	50
2.1. MATERYAL	50
2.1.1. Killi Toprak ve Kum	50
2.1.2. Çimento	51
2.1.3. Kireç	51
2.1.4. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu	52
2.1.5. Çinko Stearat.....	53
2.2. METOD	54
2.2.1. Numune Üretim Aşamaları ve Karışım Oranları	54
2.2.2. Malzeme Deneyleri.....	55
2.2.2.1. Proktor Deneyi.....	55
2.2.2.2. Atterberg Limit Deneyleri	56
2.2.3. Sertleşmiş Numune Deneyleri	56
2.2.3.1. Birim Hacim Ağırlık Deneyi	57
2.2.3.2. Basınç Dayanımı Deneyi.....	57
2.2.3.3. Elastisite Modülünün Belirlenmesi	57
2.2.3.4. Kayma Modülünün Belirlenmesi (Diagonal Tension Test)	58
2.2.3.5. Karsten Tüpü Deneyi	59
2.2.3.6. Sprey Erozyon Deneyi.....	60
2.2.3.7. Geelong Damla Erozyon Testi	60
2.2.3.8. Yüzey Islanabilirlik Testi.....	60
2.2.4. Çevrimsel Yük Etkisi Altında Duvar Davranışlarının Belirlenmesi	61
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	65
3.1. MALZEME DENEY SONUÇLARI.....	65
3.1.1. Standart Proktor Deneyi Bulguları	65
3.1.2. Atterberg Limitleri Deneyi Bulguları.....	65

3.2. SERTLEŞMİŞ NUMUNE DENEYLERİ	66
3.2.1. Birim Hacim Ağırlık Deneyi Bulguları	67
3.2.2. Basınç Dayanımı Deneyi Bulguları.....	68
3.2.3. Elastisite Modülü ve Kayma Modülü Deney Bulguları	70
3.2.4. Karsten Tüpü Deneyi Bulguları.....	72
3.2.5. Sprey Erozyon Deneyi Bulguları	73
3.2.6. Geelong Damla Erozyon Testi Bulguları	73
3.2.7. Yüzey Islanabilirlik Testi Bulguları	74
3.3. ÇEVİRİMSSEL YÜK ETKİSİ ALTINDA DUVAR DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ	77
3.3.1. Yük Taşıma Kapasitesi	78
3.3.2. Enerji Tüketme Kapasitesi.....	85
3.3.3. Rijitlik Azalması.....	87
3.3.4. Yerdeğiştirme Süneklikleri	89
3.4. SIKIŞTIRILMIŞ KİL DUVAR DAVRANIŞLARININ GELENEKSEL TUĞLA VE GAZBETON DUVARLAR İLE KIYASLANMASI	90
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	95
5. KAYNAKLAR	98
ÖZGEÇMİŞ.....	107

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. İlkel Barınak Örnekleri [3].	1
Şekil 1.2. UNESCO'nun "Dünya Mirası" listesine kayıtlı Mali'deki Old Towns of Djenné camii [4].	2
Şekil 1.3. Potala Sarayı Lhasa/Tibet [7].	3
Şekil 1.4. Çevrimsel yükler altında sekant rijitliğinin belirlenmesi.	10
Şekil 1.5. Eşdeğer elastoplastik enerji tüketme ölçütüne göre yerdeğiştirme sünekliği parametreleri.....	11
Şekil 1.6. Çevrimsel yükler altında enerji tüketme kapasitesi.....	12
Şekil 1.7. Yığma yapılarda kullanılan bazı malzemeler.	14
Şekil 1.8. Farklı düzende örülmüş yığma duvarlar [32], [33].	16
Şekil 1.9. Donatılı yığma yapı duvar örnekleri [33].	17
Şekil 1.10. Sarılmış yığma duvar örnekleri [33].	18
Şekil 1.11. Ön gerilmeli yığma yapılara ait örnek model [31], [34].	18
Şekil 1.12. Kemer ve kemer elemanları [38].	20
Şekil 1.13. Farklı tonoz çeşitleri [36].	21
Şekil 1.14. Kubbelerin çekme ve basınç bölgeleri [38].	22
Şekil 1.15. Eksenel yük etkisi altındaki yığma elemanların davranışı [41].	23
Şekil 1.16. Basınç etkisi altında gerilme durumları [42].	23
Şekil 1.17. Eksenel çekme etkisi altındaki yığma birim davranışı [43].	24
Şekil 1.18. Kayma etkisi altındaki yığma prizmanın davranışı [31].	25
Şekil 1.19. Düzlem dışı yatay bir yüke maruz kalan yığma duvar [44].	26
Şekil 1.20. Yetersiz harç dayanımından dolayı oluşabilecek kayma hasarı [44].	26
Şekil 1.21. Yığma duvarların eğik çekme hasarları [44].	27
Şekil 1.22. Deprem etkisi altındaki yığma duvarların düzlem içi ve düzlem dışı yüklenmesi durumu [45].	28
Şekil 1.23. Yatay yükler altındaki yığma yapılarda meydana gelen hasarlar [28].	30
Şekil 1.24. Taşıyıcı duvarların uzunlukları ve hatıllar arası mesafeler [47].	34
Şekil 1.25. Düşey hatıl detayları [47].	35
Şekil 1.26. Yatay donatıların yerleşimine ait detaylar [47].	36
Şekil 1.27. Donatılara ve etriyelere ait detaylar [47].	37
Şekil 1.28. Çatı parapet duvarı hatıl detayları [47].	37
Şekil 1.29. Döşeme panelleri arası donatı ve temel bağlantı detayları [47].	38
Şekil 1.30. Kapı ve pencere boşluklarına ait geometrik detaylar [47].	39
Şekil 1.31. Gerilme ve şekil değiştirme dağılımı [47].	41
Şekil 1.32. Kil duvarın kalıba sıkıştırılması.	43
Şekil 2.1. (a) Çalışmada kullanılan killi toprak, (b) agrega.	50
Şekil 2.2. Malzemelerin tane boyut analizi.	51
Şekil 2.3. CEM I 42,5R Portland Çimentosu.	51
Şekil 2.4. Sönmüş kireç.	52
Şekil 2.5. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu.	52
Şekil 2.6. Çinko Stearat.	53
Şekil 2.7. Karışım hazırlama aşamaları, (a) kuru karışımın karıştırılması, (b) karışım suyunun eklenmesi, (c) karışımın homojen hale gelene kadar karıştırılması, (d) kıvam kontrolü.	55
Şekil 2.8. Standart Proktor Deneyi.	56
Şekil 2.9. Likit limit deneyi (a), Plastik limit deneyi (b), Rötire limit deneyi(c).	56

Şekil 2.10. Silindir numunelerin sıkıştırma işlemi (a), Basınç dayanımı testi (b).....	57
Şekil 2.11. Elastisite modülü test düzeneği.	58
Şekil 2.12. Diagonal Tension test düzeneği.....	58
Şekil 2.13. Prizmatik Numunelerin Üretimi.	59
Şekil 2.14. Karsten Tüpü Deneyi.	59
Şekil 2.15. Sprey Erozyon Test Düzeneği.	60
Şekil 2.16. Geelong Erozyon Test Düzeneği.....	60
Şekil 2.17. Yüzey Islanabilirlik Testi.	61
Şekil 2.18. (a)Duvar üretiminde kullanılan kalıp tasarımı, (b, c)üretim aşamaları ve (d) üretilen bazı duvarlar.	62
Şekil 2.19. Deney düzeneği.	63
Şekil 2.20. Yükleme çerçevesi ve sıkıştırılmış toprak duvar.....	64
Şekil 2.21. Yükleme protokolü.	64
Şekil 3.1. Standart Proktor Test Sonuçları.....	65
Şekil 3.2. Plastisite kartı.	66
Şekil 3.3. Kuru ve ıslak birim hacim ağırlık değerleri.....	67
Şekil 3.4. Basınç dayanımı deney sonuçları.	69
Şekil 3.5. Toplam su emme miktarı (cm ³).	72
Şekil 3.6. Sprey erozyon test sonuçları.....	73
Şekil 3.7. Geelong damla erozyon test sonuçları.....	74
Şekil 3.8. Yüzey ıslanabilirlik testi bulguları.	75
Şekil 3.9. Duvarlara ait Çevrimsel Yük-Yerdeğiştirme eğrileri.	77
Şekil 3.10. Referans duvara ait zarf eğrisi ve kırılma biçimi.	79
Şekil 3.11. REFZS0.5RE kodlu duvara ait zarf eğrisi ve kırılma biçimi.	80
Şekil 3.12. 10CSRE kodlu duvara ait zarf eğrisi ve kırılma biçimi.....	81
Şekil 3.13. 10C0.5ZSRE kodlu duvara ait zarf eğrisi ve kırılma biçimi.	82
Şekil 3.14. 10BFSRE kodlu duvara ait zarf eğrisi ve kırılma biçimi.	83
Şekil 3.15. 10BF0.5SRE kodlu duvara ait zarf eğrisi ve kırılma biçimi.	84
Şekil 3.16.(a) Her bir çevrim için tüketilen enerjilerin hesabı, (b) Duvarlara ait yığışımli tüketilen enerjiler.	85
Şekil 3.17. Toplam tüketilen enerjiler.	86
Şekil 3.18. (a) Her çevrim için sekant rijitliğinin hesaplanması, (b) Duvarların rijitlik azalmaları.	87
Şekil 3.19. %1 ve %3,5 ötelenme oranlarına ait rijitlik değerleri.....	88
Şekil 3.20. Yerdeğiştirme süneklikleri hesaplanması.....	89
Şekil 3.21. Geleneksel tuğla ve gazbeton bloklardan üretilen duvarlar ile sıkıştırılmış toprak duvarların yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması.....	90
Şekil 3.22. Sıkıştırılmış toprak, tuğla ve gazbeton duvarlara ait karşılaştırmalı yığışımli tüketilen enerjiler.	91
Şekil 3.23.Sıkıştırılmış toprak, tuğla ve gazbeton duvarlara ait karşılaştırmalı toplam tüketilen enerjiler.....	91
Şekil 3.24. (devam) Sıkıştırılmış toprak, tuğla ve gazbeton duvarlara ait kırılma biçimleri.	93

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 1-1. Japonya Uluslararası Deprem Mühendisliği Kurumu tarafından hazırlanan yığma yapılar için hasar kriterleri tablosu [28].	31
Çizelge 1-2. İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Uygulama Merkezi tarafından hazırlanan yığma yapılar için hasar kriterleri [28].	31
Çizelge 1-3. Yığma bina taşıyıcı sistemleri için tasarım detayları [47].	33
Çizelge 1-4. Kesme kuvveti etkisi altındaki yığma duvarların geometrik koşulları [47].	34
Çizelge 2-1. Çimentoya ait kimyasal içerikler.	51
Çizelge 2-2. Sönmüş kirece ait kimyasal içerikler.	52
Çizelge 2-3. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufuna ait kimyasal içerikler.	53
Çizelge 2-4. Çinko stearat'a ait bazı özellikler.	53
Çizelge 2-5. Numune Tanımlamaları.	54
Çizelge 2-6. Karışım oranları.	55
Çizelge 3-1. Limit deneyleri sonuçları.	66
Çizelge 3-2. Birim hacim ağırlık deneyi bulguları.	67
Çizelge 3-3. Ortalama Basınç Dayanımı Değerleri.	68
Çizelge 3-4. Karşılaştırmalı basınç dayanımı değişimleri.	69
Çizelge 3-5. Elastisite modülü, kayma modülü ve duvar deneyleri için seçilen karışımlar.	70
Çizelge 3-6. Elastisite modülü ve kayma modülü deney sonuçları.	71
Çizelge 3-7. Karşılaştırmalı elastisite modülü değişimleri.	71
Çizelge 3-8. Karşılaştırmalı toplam tüketilen enerji değişimleri.	86
Çizelge 3-9. Karşılaştırmalı başlangıç rijitlikleri değişimleri.	87
Çizelge 3-10. Duvarların yerdeğiştirme süneklikleri.	89
Çizelge 3-11. Karşılaştırmalı toplam tüketilen enerji değişimleri.	92

KISALTMALAR

ASTM	American Society for Testing and Materials
EN	European Standard
FEMA	Federal Emergency Management Agency
LVDT	Linear variable differential transformer
Min.	Minimum
Max.	Maksimum
NaOH	Sodyum Hidroksit
NZS	New Zealand Standards
ÖGYFC	Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TS	Türk Standardı
USCS	Unified Soil Classification System

SİMGELER

A	Kesit Alanı
E	Elastisite Modülü
E_{duv}	Duvar Elastisite Modülü
G	Kayma Modülü
G_{duv}	Duvar Kayma Modülü
N_{Ed}	Duvara Düşey Doğrultuda Etki Eden Tasarım Kuvveti
N_{Rd}	Düşey Yük Tasarım Dayanımı
f_d	Tasarım Basınç Dayanımı
λ	Narinliğe Bağlı Kapasite Azalma Katsayısı
V_{Ed}	Duvara Etki Eden Düşey Tasarım Kesme Kuvveti
V_{Rd}	Duvar Kesme Kuvveti Dayanımı
b	Duvar Yüksekliğinin Duvar Uzunluğuna Oranı
M_{Rd}	Tasarım Dayanım Momenti
M_{Ed}	Duvara Etki Eden Tasarım Momenti
t_{ef}	Duvar Etkin Kalınlığı
\emptyset	Donatı Çapı
μ	Yerdeğiştirme Sünekliği
δ	Yatay Yerdeğiştirme
δ_u	Nihai Yerdeğiştirme

ÖZET

SIKIŞTIRILMIŞ KİL DUVARLARIN YAPISAL DAVRANIŞLARININ VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Batuhan AYKANAT

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Emin ARSLAN

Ocak 2024, 106 sayfa

Sıkıştırılmış kil duvarların yığma yapıların imalatında kullanımını hızla yaygınlaşmaktadır. Bunun en önemli nedenleri, killi toprağa kolay ulaşılması, yapım maliyetlerinin düşük olması ve çevre dostu bir malzeme olmasıdır. Bunun yanında kullanım ömrünü tamamladığında geri kullanıma imkân vermesi, bu yapım tekniğini çevresel olarak avantajlı hale getirmektedir. Sıkıştırılmış kil duvarların, günümüz ihtiyaçlarını ve yönetmelik koşullarını karşılamaları için bazı mekanik ve durabilite özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, sıkıştırılmış kil duvarların stabilize edilerek, istenen özellikleri kazanmaları sağlanmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, farklı stabilizasyon teknikleri ile üretilmiş sıkıştırılmış kil duvarların yapısal davranışlarının ve durabilite özelliklerinin belirlenmesidir. Sıkıştırılmış kil duvarların stabilizasyonları için çimento, kireç ve alkali aktivasyonlu yüksek fırın cürufu kullanılmış ve belirli oranlarda killi topraktan oluşan referans karışıma ilave edilmiştir. Elde edilen farklı karışımların mekanik ve durabilite özelliklerinin belirlenmesi amacıyla silindir ve prizmatik numuneler üretilmiştir. Çalışmada kullanılacak killi toprağın malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, atterberg limit deneyleri ve standart proktor deneyi yapılmıştır. Ayrıca sıkıştırılmış kil duvarların, basınç dayanımı, elastisite modülü ve kayma modülü gibi bazı mekanik özellikleri belirlenmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına göre durabilite deneylerinde kullanılacak karışımlar seçilmiştir. Seçilen karışımların durabilite özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla çinko stearat belirli oranlarda karışımlara ilave edilmiştir. Sıkıştırılmış kil duvarların durabilite özelliklerinin belirlenmesi için karsten tüpü, sprej erozyon testi, geelong erozyon testi ve yüzey ıslanabilirlik testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sıkıştırılmış kil duvarların çevrimsel yükler altındaki yapısal davranışlarının belirlenmesi ve diğer duvarlar ile kıyaslanabilmesi amacıyla 150x150x15 cm boyutlarında sıkıştırılmış kil duvarlar, 150x150x19 cm boyutlarında geleneksel tuğla ve 150x150x19 cm boyutlarında gazbeton duvarlar üretilmiştir. Üretilen duvarlara uygulanan çevrimsel yükler sonrasında yük taşıma kapasiteleri, enerji tüketme kapasiteleri, rijitlik azalmaları ve yerdeğiştirme süneklikleri hesaplanmıştır. Çalışmanın sonunda, çimento ve alkali aktivasyonlu yüksek fırın cürufunun sıkıştırılmış kil malzemelerinin mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılabileceği belirlenmiştir. Ayrıca çinko stearat kullanımının durabilite özelliklerini önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Sıkıştırılmış kil, Stabilizasyon, Çimento, Alkali aktivasyonlu yüksek fırın cürufu, Çinko stearat.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE STRUCTURAL BEHAVIOUR AND DURABILITY PROPERTIES OF RAMMED EARTH WALLS

Batuhan AYKANAT

Düzce University

Institute of Postgraduate Education, Department of Civil Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Emin ARSLAN

January 2024, 106 pages

The use of rammed earth walls in the manufacture of masonry structures is rapidly becoming widespread. The most important reasons for this are that clayey soil is easily accessible, construction costs are low, and it is an environmentally friendly material. In addition, the fact that it allows reuse at the end of its useful life makes this construction technique environmentally advantageous. Some mechanical and durability properties of rammed earth walls need to be improved in order to meet today's needs and regulatory requirements. For this purpose, rammed earth walls are stabilized and provided with the desired properties. The main purpose of this study is to determine the structural behaviour and durability properties of rammed earth walls produced with different stabilization techniques. For the stabilization of rammed earth walls, cement, lime and alkali activated blast furnace slag were used and added to the reference mixture consisting of clayey soil in certain proportions. Cylindrical and prismatic samples were produced to determine the mechanical and durability properties of the different mixtures obtained. In order to determine the material properties of the clayey soil to be used in the study, atterberg limit tests and standard proctor tests were performed. Additionally, some mechanical properties of rammed earth walls, such as compressive strength, elastic modulus and shear modulus, were determined. Mixtures to be used in durability tests were selected according to the compressive strength results. In order to improve the durability properties of the selected mixtures, zinc stearate was added to the mixtures in certain proportions. To determine the durability properties of rammed earth walls, karsten tube, spray erosion test, geelong erosion test and surface wettability tests were carried out. In addition, in order to determine the structural behavior of rammed earth walls under cyclic loads and to compare them with other walls, rammed earth walls with dimensions of 150x150x15 cm, traditional brick walls with dimensions of 150x150x19 cm and autoclaved aerated concrete walls with dimensions of 150x150x19 cm were produced. The load carrying capacity, energy consumption capacity, stiffness degradation and displacement ductility of the produced walls were calculated after the cyclic loading. At the end of the study, it was determined that cement and alkali activated blast furnace slag could be used to improve the mechanical properties of rammed earth materials. Additionally, it has been determined that the use of zinc stearate significantly increases the durability properties.

Keywords: Rammed earth, Stabilization, Cement, Alkali activated blast furnace slag, Zinc stearate.

EXTENDED ABSTRACT

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE STRUCTURAL BEHAVIOUR AND DURABILITY PROPERTIES OF RAMMED EARTH WALLS

Batuhan AYKANAT

Düzce University
Institute of Postgraduate Education, Department of Civil Engineering
Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Emin ARSLAN

January 2024, 106 pages

1. INTRODUCTION

The house culture, which started with the structures produced with stone and wood, together with the need for shelter in primitive societies, has undergone many evolutions until today. Shelter is one of the most important needs of human life. Since the primitive ages, people who have been looking for natural solutions consisting of caves and rocks have needed shelters of their own making over time. When they started to build shelters, their first choice of building materials was stone and earth. Although the exact date of construction of the shelters is not known, some researches refer that it dates back to 4000-10000 years ago. Earth has become an alternative building material over time in the search for different materials arising from the need for shelter. Since its use as a building material, earth has been scientifically defined as a mixture of clay, silt, sand, and sometimes larger aggregates such as gravel or gravel. Earth can be composed of different amounts and types of clay, silt, sand and aggregates depending on its location. Therefore, their properties may differ from region to region and different mixtures may need to be prepared for different applications.

New searches have started since 3000 B.C. due to the need to build walls and the desire to develop different techniques. These walls, which were started to be built dry at first, later came to a state where they were connected with earth-clay mortar and plaster. Rammed earth walls are an ancient building technique that has existed for thousands of years and was commonly used at that time to produce monolithic walls. This building technique continues to exist today thanks to its environmental friendliness and longevity.

This study was carried out in order to produce environmentally friendly and long-lived rammed earth structures. The first priority of the study is to improve the low mechanical and durability properties, which are the disadvantages of this completely environmentally

friendly building technique. For this reason, it has been aimed to obtain mixtures with higher mechanical and durability properties by using different stabilization materials.

2. MATERIAL AND METHODS

It is extremely important that the rammed earth elements are stabilized with various materials for long-lived and durability. Many different materials are used to stabilize the mechanical properties and durability properties of rammed earth.

In this study, different materials such as cement, lime, granulated blast furnace slag and zinc stearate were used for stabilization of rammed earth. In addition, in order to activate the blast furnace slag, 8 moles of sodium hydroxide (NaOH) solution were used instead of water in mixtures containing blast furnace slag.

One of the main criteria is to obtain raw materials from the local area for a sustainable building technique and building element such as rammed earth. For this reason, the clayey earth used in the study was obtained from the Düzce region.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

In the first stage of the study, experiments to be made on the raw material were carried out and the optimum mixture ratios were determined accordingly. One of the most influential parameters on the mechanical behavior of rammed earth is water content. As a result of the material tests, the optimum water content was determined as 12%.

By using the obtained mixture ratios, samples were produced for mechanical and durability tests. As a result of mechanical tests, it has been determined that the mechanical properties of cement and blast furnace slag are improved. The stabilization processes also contributed positively to the durability properties. Samples using zinc stearate gained water repellent properties.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

It is important that the rammed earth elements are stabilized for use in today's conditions. Mechanical and durability properties can be improved by using the right material. One of the most widely used materials for improving mechanical properties is cement. However, the amount of cement use should be limited for environmental sustainability. As a result of the tests, it is thought that the amount of cement usage is 10% will be sufficient.

In addition, it has been determined that the mechanical properties of blast furnace slag, which is considered as an industrial waste, are improved. However, it is recommended to

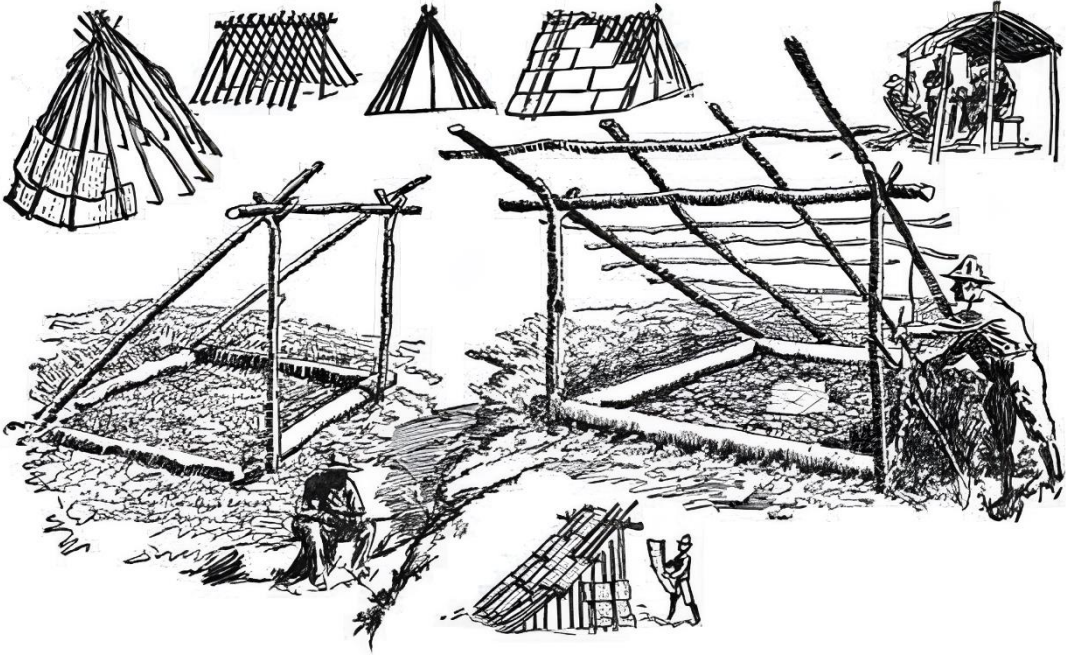
use a maximum of 8 moles of sodium hydroxide (NaOH) solution used to activate the blast furnace slag due to its environmental impact.

It has been determined that 0.5% of the zinc stearate used to improve the durability properties will be sufficient. Using this amount of zinc stearate is thought to increase water resistance sufficiently.



1. GİRİŞ

İlkel toplumlarda sığınma ihtiyacıyla birlikte taş ve ağaç ile üretilen yapılarla başlayan ev kültürü, günümüze kadar birçok evrim geçirmiştir. Mağara ve kayalardan oluşan doğal sığınakları terk ederek yapay barınakların yapılmaya başlamasından itibaren iç ve dış mekân ilişkisini kesmek amacıyla duvar inşa etme ihtiyacı ortaya çıkmıştır (Şekil 1.1). Yapay barınakların tarihi günümüzden yaklaşık 4000 yıl önceye dayanmaktadır [1]. Barınma ihtiyacından doğan farklı malzeme arayışlarında toprak zamanla alternatif bir yapı malzemesi haline gelmiştir. Yapı malzemesi olarak kullanılmaya başlamasından itibaren toprak bilimsel olarak, kil, silt, kum ve bazen çakıl veya daha büyük agregaların bir karışımı olarak tanımlanmıştır. Toprak çıkarıldığı yere bağlı olarak farklı miktarlarda ve sınıfta kil, silt, kum ve agregalardan oluşabilmektedir. Bu nedenle özellikleri, bölgeden bölgeye farklılık göstermekte ve farklı uygulamalar için uygun karışımların hazırlanması gerekmektedir [2].



Şekil 1.1. İlkel Barınak Örnekleri [3].

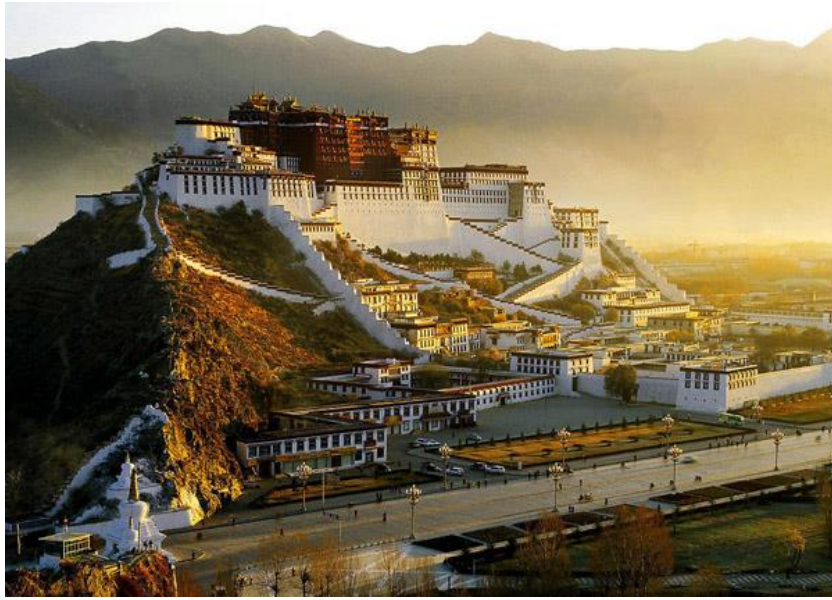
Duvar inşa etme ihtiyacı ve bunun gerçekleştirilmesi için yeni arayışlar M.Ö. 3000'den itibaren başlamıştır. İlkel şekillerde yapılan moloz taş duvarlar, artık ele geçen malzemelerin üst üste yığılması ile değil, taşların düzenli bir örgü oluşturarak dizilmesi ile meydana getirilmeye başlanmıştır. Önceleri kuru olarak örülmeye başlanan bu duvarlar daha sonra aralarının toprak harçla bağlandığı ve üzerlerinin kil ile sıvandığı bir duruma gelmiştir. İlerleyen zamanlarda taşla üretilen yapılarda bağlayıcı malzeme olarak toprak içinde bulunan kilin kullanılması, yapılan duvarların kil ile sıvanması ve kalıplara konulan kil ve saman karışımının güneşte kurutulmasıyla elde edilen kerpiçten inşa edilmiş yapılar insanoğlu tarafından kullanılmıştır (Şekil 1.2)[1].



Şekil 1.2. UNESCO'nun "Dünya Mirası" listesine kayıtlı Mali'deki Old Towns of Djenné camii [4].

Tüm bunların yanında kil gerek fırınlarda pişirilerek tuğla üretiminde gerekse agrega ile sıkıştırılarak taşıyıcı olmayan elemanların elde edilmesinde eski yapılarda pek çok kez kullanılmıştır. Sıkıştırılmış kil duvarlar binlerce yıldır var olan ve o zamanlarda yaygın olarak monolitik duvarlar üretmek için kullanılan eski bir yapım tekniğidir. Bu üretim

tekniki günümüzde de çevre dostu ve uzun ömürlü olması sebebiyle varlığını sürdürmektedir. Genellikle Çin ve Akdeniz çevresinde yaygın olarak kullanılmış olan bu teknik insanların buradan göç etmesi sonucu dünyanın dört bir yanına yayılmıştır. Lhasa'daki Potala Sarayı, Granada'daki Elhambra Sarayı ve Çin Seddi'nin büyük bir bölümü sıkıştırılmış kil duvarlar ile üretilmiştir. Avrupa'daki birçok ünlü kalenin yanı sıra Piramitlerin bir bölümü de bu teknikle üretilerek daha sonra taş ile birleştirilmiştir. Yüzyıllar öncesinde üretilerek günümüze kadar gelen bu yapılar sıkıştırılmış kil duvar tekniğinin uzun ömürlü olduğunun en önemli kanıtıdır [5], [6]. Potala Sarayı'nın bugünkü görüntüsü Şekil 1.3'de verilmiştir.



Şekil 1.3. Potala Sarayı Lhasa/Tibet [7].

Bu çalışma, mekanik ve durabilite özellikleri iyileştirilmiş sıkıştırılmış kil duvarın üretimini gerçekleştirmek amacıyla yapılmıştır. Sıkıştırılmış kil duvarların üretilmesi için ana malzeme olarak killi toprak kullanılmaktadır. Çalışma boyunca killi toprak ifadesi yerine tüm elemanlar için “sıkıştırılmış kil duvar” ifadesi kullanılmıştır. Çevre dostu olan bu yapı tekniğinin dezavantajı olan düşük mekanik ve durabilite özelliklerinin iyileştirilmesi çalışmanın birincil önceliğini oluşturmaktadır. Bu sebeple farklı stabilizasyon malzemeleri kullanılarak daha yüksek mekanik ve durabilite özelliklerine sahip karışımlar elde edilmesi hedeflenmiştir. Stabilizasyon için farklı oranlarda çimento, kireç, yüksek fırın cürufu ve çinko stearat kullanılmıştır. Çalışmada önce hammadde üzerinde deneyler yapılmış ve karışım oranları belirlenmiştir. Daha sonra deney numuneleri üretilmiş, üretilen numuneler üzerinde mekanik ve durabilite testleri gerçekleştirilmiş, mekanik ve durabilite testlerinde istenilen özelliklere sahip

karışımlardan 150x150x15 cm boyutlarında duvarlar üretilerek, çevrimsel yükler altında davranışları belirlenmiştir. Bunun yanında, sıkıştırılmış kil duvar davranışlarının geleneksel tuğla ve gazbeton duvarlar ile kıyaslanmış ve test sonuçları değerlendirilerek yorumlanmıştır. Bu tez çalışmasının birinci bölümünde; kil ve kil çeşitleri, yığma yapılar hakkında genel bilgiler, sıkıştırılmış kil duvarlar, stabilizasyon ve stabilizasyon malzemeleri hakkında bilgiler ve literatür araştırması yer almaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde; kullanılan malzemeler ve uygulanacak testler ile ilgili bilgiler verilmektedir. Üçüncü bölümde; yapılan deneylere ait bulgular ve tartışmalar yer almaktadır. Dördüncü bölümde; bu araştırma sonucunda elde edilen bilgiler ve sonuçlar, sonuçlara ait yorumlar ve bu çalışmadan sonra yapılacak çalışmalara yol gösterebilecek öneriler yer almaktadır.

1.1. KİLLİ TOPRAK

Çevresel etkiler ve rüzgâr sebebiyle kayaçların parçalanarak ve organik maddelerin (ağaç kökü vb.) ayrışarak oluşturduğu malzemeye toprak adı verilmektedir. Topraklar tane boyutlarına göre kil, silt ve kum olarak sınıflandırılabilir [8].

Çevresel faktörlere ve geleneklere bağlı olarak birçok farklı yöntemle kil, binlerce yıldır en ilkel toplumlardan günümüze kadar yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Düşük maliyetli olması sebebiyle kil, gelişmemiş veya az gelişmiş ülkelerde en çok kullanılan yapı malzemesidir. Ancak son yıllarda insan sağlığına verilen önemin artması, doğal yaşam dengesinin korunumu ve geri dönüştürülebilme gibi faktörlerin ön plana çıkmasından dolayı kil yeniden keşfedilmeye hazır bir yapı malzemesi haline gelmiştir [9].

Kil, uygun su içeriğinde bağlayıcılık özelliği kazanan ve 2μ 'dan küçük tane yapısına sahip olan doğal bir malzemedir. Kil bakımından zengin toprakların içerdiği kil mineralleri, uygun su içeriği ile bulunduğu plastisite özelliği kazanmaktadır [10]. Plastisite, ince taneli zeminlerin sabit hacimde ve zarar görmeden kalıcı deformasyona uğrayabilme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Zemin plastisitesi, zeminin plastik davranış gösterebildiği su içeriğinin aralığı olarak ifade edilen plastisite indisi ile tanımlanmaktadır [11].

Kilin gerek sıkıştırılması gerekse pişirilmesiyle elde edilen malzemeler, binlerce yıldır yapılarda kullanılmakta ve uzun ömürlü olmaları sebebiyle günümüzde de kalıntıları karşımıza çıkmaktadır. Bu yapıların inşasında kullanılan hammaddeler aynı olsa da

yapım teknikleri birbirinden tamamen farklı olabilmektedir [6].

1.1.1. Killerin Sınıflandırılması

Killer karmaşık bir mineral dizisine sahip olmaları, içerdikleri yabancı madde miktarları ve doğada bulunduğu yerlerin farklılıklarından dolayı birçok şekilde sınıflandırılabilir [12].

1.1.1.1. Minerolojik Özelliklerine Göre Killer

Kaolin Grubu Killer

Kaolinler, genellikle feldspatların ayrışması sonucu oluşmakta ve değişik miktarlarda, feldspat, mika, kuvars, demir, titan oksitler ve diğer kil minerallerini içermektedirler [12]. Kaolinlerde genel olarak şişme olayı çok azdır ve bu killer plastik özellik gösterir [13]. Bu grup killer kullanım alanlarına göre sınıflandırılabilirler gibi minerolojik bileşimine göre demirli, silisli ve alüminli olarak, fiziksel özelliklerine göre yağlı, döküm, sert, yumuşak, plastik ve refrakter kaolini olarak da sınıflandırılabilir. Kaolin grubunun bu kadar farklı yapı ve sınıfta olmasının sebebi oluşum sırasındaki kayaların farklılığı ve taşınma-yıkama olaylarındaki değişkenliklerdir [12].

Montmorillonit Grubu Killer

Bu gruptaki killer üç tabakalı bir yapı göstermektedirler. Kilin karakteristik özelliklerini yansıtan bu tabakalar, su molekülleri ve değişebilen iyonlardan oluşmaktadır. Mevcut tabakalar arasına organik moleküller ve suyun girmesiyle bu yapı genişir ve buna kilin şişmesi adı verilmektedir [12]. Şişme özelliklerinden dolayı hacimsel stabilitelerinin düşük olması bu gruptaki killerin kullanımının uygulamada bazı olumsuzluklar ortaya çıkarmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple bu kil grubu kullanılacağı zaman meydana gelebilecek olumsuzlukları engellemek amacıyla alçı, kireç, su ve kum gibi malzemeler ile karıştırılmaktadır [14].

Bentonit Grubu Killer

Bentonit grubuna ait killer genellikle Montmorillonit grubu kil minerallerinden oluşmaktadır. Volkanik küller ve lavlardan oluştukları için alüminyum ve magnezyum açısından zengin ve ince taneli bir yapıya sahiptirler. Bu gruptaki killer dört farklı başlıkta incelenebilmektedir [12], [14].

- Alkali Bentonitler: Asitler ile muamele edildiklerinde, karakteristik özelliklerini koruyan killerdir.
- Yarı Alkali Bentonitler: Asitler ile muamele edildiklerinde, karakteristik özelliklerini kaybeden killerdir. Bünyelerinde yer değiştirebilen alkali bazlar bulundurlar.
- Toprak Alkali Bentonitler: Yer değiştirebilen toprak alkali bazlar içerirler ve alkali tuz muamelesi ile alkali bentonit özellikleri oluşturan killerdir.
- Yarı Toprak Alkali Bentonitler: Asitle muamele edildiğinde alkali bentonit özelliği kazanmayan bentonitlerdir.

İllit Grubu Killer

Yapısal bakımdan kimyasal bazı farklar dışında montmorillonit grubu killere benzeyen, şişme özellikleri tabakalarının arasına su giremediği için montmorillonite göre daha az olan kil grubudur [13]. Ara tabakaları ve alkalileri sıkı olarak bağlı olduğundan iyon değiştirme özellikleri düşüktür [15].

Halloysit Türü Kil Grubu

Kaolinlerin oluşumları sırasında daha fazla hidrasyona uğramış olan bir türüdür. Bu grupta bulunan killeri kaolinlerden ayırmak son derece zordur ve tanımlamak için kimyasal ve fiziksel testler uygulamak gerekmektedir [12].

Ateş Kili (Fire Clay)

Genellikle kömür yataklarında, kömür tabakaları üzerinde bulunan bu kil grubu maden kazıları sırasında elde edilmektedir. Çoğunlukla saf ve temiz halde bulunurlar. Bu kil grubunun kullanımındaki esas parametre plastiklik derecesi ve sertliğidir. Özellikle refrakter alanında ihtiyaç duyulan bir hammaddedir. Plastiklik özelliğinin düşük olması ve yüksek alümina içeriği sayesinde diğer killerden ayrılır ve fiziksel özellikleriyle ön plana çıkarlar [12].

Yıkama Kili (Fuller's Earth)

Yıkama killeri volkanik kökenli oluşumlardır ve montmorillonit grubu killere dendir. Bentonit özelliklerini taşıdıkları için bentonitlerin alt grubu olarak da tanımlanırlar. En önemli ayırt edici özellikleri kullanım alanlarıdır. Yağ absorbe etme özelliği çok yüksek olduğundan, yağ rafinasyonu, ilaç sanayi ve sondaj alanlarında kullanımı mevcuttur [12].

Allofan Grubu Killer

Saf olduğunda saydam ve renksiz olan bu kil grubu içerisine yabancı maddeler karıştığında mavi, yeşil, sarı ve kahverengi olabilmektedir. Alkali ve toprak alkali içeriği diğer killere göre çok azdır. Yaygın olarak diğer kil mineralleri ile birlikte bulunabilmektedir. X-ışını incelemeleri, allofan grubu killerin bazen amorf yapıda bazen de kristal yapıda olduğunu göstermektedir [16].

Klorit Grubu Killer

Klorit grubu kil mineralleri, mika ve brusit tabakalarına benzer tabakaların ardışık şekilde sıralanmasıyla meydana gelir. Tabakaları arasında zayıf mekanik bağlar olduğu kabul edilmektedir. Şeffaf, sarı, yeşil, kırmızı, pembe, kahverengi ve beyaz renkte olabilirler [16], [17].

Diğer Killer

Bu grupta adi killer ve şistler bulunmaktadır. Genel olarak yüzeyde bulunan adi killerin, tuğla ve çimento imalatında kullanıldıkları görülmektedir. Şistler ise yakın jeolojik evrelerde oluşmuş ve adi killer gibi tuğla imalatı ile çimento sanayinde kullanılmaktadır [12].

1.1.1.2. Yapılarına Göre Killer

Kil gruplarının yapılarına göre sınıflandırılmaları aşağıdaki gibidir [12], [16], [17].

Amorf Yapılı Killer

- Allofan Grubu Killer

Kristal Yapılı Killer

- İki Tabakalı Olanlar (Kaolonit ve Halloisit Grubu)
- Üç Tabakalı Olanlar (Montmorillonit ve Nontronit Grubu)
- Düzenli Tabakalı Olanlar (Klorit Grubu)
- Zincir Yapılı Olanlar (Sepiyolit)

1.1.1.3. Fiziksel Özelliklerine Göre Killer

Fiziksel özelliklerine göre killerin sınıflandırılması aşağıda verilmiştir [12].

- Tane Boyutuna Göre Killer

- Renk Özelliklerine Göre Killer
- Refrakter Özelliklerine Göre Killer
- Plastik Özelliklerine Göre Killer

1.1.1.4. *Kimyasal Özelliklerine Göre Killer*

Kimyasal özelliklerine göre killerin sınıflandırılması aşağıda verilmiştir [12].

- Yüksek Alüminyum İçerikli Killer
- Boksit İçerikli Killer
- Silikat İçerikli Killer
- Demir İçerikli Killer
- Kalsit İçeriklerine Göre Killer
- Karbonat İçeriklerine Göre Killer

1.1.1.5. *Buldukları Yere ve Yataklarına Göre Killer*

Primer Killer

Oluşumlarını ana kayanın bulunduğu yerde tamamlayarak orada kalmış, yer değiştirmemiş killerdir. Kaolinler bu gruba girmektedir. Bu killer genellikle, asidik kayaların içindeki feldspatların, muskovitlerin ve diğer alüminyumca zengin silikatların yüzeysel ve düşük sıcaklıktaki hidrotermal alterasyonları sonucu kalıntı olarak oluşurlar [16].

Sekonder Killer

Yağmur suları ile çözünüp, oluştukları yerden sel ve akarsu yardımıyla başka yere sürüklenen killerdir. Yerdeğiştirme ve sürüklenme esnasında saflıklarını kaybederek özelliklerini değiştirirler ve aralarına kil mineralleri dışında plastik özellikler göstermeyen elementler girmektedir. Sürüklenme boyunca kaolinit minerallerinin etrafa çarpmaları sonucunda tane boyutları daha da incelmektedir. İnce taneli yapısı ve uzun süre suda bulunduğu için şişmesi sonucu yapışkan ve bağlayıcı bir özellik kazanmaktadır [16].

1.1.2. Killerin Kullanım Alanları

Çok çeşitli bir sınıflandırmaya sahip killerin kullanım alanları da sınıflarına göre

değişmektedir. Dünyada üretilen kil minerallerinin yaklaşık olarak %70-75'i seramik üretiminde kullanılmaktadır. Seramik üretiminde birçok farklı dal olduğundan bu dallarda kullanılacak olan killerin özellikleri de değişmektedir. Genellikle kaolin grubu killer tercih edilmesine ek olarak plastikliği sağlamak için çok az miktarda da bentonit kullanılmaktadır. Seramik endüstrisi içinde, yapılar için üretilen kil tuğlalar, kanalizasyon ve su boruları, yer ve duvar kaplaması için kullanılan fayanslar ve refrakter malzemelerde yer almaktadır. Ayrıca porselen mutfak eşyası üretimi ve elektrik endüstrisinde kullanılan porselen malzemelerin yapımı da seramik endüstrisine dâhil edilebilir [17]. Kalan %25 ise diğer tüketim kısmını oluşturur. Bu kısımda genellikle kâğıt endüstrisi, lastik endüstrisi, petrol endüstrisi, çimento üretimi, dolgu malzemesi ve kaplama malzemesi üretimi gibi ihtiyaçları karşılamaktadır [16], [17]. Tüm bu endüstriyel kullanımlarının yanı sıra kilin, çok eski zamanlardan beri yapılarda kullanıldığı bilinen bir gerçektir. Artan çevresel kaygılar ve sürdürülebilir yapım teknikleri arayışları ile birlikte, kilin yapılarda kullanımına ilgi tekrar artmaya başlamıştır.

1.2. YAPILARIN DAVRANIŞLARINI ETKİLEYEN BAZI PARAMETRELER

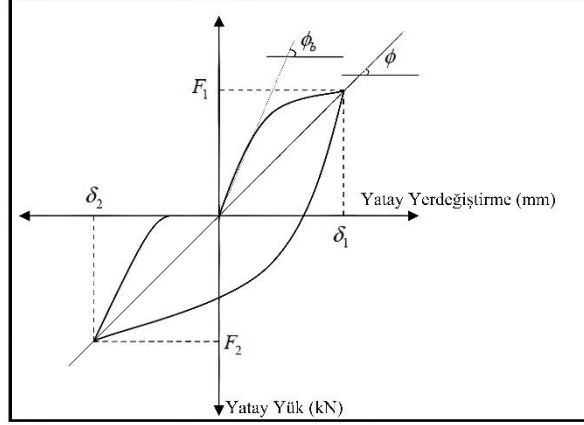
Deprem etkilerinin hesaplanmasındaki belirsizlikler, yapıların deprem etkilerine karşı belirli bir dayanıma sahip olarak tasarlanmasını gerektirmektedir. Bu sebeple, olası deprem etkilerine karşı yapıların, belirli seviyede performans göstermeleri gerekmektedir. Yapıların söz konusu davranışları sergileyebilmesi için rijitliklerinin, enerji tüketme kapasitelerinin, yük taşıma kapasitelerinin ve sünekliklerinin yeterli olması gerekmektedir. Bu sebeple, yapıların tasarım yüklerini güvenle taşıyabilecek şekilde boyutlandırılmaları ve tasarlanmaları gerekmektedir [18].

1.2.1. Rijitlik Değişimi

Rijitlik, yapıların performanslarının değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir parametredir. Bir yapı elemanının yeterli rijitliğe sahip olması, deprem etkileri karşısında oluşabilecek yer değiştirmeleri sınırlandırabileceği anlamına gelmektedir. Yapıların çevrimsel yükler altındaki davranışları incelenirken çoğunlukla sekant rijitliği dikkate alınmaktadır. Sekant rijitliği (Şekil 1.4), itme ve çekme yönündeki maksimum yük ve bu yüke karşılık gelen yer değiştirmelerin birleştirildiği doğrunun eğimi olarak hesaplanmaktadır (1.1) [19].

$$k = \frac{|F_1| + |F_2|}{|\delta_1| + |\delta_2|} \quad (1.1)$$

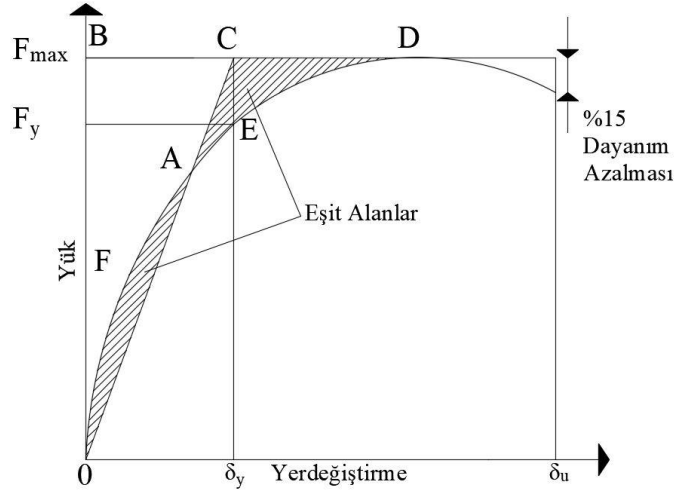
Burada; F_1 ve F_2 sırasıyla, itme ve çekme yönündeki maksimum yükleri, δ_1 ve δ_2 ise sırasıyla itme ve çekme yönündeki maksimum yer değiştirmeleri ifade etmektedir.



Şekil 1.4. Çevrimsel yükler altında sekant rijitliğinin belirlenmesi.

1.2.2. Süneklik Değişimi

Yapıların büyük depremlerden etkilenebileceğini ve hasar görebileceğini kabullenerek tasarım yapmak gerekmektedir. Bu noktada süneklik olarak adlandırılan, taşıma kapasitesinde önemli kayıp olmadan, şekil ve yer değiştirme yapabilme özelliği devreye girmektedir. Sünek davranış gösteren bir yapı, bu özelliği sayesinde, deprem enerjisinin önemli bir kısmını tüketebilmektedir. Nihai yer değiştirme ve akma noktası gibi parametreler belirlenirken yük-yerdeğiştirme zarf eğrisinden faydalanılmaktadır [18], [19].



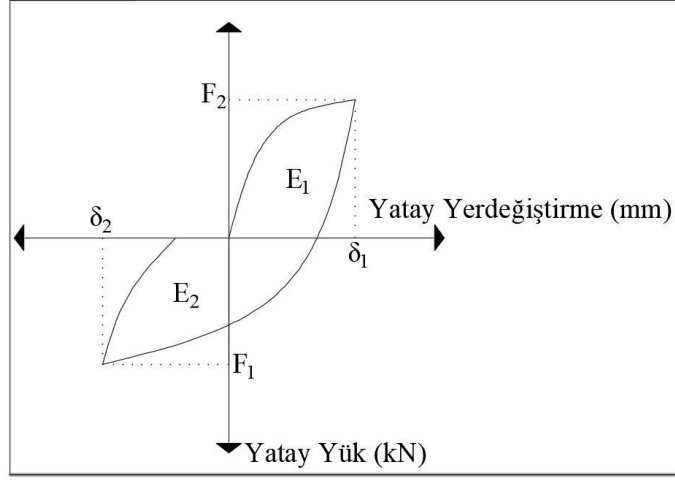
Şekil 1.5. Eşdeğer elastoplastik enerji tüketme ölçütüne göre yerdeğiştirme sünekliği parametreleri.

Zarf eğrisinde (Şekil 1.5), maksimum yükten çizilen doğru ve orijin noktasından çizilen teğetin kesiştiği noktaya denk gelen yer değiştirme “ δ_y ” olarak, %15 dayanım azalmasına karşılık gelen nihai yer değiştirme ise “ δ_u ” olarak belirlenir ve yerdeğiştirme süneklikleri (μ), denklem (1.2) kullanılarak hesaplanır.

$$\mu = \delta_u / \delta_y \quad (1.2)$$

1.2.3. Enerji Tüketme Kapasitesi Değişimi

Yapıların sünekliğinin artması, enerji tüketme kapasitelerini de artmasına sebep olmaktadır. Bu özellik sayesinde, deprem gibi yatay etkilerde oluşan enerji tüketilmektedir. Toplam tüketilen enerji, her bir çevrimde tüketilen enerjinin yığılımlı olarak toplanması ile elde edilmektedir. Her bir çevrimde itme ve çekme yönünde yük-yerdeğiştirme eğrisi altında kalan alanlar ayrı ayrı toplanarak çevrimlerde tüketilen enerji hesaplanabilmektedir (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. Çevrimsel yükler altında enerji tüketme kapasitesi.

1.3. YIĞMA YAPILAR HAKKINDA GENEL BİLGİLER

1.3.1. Yığma Yapıların Genel Özellikleri

Yığma yapılar genellikle, taş ve tuğla gibi malzemelerin belirli yapıştırıcı görevi gören harçlar ile bir araya getirilerek birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Özellikle antik dönemlerde taş ve tuğla yerini çamur veya killi toprağa bırakmaktadır. Teknolojik gelişmelerin yoğun şekilde yaşandığı 19. yüzyıla gelinene kadar yığma yapılar, barınma ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayarak yapı stoğunun büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Ayrıca günümüzde formunu ve estetik duruşunu halen başarılı bir şekilde koruyan birçok tarihi yapı da yığma olarak inşa edilmiştir. Mısır Piramitleri, Tac Mahal ve Roma Kolezyumu bu yapıların en güzel örneklerindedir [20]–[22].

Portland Çimentosunun keşfi ile birlikte (1820-1824) yapım tekniklerinde hızlı bir gelişme dönemi başlamıştır. Bu gelişmeler günümüze kadar yığma yapılarda da etkisini sürdürmüştür. Yığma yapıların inşa edilmesinde kullanılan malzemeler geliştikçe günümüzde de yığma yapılar inşa edilmeye devam edilmiş ve birçok ülkenin yönetmeliklerinde yığma yapı hesapları ve uygulama esasları ile ilgili geniş bölümlere yer verilmiştir [22].

1.3.2. Yığma Yapıların Bazı Avantajları

Çevre koşullarına uygun tasarlanmış ve uygulama esaslarına göre yapılmış bir yığma yapı birçok kullanım avantajı sunmaktadır. Bu avantajlardan bazıları aşağıda verilmektedir [22], [23].

- Genel olarak düşük katlı inşa edildikleri ve kararlı davranışları sebebiyle sismik etkilere karşı performansları yüksektir.
- Kullanılan malzeme genellikle tek tip olacağından iş kalem sayıları azdır.
- Kalıp kullanım ihtiyacı olmadığından maliyetleri düşüktür.
- Düzgün, basit ve sürekli bir taşıyıcı sistemden oluşmaktadır.
- Oluşan iç kuvvetler sistem içinde düzgün olarak dağılarak belirli bölgelerde aşırı değerlere ulaşmaz.
- Yüzey kaplaması ihtiyacını ortadan kaldırarak doğrudan sıva ve boya uygulamasına imkân sağlamaktadır.

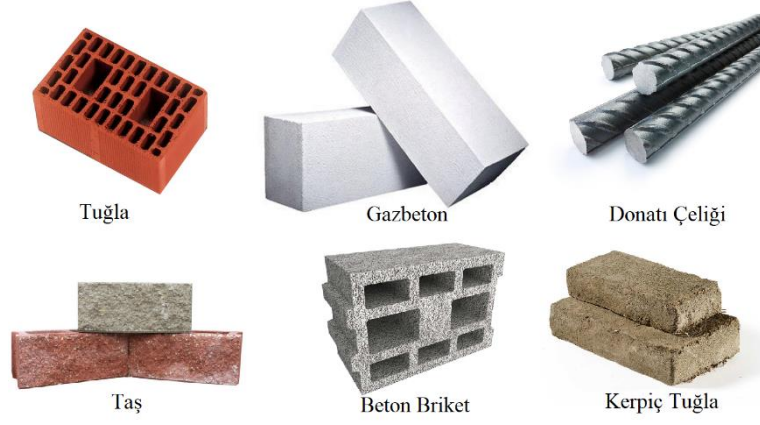
1.3.3. Yığma Yapıların Bazı Dezavantajları

Yığma yapıların birçok avantajı olduğu gibi dezavantajları da vardır. Yığma yapılara ait bazı dezavantajlar aşağıda verilmektedir [22]–[24].

- Yapı tamamlandıktan sonra yığma elemanların yerini değiştirmek/kaldırmak mümkün değildir.
- Yapıların deprem etkileri altında sünek davranış göstermesi beklenirken, yığma yapılar nispeten sünek davranış gösterebilir de çekme dayanımları çok düşüktür. Bu sebeple enerji tüketme kapasiteleri betonarme ve çeliğe göre daha azdır.
- Gevrek malzemeler kullanılarak inşa edilmeleri durumunda, taşıma kapasitelerine ulaşıldığında ani hasarlar ve göçmeler meydana gelebilmektedir.
- Geleneksel kerpiç ya da killi toprak ile inşa edildiklerinde çevresel etkilere karşı dayanıklı hale getirilmeleri gerekmektedir.

1.3.4. Yığma Yapılarda Kullanılan Malzemeler

Yığma yapıların yapımında yaygın olarak kerpiç, doğal taş ve tuğla gibi malzemeler kullanılmaktadır (Şekil 1.7). Bunun yanında, hatıl ve donatı çeliği de bazı durumlarda yığma yapılarda kullanılmaktadır. Barınma ihtiyacının karşılanması için yapılan ilkel yapılarda su ve toprak karışımı bulamaçların kullanılmasıyla yapılar inşa edilse de taşların şekillendirilmesi ve üst üste dizilerek örülmesiyle de farklı yığma yapılar yapılmaya başlanmıştır. Çeşitli malzemeler kullanılarak yığma yapılar yapmak mümkündür. Bu malzemelerin bazıları kısaca aşağıda sıralanmaktadır.



Şekil 1.7. Yığma yapılarda kullanılan bazı malzemeler.

1.3.4.1. Kerpiç

Kerpiç, ana malzemesi killi toprak olan, içine saman ve kamış gibi malzemeler eklenmesi ile güneşte kurutularak üretilen bir yığma yapı malzemesidir. Kilin yapışma özelliğinden faydalanılarak bağlayıcı özelliği kazanmaktadır. Eski tarihi yığma yapılarda en yaygın kullanılan yığma yapı malzemelerinden biri olduğu bilinmektedir.

1.3.4.2. Doğal Taş

Geçmişten günümüze en yaygın kullanılan yığma yapı malzemelerinden biride doğal taşlardır. Farklı şekil ve boyutlardaki taşların üst üste dizilmesi ile yığma yapılar oluşturulabilmektedir. Yaygın ve kolay bulunabilir olması sebebiyle eski zamanlarda sıklıkla tercih edilmiş, bağlayıcı malzemelerin keşfi ile de aralarına harçlar sürülerek birbirlerine yapıştırılıp yığma elemanlar oluşturulmuştur.

1.3.4.3. Ahşap

Ahşap, tıpkı doğal taşlarda olduğu gibi kolay temin edilmesi sebebiyle tarihi yapılarda sıklıkla tercih edilen bir yapı malzemesi olmuştur. Doğal taşa göre yüksek çekme ve eğilme dayanımına sahip olması, ahşabın büyük açıklıkların geçilmesinde kullanımını yaygınlaştırmıştır. Hafifliği sebebiyle kolay taşınabilir olması ve işlenebilirliğinin yüksek olması sıklıkla tercih edilmesine sebep olmuştur. Tüm bu avantajlarının yanı sıra en büyük dezavantajları yangına karşı dayanıksız olmalarıdır. Genel olarak tarihi yapıların, tavanlarında, döşemelerinde, duvarlarında hatıl olarak veya gergi elemanı olarak ahşabın kullanımına rastlanmaktadır [25], [26].

1.3.4.4. Tuğla

Kil, toprak, su, öğütülmüş tuğla ve kiremit tozları gibi malzemelerin karıştırılarak, şekillendirilip fırınlarda pişirilmesiyle elde edilen bir yapı malzemesidir [27]. Günümüz koşullarında sıklıkla bölme ve taşıyıcı duvar üretiminde kullanımına rastlanmaktadır.

Yığma yapılarda kullanılan tuğlaların, genellikle yüksek basınç dayanımına sahip olması beklenmektedir. Kullanılış yeri ve amaçları doğrultusunda bakıldığında en önemli mekanik özellikleri genellikle basınç dayanımlarıdır. Tuğlaların basınç dayanımları, üretim sırasında kullanılan toprağın cinsine, pişirme ısısına, kullanım yönüne ve yerine göre değişiklik gösterebilmektedir [28].

1.3.4.5. Gazbeton Bloklar

Silis içeren agrega ve bağlayıcı maddelerin (kireç ya da çimento) ince öğütülerek bir karışım haline getirilmesi ve gözenek oluşturması için kimyasal katkıların eklenmesi ile buhar küründe sertleştirilen hafif betonlar gazbeton olarak adlandırılmaktadır. Gaz betonların yaklaşık olarak yoğunlukları $350-400 \text{ kg/m}^3$ ve boşluk oranları da %70-80 arasında değişmektedir [29].

1.3.4.6. Beton Briket

TS EN 1097-6 [30] standardına göre, etüv kurusu yoğunluğu 2000 kg/m^3 'ten az olan agregalar hafif agrega olarak tanımlanmaktadır. Hafif agregaların, çeşitli bağlayıcılar ve katkı maddeleri ile karıştırılarak kalıplanması ve sıkıştırılması sonucu beton briketler üretilmektedir. Geleneksel tuğla gibi boşluklu ve boşluksuz olarak üretilebilen beton brikelerin, boşluksuz üretilenleri yığma yapı elemanlarında kullanılabilir. Boşluklu üretilen beton briketler ise genellikle bölme duvarlarda kullanılmaktadır [29].

1.3.4.7. Harç

Yığma yapılarda, yığma birimleri oluşturan malzemeler arasında yapışmayı ve aderansı sağlamak için ara yüzeyleri dolduran harçlar kullanılmaktadır. Burada kullanılan harçların çekme dayanımları, tuğlalar arası yapışmayı arttırması için önemlidir. Aksi durumda yığma duvarlarda, tuğlalar arası aderansın kaybolması sonucu kesme (kayma) hasarları meydana gelebilmektedir. Bu sebeple, hazırlanacak harçların standartla uygun şekilde malzemeler kullanılarak hazırlanması gerekmektedir [28].

1.3.4.8. Donatı Çeliği

Yığma yapılara süneklik özelliği kazandırmak amacıyla, özellikle yatay derzlerde donatı

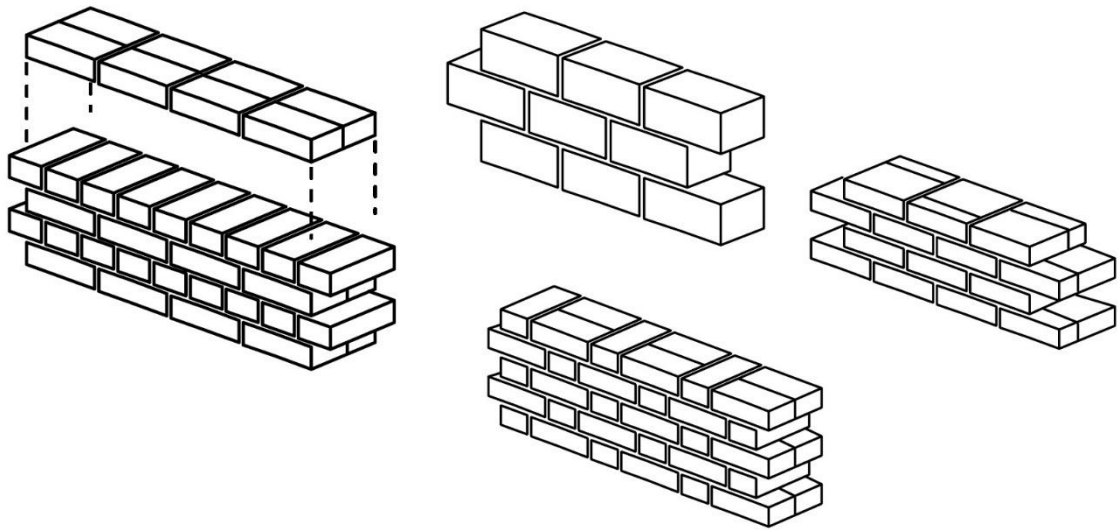
çeliği kullanımına rastlanmaktadır. Bu sayede gevrek davranış gösteren yığma duvarlara süneklik özelliği kazandırılabilir [31].

1.3.5. Yığma Yapı Çeşitleri

Yığma yapılar, donatısız, donatılı, sarılmış ve ön gerilmeli olarak dört farklı gruba ayrılmıştır. Donatısız yığma yapıların kullanımına sıklıkla rastlanılmaktadır. Genel olarak ülkemizde de en çok örneği olan yığma yapı biçimidir. Ancak ülkemizde yürürlükte olan yönetmeliklere göre inşa edilecek yığma yapılarda düşey hatıllar kullanılması gerektiği belirtilmiştir [29], [31].

1.3.5.1. Donatısız Yığma Yapılar

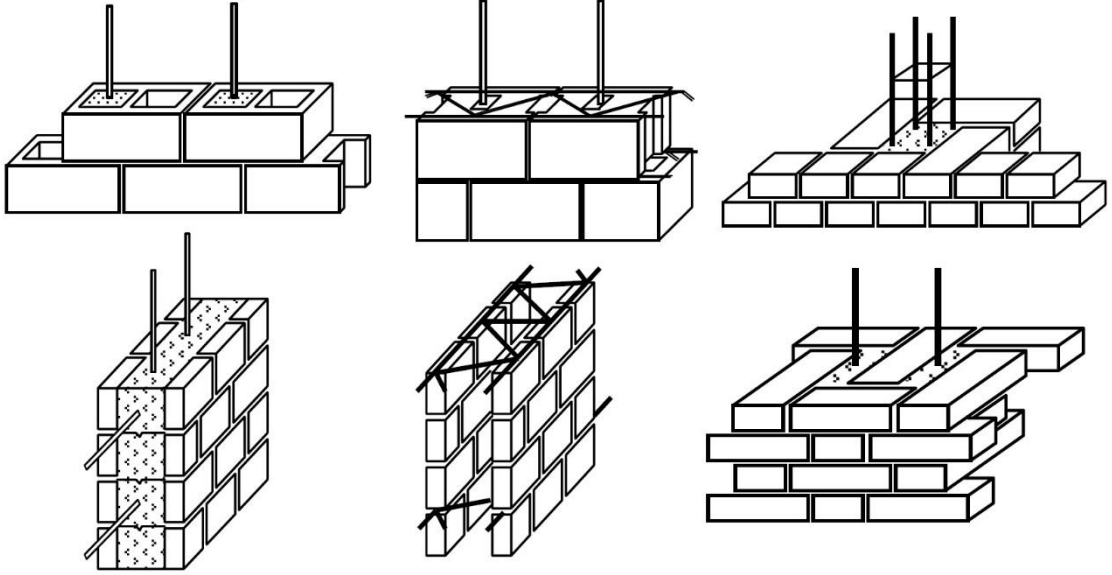
Donatısız yığma yapılarda, düşey ve yatay yükler doğrudan duvarlar vasıtasıyla taşınmaktadır. Diğer yığma yapı sistemlerinde de olduğu gibi duvarların üzerine yatay hatıllar yapılabilir. Duvarlara yükün eşit dağıtılmasında önemli bir rol oynayan hatıllar, düşük moment taşıma kapasitelerinden dolayı hesaplamalarda ihmal edilirler. Bu hatılların esas görevi, döşeme üzerine gelecek yükleri duvarlara aktarmak, döşemelerin mesnetlenmelerini sağlamak ve döşemeye gelen yükleri rijit diyafram gibi çalışmasını sağlayarak diğer taşıyıcılara aktarmasını sağlamaktır. Yapının sünekliğine katkı sağlayacak bir malzeme kullanılmamasından dolayı, donatısız yığma yapılar gevrek bir davranış sergilerler [29], [31], [32].



Şekil 1.8. Farklı düzende örülmüş yığma duvarlar [32], [33].

1.3.5.2. Donatılı Yiğma Yapılar

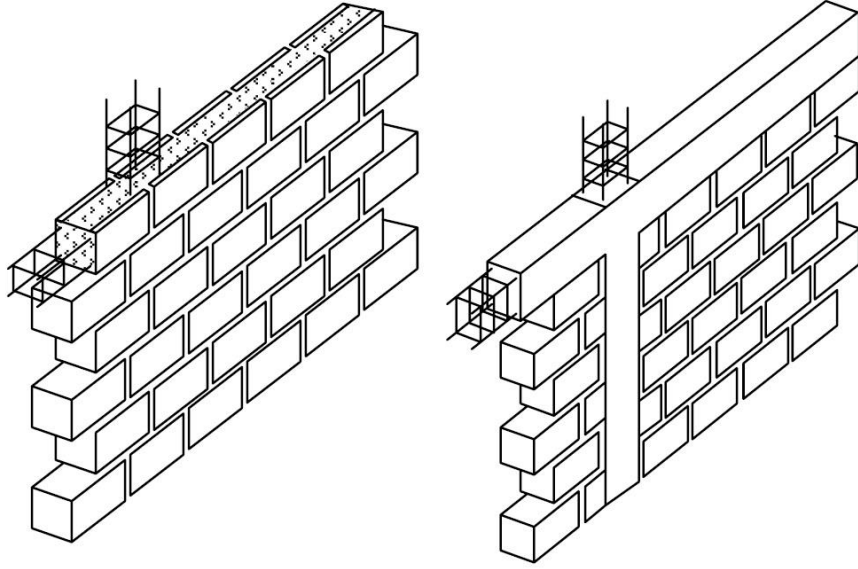
Taşıyıcı duvarlarında, yatay ve düşey yönlerde donatıların farklı düzenlerde yerleştirilmesiyle oluşturulan yiğma yapılar, donatılı yiğma yapılar olarak tanımlanmaktadır. Bu yiğma yapı sisteminde, donatısız yiğma yapılara göre daha nitelikli işçilik ihtiyacı duyulmaktadır. Donatı kullanılmasındaki temel sebep, kesme kuvvetlerinin karşılanmasında donatılarda sisteme katkı sağlamasıdır [29], [31]. Donatılı yiğma yapıların duvarlarına ait örnekler Şekil 1.9'de verilmektedir.



Şekil 1.9. Donatılı yiğma yapı duvar örnekleri [33].

1.3.5.3. Sarılmış Yiğma Yapılar

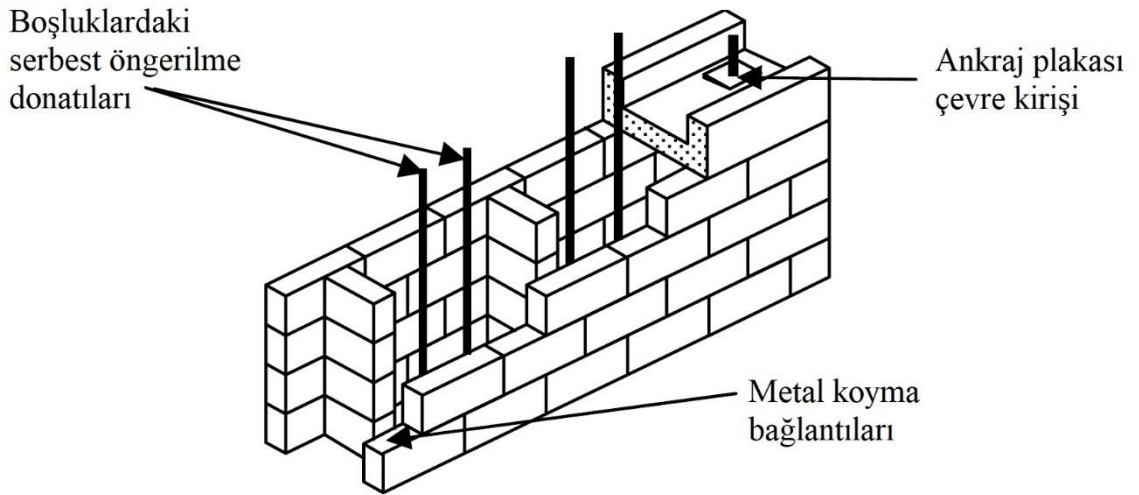
Bu tip yiğma yapılarda deprem performansını arttırmak amacıyla, taşıyıcı duvarlar düşey ve yatay hatıllar yardımıyla çerçeve şeklinde sarılmaktadır. Burada hatılların amacı, bir kolon-kiriş davranışı sergilemek değil, deprem sırasında meydana gelecek hasarları sınırlandırmak ve gevrek bir kırılmanın önüne geçmektir. Bu sayede duvarların rijitliği de artarken döşemelerinde duvarlar üzerine daha iyi mesnetlenmesi sağlanmaktadır [29], [31]. Sarılmış yiğma duvar örnekleri Şekil 1.10'de verilmiştir.



Şekil 1.10. Sarılmış yığma duvar örnekleri [33].

1.3.5.4. Ön Gerilmeli Yığma Yapılar

Taşıyıcı duvarların sünekliğini arttıracak şekilde ön gerilme donatıları (ya da ön gerilme telleri) kullanılan yığma yapı çeşididir. Genellikle iki sıra şeklinde örülen yığma duvarlarda, iki duvar arasına ön gerilme donatısı yerleştirilmekte ve üstten-alttan ankraj levhaları yardımıyla bağlanmaktadır. Ülkemizde örneğine pek rastlanmayan bu yığma yapı biçiminde yapının genel anlamda eğilme ve kesme davranışını iyileştirmek amaçlanmaktadır [29], [31]. Ön gerilmeli yığma yapılara ait örnek Şekil 1.11'de verilmektedir.



Şekil 1.11. Ön gerilmeli yığma yapılara ait örnek model [31], [34].

1.3.6. Yığma Yapı Elemanları

Yığma yapılar genellikle, temel, temel üzerine yerleştirilen taşıyıcı elemanlar ve onların üzerine gelen yatay ya da eğrisel örtü elemanları ile oluşturulmaktadır. Genellikle düşey yükler altındaki davranışa göre tasarımları yapılarak projelendirilmektedirler.

1.3.6.1. Temeller

Yapıya etkileyen tüm yüklerin zemine dağıtılmasını sağlayan yapı elemanıdır. Yapının yapılacağı zemin koşullarına göre yüzeysel ve derin temeller olarak iki farklı şekilde yapılabilir. Güçlü ve sert zeminlerde yüzeysel temeller kullanılırken, yumuşak zeminlerde derin temellere ihtiyaç duyulmaktadır. Yüzeysel temeller, düşey taşıyıcılar altına tekil ya da sürekli olarak yapılmaktadır. Derin temeller ise, zemini güçlendirmek için çakılan kazıklar ve üzerine yapılan ızgaralardan oluşmaktadır. Geleneksel yığma yapılarda, genellikle duvarlar altında beton ya da taş ile sürekli temel yapılmaktadır. Bu sayede duvarların aldığı yükler zemine eşit şekilde dağıtılabilmektedir [29].

1.3.6.2. Taşıyıcı Duvarlar

Taşıyıcı duvarlar, yapıya etkileyen yükleri temele aktaran, yapının dış hatlarını ve iç bölgelerini oluşturan yığma yapı elemanlarıdır. Yığma taşıyıcı duvarlar, gevrek bir davranış sergiler ve çekme gerilmelerini taşıyamazlar. Bu sebeple basınç etkisi altında çalışan elemanlardır [35].

Yığma duvarlar genellikle doğal taş, kerpiç ya da tuğla gibi yapı malzemelerinden imal edilmektedir. Yapıldığı bölgedeki çevre koşullarına ve malzemelerin bulunabilirliğine göre farklı malzemelerden yapılabilirler. Yapı malzemelerindeki malzeme çeşitliliğinin çoğalması ile birlikte birçok farklı yapı malzemesi yığma duvar yapımında kullanılabilir hale gelmiştir [29].

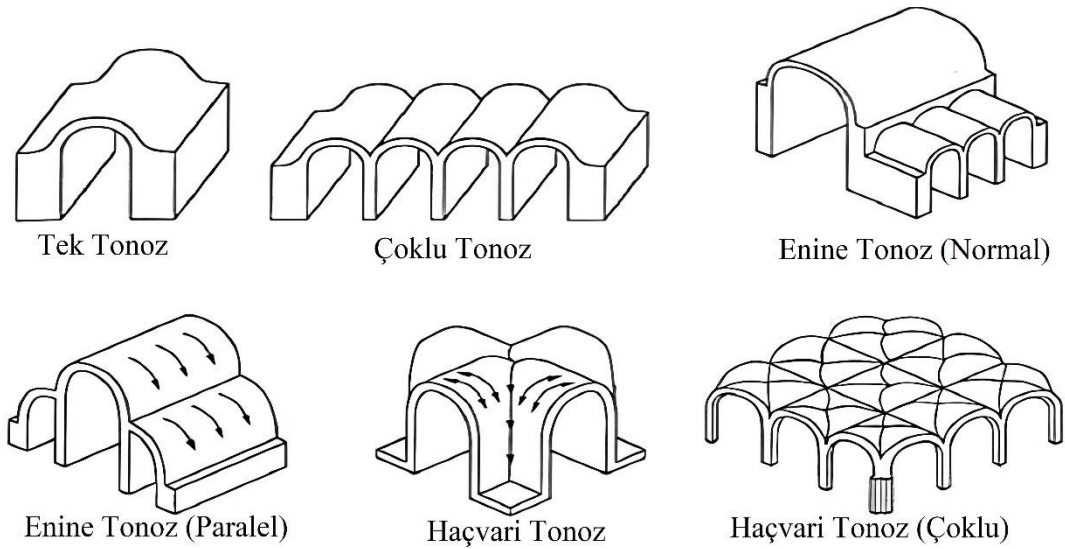
Duvarların boyutları, üzerine gelecek yüklere göre belirlenmektedir. Üzerine gelebilecek düzlem dışı yükler, duvarın kendi öz ağırlığı ile karşılanacağı için, geleneksel yığma yapılarda duvar kalınlıkları olabildiğince büyük tercih edilmektedir. Düşey ve yatay yüklerin karşılanabilmesi için yığma duvarların bir bütün halinde davranması gerekmektedir. Bu sebeple duvarı oluşturan taş ve tuğlaların bir bütünlük oluşturulabilmesi için çeşitli harçlar yardımıyla birbirlerine kenetlenmesi sağlanır. Duvarların üzerine çatıdan gelen eğik yüklerin karşılanabilmesi için, bazı durumlarda duvarlar payandalar ile desteklenmektedir [36].

1.3.6.5. Döşemeler

Döşemeler, yük etkisi altında meydana gelen etkileri bir diyafram etkisi yaratarak düşey taşıyıcılara aktaran yapı elemanıdır. Aynı zamanda, katlar arası bağlantıyı oluşturur ve en üst katın dış mekân ile bağlantısını keserler. Deprem yükü etkisi altındaki davranışlarda önemli rol oynamaktadırlar. Geleneksel tarihi yığma yapılarda, açıklığın kısa doğrultusunu yönünde kütükler yerleştirilerek üzeri ahşapla kapatılan ve toprak tabakasıyla kaplanan döşemeler oluşturulmaktadır. Ancak betonarme imalatının da yaygınlaşmasıyla birlikte yığma yapılarda da betonarme döşemeler kullanılmaktadır [29].

1.3.6.6. Tonozlar

Tonozlar, kemerlerin kendi düzlemine dik doğrultuda ötelenmesiyle oluşturulan mekân örtü sistemleridir. Genellikle dikdörtgen açıklıkların örtülmesinde kullanılırlar. Mesnetlenebilmeleri için sürekli taşıyıcı bir düzleme ihtiyaç duyarlar. İlkel tonoz, beşik tonoz, çapraz tonoz ve manastır tonozu olmak üzere farklı çeşit tonozlar bulunmaktadır. İlkel ve beşik tonozların mesnetlerinin sürekli bir taşıyıcı eleman olma zorunluluğu yoktur [29], [36], [38]. Tonozlara ait örnekler Şekil 1.13’de verilmektedir.

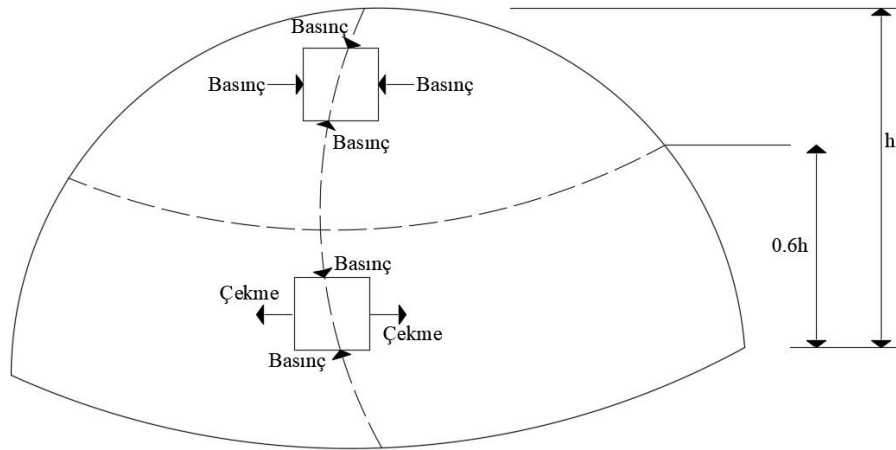


Şekil 1.13. Farklı tonoz çeşitleri [36].

1.3.6.7. Kubbe

Kubbeler, kuvvetleri pozitif çift eğrilikli yüzeylerde taşıyan, bir kemerin simetri eksenini etrafında döndürülmesi ile oluşturulan kabul elemanlardır. Genellikle tuğla, taş veya ahşap olarak yapılan örneklerine rastlamak mümkündür. Bazı tonozlarda olduğu gibi kubbelerinde mesnetlenebilmesi için sürekli doğrultuda taşıyıcı elemanlara ihtiyaç

duyulur. Bu sebeple kubbeler dairesel bir mesnete oturur [29], [38], [40]. Yük etkisi altında kubbe üzerinde oluşacak çekme ve basınç bölgeleri Şekil 1.14'de gösterilmektedir.



Şekil 1.14. Kubbelerin çekme ve basınç bölgeleri [38].

1.4. STATİK VE DİNAMİK YÜKLER ALTINDA YIĞMA YAPILARIN DAVRANIŞLARI

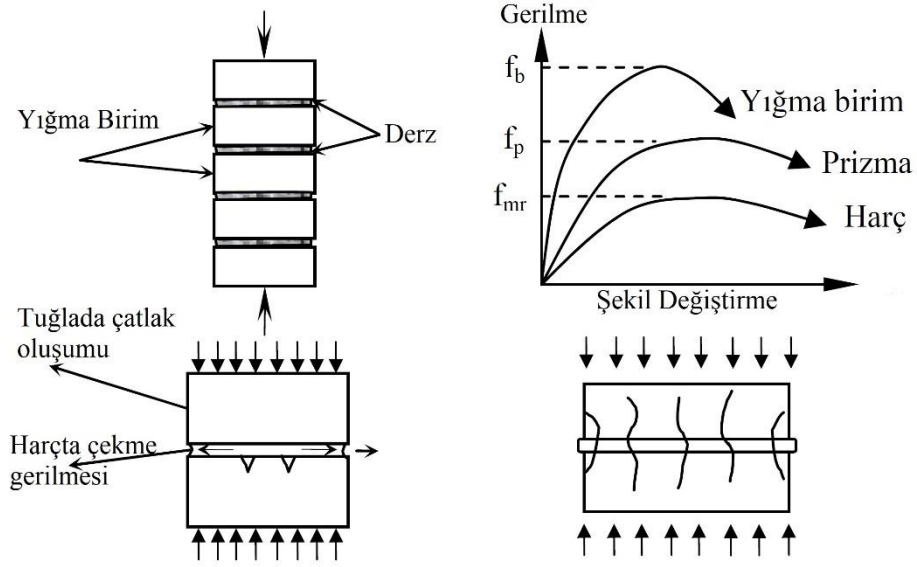
Yığma yapıların taşıyıcı elemanları genellikle duvarlardır. Yığma duvarlar birçok farklı malzemeden üretilmektedir. Bu duvarlar çoğu zaman tuğla, doğal taş ya da kerpiç birimlerden oluşur ve homojen bir yapıya sahip değildir. Malzemelerin birbiri arasındaki yapışmanın sağlanması amacıyla farklı harçlar kullanılmaktadır. Bu yüzden yığma duvarların yük etkisi altındaki davranışlarını belirlerken, yığma duvarı oluşturan malzemenin, yapıştırma harcının ve malzeme ile harç arasındaki aderansın önemi büyüktür. Bu bölümde yığma duvarların yük etkisi altındaki davranışları ile ilgili incelemeler yer almaktadır.

1.4.1. Statik Yük Etkisi Altında Yığma Duvar Davranışı

Yığma duvarlar statik olarak genellikle aksenal basınç, aksenal çekme, eğilme ve kayma etkilerine maruz kalmaktadır. Yığma yapılarda meydana gelen hasarlar, bu etkilere bağlı olarak değerlendirilebilir. Homojen bir yapıda olmayan yığma duvarların, malzemelerini, yapıştırma harçlarını ve malzeme-harç arasındaki ilişkiyi ayrı ayrı incelemek gerekmektedir [31].

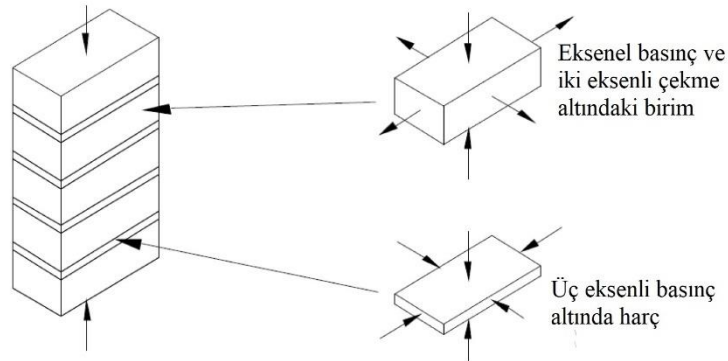
1.4.1.1. Aksel Basınç

Basınç dayanımları incelendiğinde, yığma prizmaların basınç dayanımlarının, yapıştırma harcından daha yüksek olduğu, yığma biriminin basınç dayanımından da daha düşük olduğu görülmektedir [29]. Aksel yük altındaki yığma elemanlara ait basınç etkisi Şekil 1.15'te verilmektedir.



Şekil 1.15. Aksel yük etkisi altındaki yığma elemanların davranışı [41].

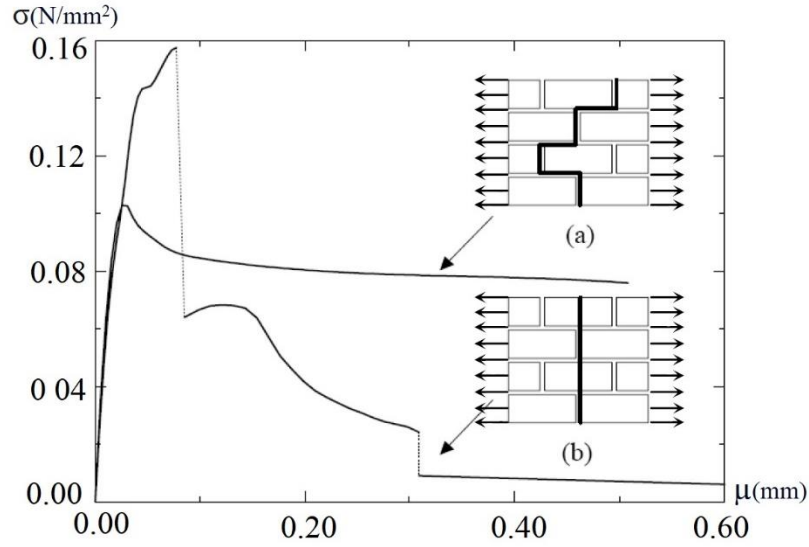
Basınç etkisi altında yapıştırma harçlarında yatay yönde çekme etkisi görülmektedir. Zayıf yapıştırma harcı ve güçlü yığma birimlerden oluşan bir yığma yapı elemanında, yığma birimler harçta meydana gelecek bu yatay yönlü hareketi engellemeye çalışacaktır. Bu sebeple hareketi kısıtlanan harç için üç eksenli bir basınç durumu oluşacaktır. Harçta oluşan bu yatay yönlü deformasyon sonucunda, yığma birimlerinde düşey çatlaklar meydana gelmektedir [29], [31]. Basınç etkisi altın ortaya çıkan gerilmeler Şekil 1.16'da gösterilmektedir.



Şekil 1.16. Basınç etkisi altında gerilme durumları [42].

1.4.1.2. Eksenel Çekme

Yığma birimlerde eksenel çekme etkisi sebebiyle oluşacak deformasyon iki farklı şekilde meydana gelmektedir. Bunlardan ilki, blok ile harç arasındaki aderans kaybından dolayı derz doğrultusunda meydana gelebilecek deformasyondur. İkincisi ise hem yığma birimde hem de harçta, çekme eksenine dik şekilde meydana gelebilecek deformasyondur [29], [31]. Eksenel çekme etkisinden dolayı meydana gelebilecek deformasyonlara ait örnekler Şekil 1.17’de verilmektedir.



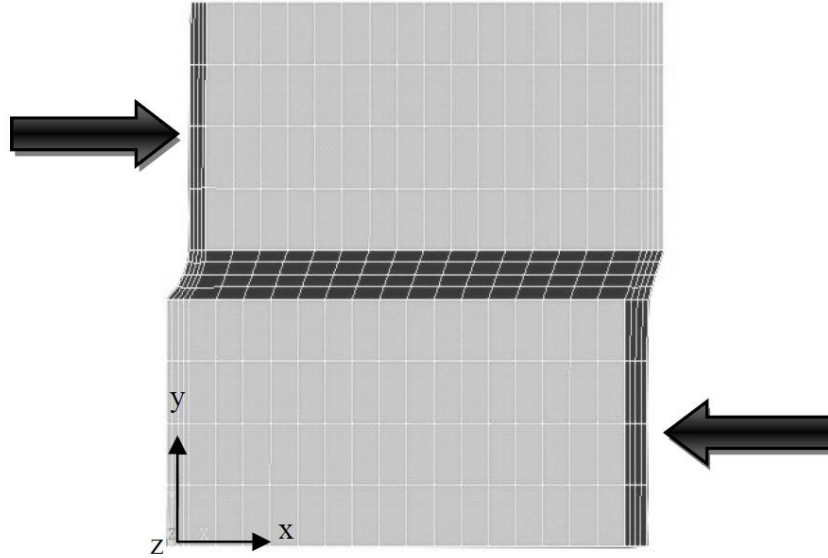
Şekil 1.17. Eksenel çekme etkisi altındaki yığma birim davranışı [43].

Gevrek bir yapıda olan yığma elemanlar, çekme gerilmeleri karşısında büyük risk altındadır. Kayma gerilmeleri ve ısı değişimleri gibi etkilerde yığma birimler üzerinde çekme gerilmesi oluşmasına sebep olabilir. Yığma duvarlar için çekme dayanımı, basınç dayanımının 1/10’u kadar alınabilir [29], [41].

1.4.1.3. Kayma (Kesme) Etkisi

Yığma duvarlarda, aynı ekseninde birbirine ters yönde yüklemeler meydana gelmesi durumunda kayma etkisi altında çeşitli deformasyonlar oluşmaktadır. Kayma etkisine bağlı olarak meydana gelen bu deformasyonlar, harç ve yığma birimlerin dayanım oranlarına göre ya derzler boyunca meydana gelmekte ya da yığma birimlerde de deformasyonlar oluşturmaktadır. Yığma yapı elemanlarında diyagonal kayma deformasyonları, kesme kuvvetinin etki ettiği doğrultuya göre belli bir açıyla oluşan kayma gerilmesi sonucunda meydana gelmektedir. Normal şartlar altında yığma duvarlar ve diğer yapı elemanlarında, kesme kuvvetleri birim elemanların birleşim düzlemlerine

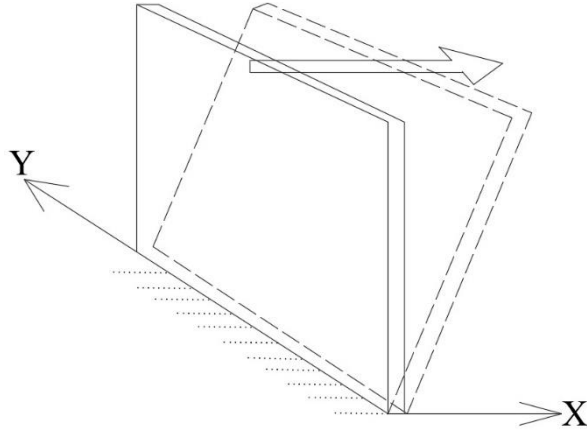
paralel yönde etki etmektedir. Yığma yapı elemanlarında meydana gelen kayma etkileri, harç ve yığma birimler arasındaki aderansa bağlıdır. Bu deformasyonların önüne geçebilmek için yığma yapı bloğu ile harç arasında iyi bir aderans olması gerekir. Yığma yapı elemanlarında, basınç ve çekme kırılmalarına ek olarak kayma kırılmalarının da gözlemlenmektedir [29], [31], [41]. Kayma etkisi altındaki yığma prizmanın davranışı Şekil 1.18’de verilmektedir.



Şekil 1.18. Kayma etkisi altındaki yığma prizmanın davranışı [31].

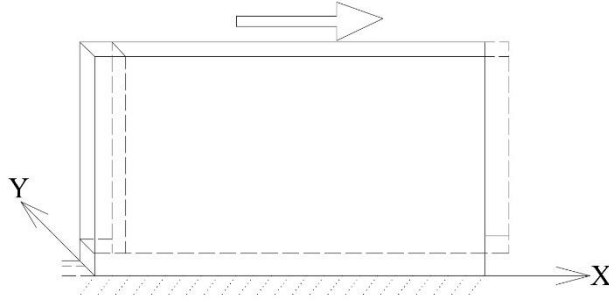
1.4.1.4. Yatay Yük Etkisi

Yığma yapı elemanları, basınç gerilmelerine karşı nispeten yüksek performans gösterirken, çekme gerilmelerine karşı zayıftırlar. Yığma duvarların yatay yük etkisi altındaki davranışını, yükün düzlem içi veya düzlem dışı olması etkilemektedir. Yığma duvarlar, düzlem dışı yatay yük etkisine maruz kaldığında, tabanında eğilme etkisi meydana gelmektedir. Bu eğilme etkisi de duvarın düzlem dışına doğru devrilmesine sebep olabilmektedir (Şekil 1.19) [29].

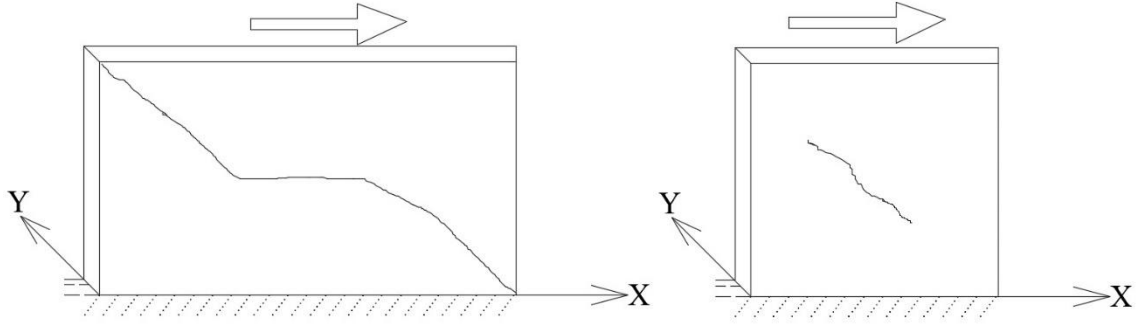


Şekil 1.19. Düzlem dışı yatay bir yüke maruz kalan yığma duvar [44].

Yetersiz harç dayanımına sahip yığma duvarlarda, yatay ve düşey yük etkisi altında derz boyunca kayma hasarları meydana gelmektedir. Yetersiz harç dayanımından dolayı oluşacak kayma hasarı Şekil 1.20’de gösterilmektedir. Düzlem içi yatay yük etkisi altındaki başka duvarlarca desteklenen yığma duvarda, eğilme çatlakları oluşmaktadır. Deprem yükünün etki yönünün değişmesi durumunda, ilk oluşan çatlakla dik yönde başka bir çatlak oluşacak ve X şeklini alacaktır. Bu durumda duvarın en boy oranı fazla ise eğik çatlak duvarın orta noktalarında yatay devam edip, sonra tekrar eğik olarak devam etmektedir. Bu hasar biçimi yatay yük etkisi altında en yaygın karşılaşılan hasar biçimlerindedir [29], [44]. Bu hasar durumları Şekil 1.21’de verilmektedir.



Şekil 1.20. Yetersiz harç dayanımından dolayı oluşabilecek kayma hasarı [44].



Şekil 1.21. Yığma duvarların eğik çekme hasarları [44].

1.4.2. Dinamik Yük Etkisi Altında Yığma Yapı Davranışı

Yapıların dinamik karakteristikleri, sönüm oranları, periyotları ve mod şekilleridir. Yığma yapılar, kısa periyotlu ve rijit davranış göstermektedirler. Bunun yanında süneklik özellikleri daha düşüktür. Bu tür yapılarda taşıyıcı duvarların büyük olması yapıyı rijit yapmakta ve periyodunu kısaltmaktadır [29], [31].

Yığma yapıların davranışını etkileyen bir diğer dinamik parametre sönümdür. Yapıya etki eden dış kuvvetlerden dolayı meydana gelecek salınımlar, yapı ile hava arasındaki sürtünme, yapı elemanları arasındaki sürtünme, yapı elemanlarında meydana gelen çatlakların ara yüzeyindeki sürtünmeler ve duvar elemanlarının malzemeleri arasındaki içsel sürtünmeler ile zamanla azalabilir. Bu duruma yapının sönümü denir. Yığma yapıların sönüm oranı yaklaşık olarak %2-5 aralığında olabilir [29].

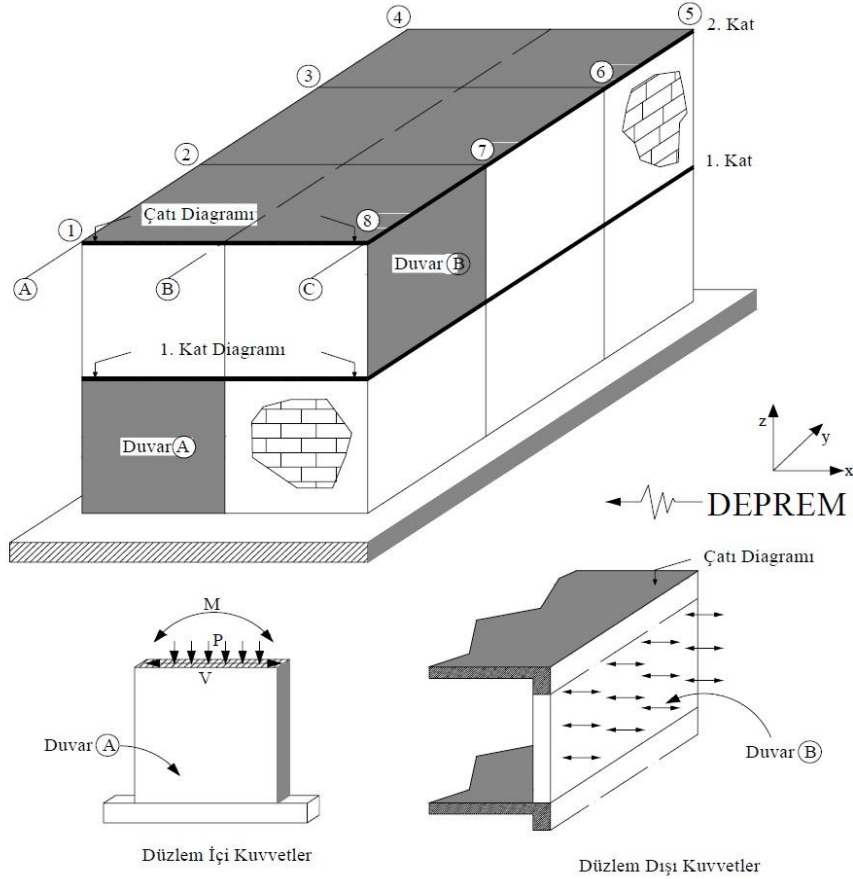
Yatay yük etkisi altında ki yapıların davranışı elastik ve elastik ötesi davranış olarak iki farklı şekilde incelenir. Genel olarak elastik davranış, yük etkisi altında yapının yaptığı ötelenme ve şekil değiştirmenin geri eski haline dönebildiği davranış biçimidir. Elastik ötesi davranış ise yük etkisinde artık geri dönüşü olmayan ve yapı elemanının kalıcı şekilde hasar aldığı davranıştır. Yapının elastik sınırının ötesine geçmesi neticesinde gevrek ve sünek olmak üzere iki farklı davranış türü ortaya çıkmaktadır. Gevrek davranış, ani kırılmaların ve göçmelerin meydana geldiği davranıştır. Sünek davranış ise yapının yük etkisi altında, kalıcı olarak meydana gelen ötelenme ve değiştirmeye rağmen göçme anına kadar üzerine gelen dış kuvvetleri taşımaya devam edebildiği davranış biçimidir. Yığma yapılar gevrek davranış sergiledikleri için, elastik davranış ötesine geçtikleri andan itibaren yapabilecekleri ötelenme ve yerdeğiştirme çok sınırlıdır [37].

1.5. DEPREM ETKİSİ ALTINDA YIĞMA YAPI ELEMANLARINDA MEYDANA GELEN ETKİLER VE HASAR NEDENLERİ

1.5.1. Yığma Yapı Elemanlarında Meydana Gelen Deprem Kaynaklı Etkiler

Yük etkisi altında yığma yapıların davranışlarının belirlenmesi oldukça karmaşıktır. Homojen ve izotrop bir yapıya sahip olmamaları, kullanılan malzemeler ve işçiliklerdeki belirsizlikler yığma yapının davranışının belirlenmesini oldukça zorlaştırmaktadır.

Deprem etkisine maruz kalan yığma duvarda oluşan düzlem içi ve düzlem dışı en büyük düzlem içi zorlanmalar zemin katta meydana gelirken, en büyük düzlem dışı zorlanmalar ise yapının üst kısmındaki duvarlarda meydana gelmektedir (Şekil 1.22) [29].



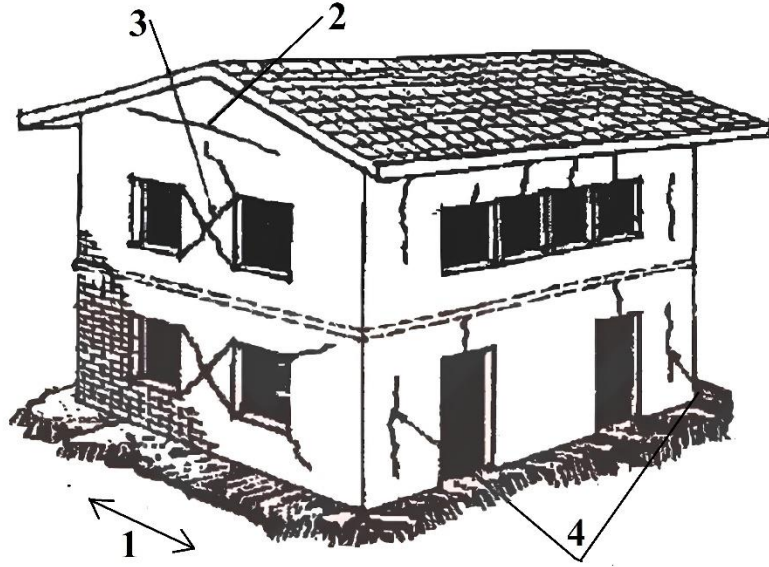
Şekil 1.22. Deprem etkisi altındaki yığma duvarların düzlem içi ve düzlem dışı yüklenmesi durumu [45].

1.5.2. Yığma Yapı Elemanlarında Hasar Oluşum Nedenleri

Yığma yapılarda hasara sebep olan etkiler üç farklı şekilde; çevresel koşullar, zemin yapısı ve deprem etkisi olarak verilebilir. Çevresel koşullar, genellikle yığma yapı elemanları üzerinde onarılabılır düzeyde küçük hasarlara sebep olmaktadır. Zeminden

kaynaklanan hasarlar ise, genellikle, zemin oturması sonucunda meydana gelen ve büyük olumsuzluklara sebep olmayan hasarlardır. Genellikle mühendislik hizmeti alınmadan inşa edilen yığma yapılar için en büyük tehdit deprem etkisidir. Genel olarak düşey yüklerin taşınmasında bir sorun yaşanmazken, deprem etkisi altındaki yatay yükler, yığma yapılarda ağır hasarlara sebep olmaktadır [29].

Meydana gelen depremler neticesinde görülmüştür ki, deprem etkilerinden en çok etkilenen yapı türü yığma yapılarıdır. Yığma yapılar arasından, kerpiç ve taş yığma yapılar depremden en fazla etkilenen yapılarıdır. Özellikle taş yığma yapılarıdaki bu hasarın başlıca sebebi, yetersiz harç dayanımından dolayı dizilen taşlar arasındaki aderansın kaybolması ve yapının bütünüyle ayrışmasıdır. Bu ayrışmalar genellikle kat döşemelerine yakın yerlerde meydana gelmektedir [33]. Bağlantı bölgelerindeki zayıflıklar sebebiyle oluşan çatlaklar yığma yapılarda sıklıkla rastlanılan karakteristik hasar tipidir. Ayrıca planlarındaki düzensizlikler, büyük kapı ve pencere boşlukları yığma yapıların hasar almasına sebep olmaktadır. Hasara sebep olma ihtimali yüksek olan bu boşluk çevrelerinde gerilme yığılmaları meydana gelmektedir. Bu sebeple dolu duvar parçalarında diyagonal çatlaklar, boşluk üzerinde düz, köşelerinde ise diyagonal çatlaklar oluşmaktadır (Şekil 1.23). Boşlukların uzunlukları ve boşluklar arası mesafeler, bu hasarlar sebebiyle yönetmelikler tarafından sınırlandırılmaktadır. Çatı altlarındaki konsol gibi çalışan kalkan duvarlarda, çatının atalet kuvvetine yenik düşerek yatay olarak çatlayabilmektedir [28], [31]. Kapı ve pencere boşlukları olmayan uzun duvarlarda, eksene dik kuvvetler duvarın alt noktalarında yatay çatlaklar, birleşim bölgelerinde ise düşey veya diyagonal çatlaklar oluşturmaktadır. Yığma yapıların yıkılmasına sebep olabilecek en büyük tehlikelerden birisi de duvarların düzlem dışı hareketidir. Bu sebeple çatlamış duvarların, düzlemine dik kuvvetlere karşı stabilitesinde duvar kalınlığı ve narinliği önem kazanmaktadır [46].



- 1- Deprem doğrultusu
- 2- Kalkan duvarlarında yatay çatlaklar
- 3- Pencere boşlukları arasındaki dolu duvar parçasında diyagonal çatlaklar
- 4- Duvarda düşey çatlaklar

Şekil 1.23. Yatay yükler altındaki yığma yapılarda meydana gelen hasarlar [28].

Yığma yapıların hasar derecelerinin değerlendirilmesindeki başlıca parametre oluşan çatlaklardır. Deprem sonrası hasar tespiti gözlemsel şekilde yapılır ve hasar tipi çatlaklara göre belirlenir. Japonya Uluslararası Deprem Kurumu tarafından hazırlanan hasar tespit tablosu (Çizelge 1-1) ve İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Uygulama Merkezi tarafından hazırlanan hasar tespit tablosu (Çizelge 1-2) aşağıda verilmektedir.

Çizelge 1-1. Japonya Uluslararası Deprem Mühendisliği Kurumu tarafından hazırlanan yığma yapılar için hasar kriterleri tablosu [28].

Hasar Sınıfı	Hasar Şekli	Öneri
(0) Hasar Yok	Hasar Yok	-
(I) Yapısal Olmayan Hafif Hasar	Sıvada ince çatlaklar, lokal olarak sıvada dökülmeler	Mimari Açıdan Tamir Gerekli
(II) Yapısal Hafif Hasar	Taşıyıcı duvarlarda ince çatlaklar, sıvada dökülmeler, yapısal olmayan duvarlarda (baca, kalkan duvarı gibi) hasarlar	Mimari Açıdan Tamir Gerekli
(III) Yapısal Orta Hasar	Taşıyıcı duvarda büyük ve derin çatlaklar, yapısal olmayan duvarların yıkılması	Duvarların yük taşıma kapasitesi azaldığından bina boşaltılmalı ve yapı sismik harekete karşı güçlendirilmeli
(IV) Yapısal Büyük Hasar	Taşıyıcı duvarlarda ayrılmalar ve yaklaşık %50'sinin çökmesi	Bina derhal boşaltılmalı, tamirati mümkün ise tamir edilmeli, aksi halde yıkılmalı
(V) Yapının Çökmesi	Yapının büyük kısmının çökmesi	Bina Tamamen Yıkılmalı

Çizelge 1-2. İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Uygulama Merkezi tarafından hazırlanan yığma yapılar için hasar kriterleri [28].

Çatlak Genişliği	Hasar Derecesi	Açıklama
0,1 mm'den az	Önemsiz	Taşıyıcı sisteme ve kullanıma etkisi yoktur.
0,1 mm ~ 0,3 mm	Önemsiz - Az	Taşıyıcı sisteme ve kullanıma etkisi yoktur.
0,3 mm ~ 1,0 mm	Az	Taşıyıcı sisteme etkisi yoktur. Mimari açıdan tamirler gerekli.
1,0 mm ~ 2,0 mm	Orta	Taşıyıcı sisteme etkisi yoktur. Mimari açıdan tamirler gerekli.

Çizelge 1-2. (devam) İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Uygulama Merkezi tarafından hazırlanan yığma yapılar için hasar kriterleri [28].

2,0 mm ~ 5,0 mm	Orta	Taşıyıcı sistem etkilenir. Dış duvarlardan içeriye gelen hava akımı hissedilir. Pencere ve kapılar sıkışır veya kapanmaz, yapının kullanımı etkilenir.
5,0 mm ~ 15,0 mm	Orta - Ağır	Pencere ve kapılar sıkışır, su ve kanal bağlantıları kırılır. Yapı içine su ve soğuk girer. Pencere camları çatlar ve kırılır, sıvalar dökülür, tuğla duvarlar parçalanır. Yığma kemerler çöker. Kabul edilemez çatlak sınırına ulaşılmıştır.
15,0 mm ~25,0 mm	Ağır	Yapının taşıyıcılığı büyük tehlike altındadır. Önemli tamir ve takviyeler gerekli.
25,0 mm'den çok	Çok Ağır	Yapıda ağır hasar mevcuttur, çok önemli takviye veya yıkım gerekli

1.6. YIĞMA YAPILAR İÇİN DEPREME DAYANIKLI TAŞIYICI SİSTEM TASARIMI

Yığma yapıların günümüz koşullarında inşa edilebilmeleri için bazı standart gerekliliklerini sağlamaları ve yapıldıkları ülke yönetmeliklerine uymaları gerekmektedir. Deprem bölgelerinde yapılacak olan, taşıyıcı sistemi doğal veya yapay malzemeli taşıyıcı duvarlar ile oluşturulan yığma binaların ve bina türü yapıların boyutlandırılması ve donatılması bu konuda yürürlükte olan ilgili standart ve yönetmeliklerle birlikte öncelikle Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY2018) [47] dikkate alınarak yapılacaktır. Yığma binaların tasarım esasları ile ilgili tüm detaylar TBDY2018 11. Bölüm 'de verilmektedir.

1.6.1. Yığma Yapıların Mimari Tasarımları

TBDY-2018'e göre yapılacak olan yığma yapıların mimari planlarının, basit, sade ve simetrik olması gerekmektedir. Özellikle dikdörtgen veya kare formunda tercih edilmeli ve mümkünse L, U, T ve H gibi karmaşık planlardan uzak durulmalıdır. Bu karmaşık formlarda burulma etkisi ve köşe noktalarda gerilme yığılmaları meydana gelebileceği için hasar görmeleri muhtemeldir [31], [47].

Mimari tasarımında göz önünde bulundurulması gereken bir diğer önemli konu, taşıyıcı

duvarların sürekliliğidir. Taşıyıcı duvarların bütün katlarda düzenli bir şekilde devam etmesi ve herhangi bir katta taşıyıcı duvar rijitliğinde azalmaya sebep olabilecek bir tasarımdan kaçınılmalıdır. Ayrıca yığma yapıların deprem performansını etkileyen bir diğer parametre döşemelerin diyafram özelliğidir. Tasarım yapılırken deprem yüklerini taşıyıcı duvarlara aktaracak olan döşemelerin diyafram özelliklerini olumsuz yönde etkileyecek bir tasarım yapılmamalıdır.

1.6.2. Yığma Yapıların Kat Sayıları ve Yükseklikleri

Yığma yapılarda izin verilen kat adedi ve yükseklikleri ile ilgili detaylar Çizelge 1-3'te verilmektedir. Bu detaylara ek olarak, yapılacak çatı kat alanı, temeldeki bina brüt alanının %25'inden büyük olmasına izin verilmemekte ve tek bir bodrum kat yapımına izin verilmektedir. Çatı katında yapılacak olan duvarlar da taşıyıcı nitelikte olacağı için, katlarda bulunan taşıyıcı duvarların doğrultusunda yapılmalıdır.

Çizelge 1-3. Yığma bina taşıyıcı sistemleri için tasarım detayları [47].

Bina Taşıyıcı Sistemi	Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı (R)	Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D)	İzin Verilen Bina Yükseklik Sınıfları (BYS)
Süneklik Düzeyi Yüksek Taşıyıcı Sistemler			
Donatılı Yığma Binalar	4	2	BYS \geq 7
Donatılı Gazbeton Panel Binalar	4	2	BYS \geq 7
Süneklik Düzeyi Sınırlı Taşıyıcı Sistemler			
Kuşatılmış Yığma Binalar	3	2	BYS = 8
Donatısız Yığma Binalar	2.5	1.5	BYS = 8

1.6.3. Yığma Yapılarda Taşıyıcı Duvar Kalınlıkları ve Yükseklikleri

Yığma yapılarda duvar kalınlığı belirlenirken (t), sıva kalınlığı dikkate alınmadan, tek katlı yapılarda minimum 25 cm olması gerekmektedir. Ayrıca iki katlı yapılarda birinci kat 30 cm, ikinci kat 25 cm, üç katlı yapılarda ise birinci kat 35 cm, ikinci kat 30 cm, üçüncü kat 25 cm olarak yapılabilir ancak duvar kalınlıklarının her katta aynı olması tavsiye edilmektedir [47]. Taşıyıcı duvarların etkin yükseklikleri (h_{ef}), TS EN 1996-1-1

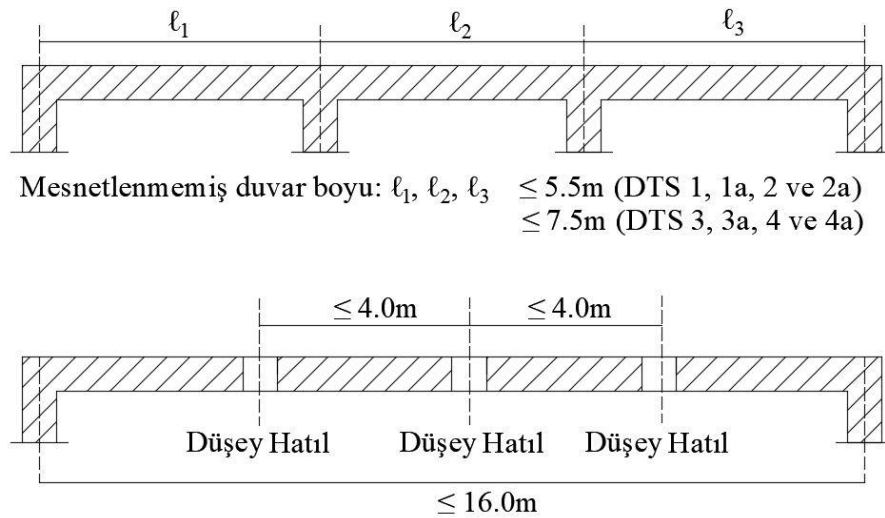
[34] standardına uygun şekilde belirlenecektir. Yığma yapılarda taşıyıcı olarak kullanılacak duvarların geometrik özellikleri Çizelge 1-4'te verilmektedir.

Çizelge 1-4. Kesme kuvveti etkisi altındaki yığma duvarların geometrik koşulları [47].

Yığma Yapı Türü	Duvarın Etkin Kalınlığı (t_{ef}) min (mm)	(h_{ef}/t_{ef}) max (mm)
Donatısız yığma, doğal ya da yapay kesme taş ile	350	9
Donatısız yığma, diğer kâgir birimlerle	240	12
Kuşatılmış yığma	240	15
Donatılı yığma	240	15
Donatılı panel sistemler	200	15

1.6.4. Taşıyıcı Duvarlarda Uzunluk Sınırları

Donatısız ve kuşatılmış yığma binalarda, taşıyıcı duvarların desteklenmiş en büyük uzunlukları ve düşey hatıllar arası olması gereken mesafeler Şekil 1.24'te verilmektedir. Donatılı yığma yapılarda veya donatılı panel sistemlerde verilen detaylar %20 oranında artırılarak kullanılabilir. Bu koşullara uymayan duvarların, düzleme dik yöndeki değerlendirmeleri TS EN 1996-1-1'de verilen detaylara göre yapılacaktır.

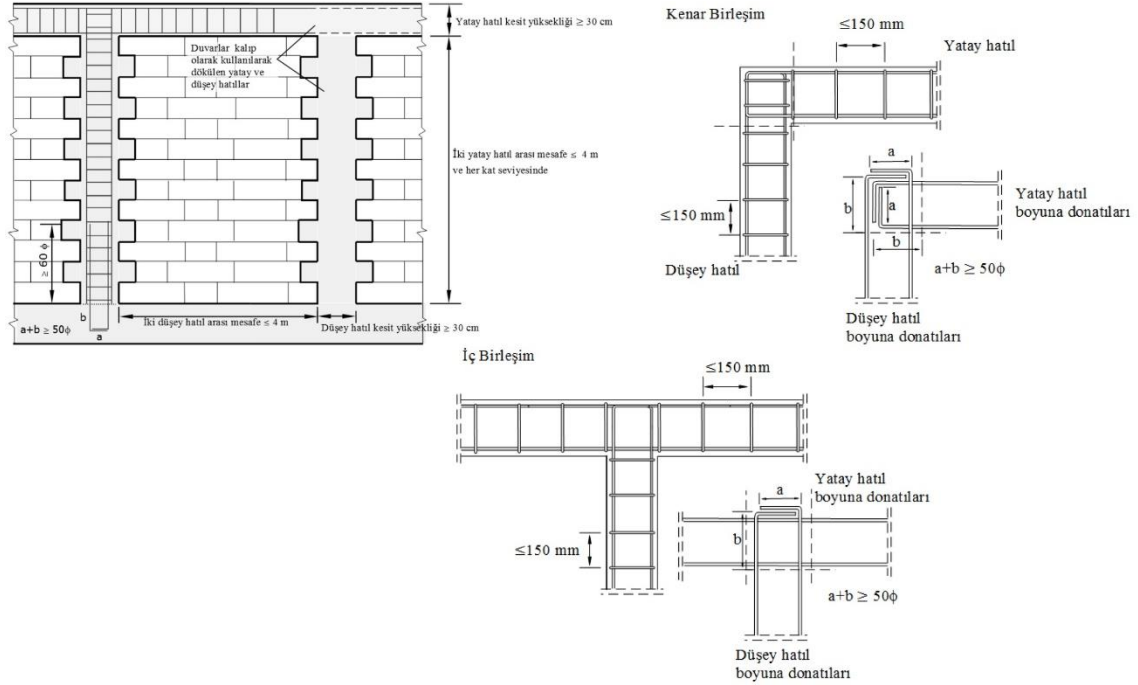


Şekil 1.24. Taşıyıcı duvarların uzunlukları ve hatıllar arası mesafeler [47].

1.6.5. Düşey Hatıllar ve Yığma Yapılardaki Donatı Detayları

Kuşatılmış yığma yapılarda yapılacak düşey hatıllar, yığma duvarlar örüldükten sonra

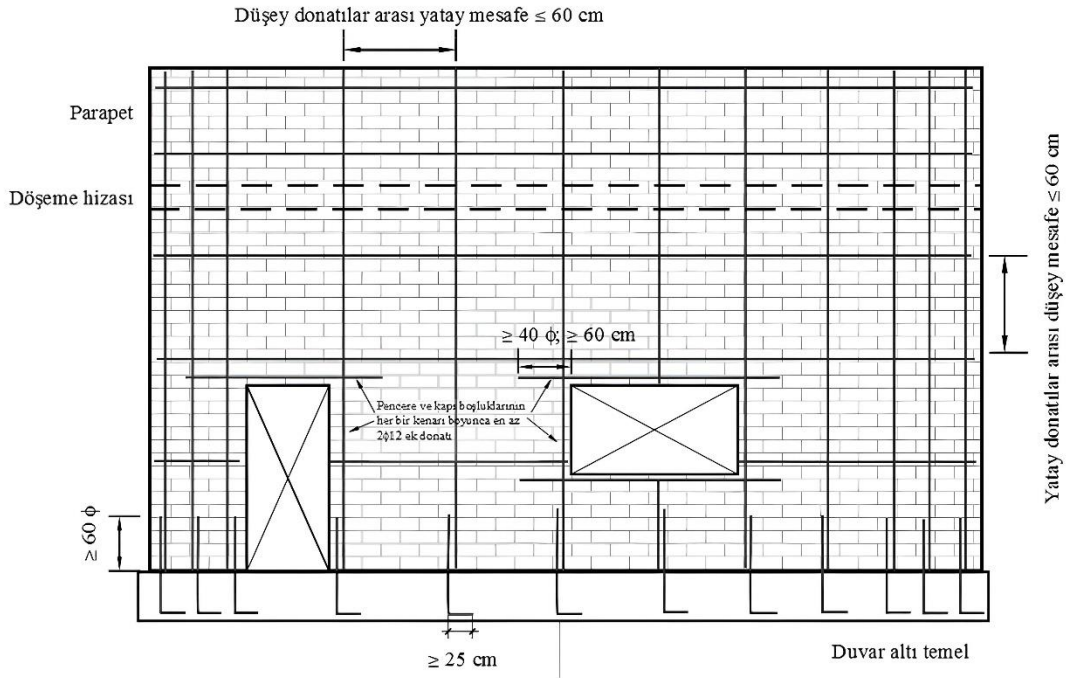
duvarlar kalıp olarak kullanılacak ve bu şekilde dökülecektir. Kuşatılmış yığma yapılarda düşey hatıllar, i) taşıyıcı duvarların serbest uçlarında, ii) alanı $1,5 \text{ m}^2$ 'den büyük olan duvar boşluklarının her iki tarafında, iii) her 4 metre uzun arasında bir hatıl, iv) eğer en yakın düşey hatıl $1,5 \text{ m}$ uzakta ise iki duvarın birleştiği noktada, düşey hatıllar teşkil edilecektir. Düşey hatıl uygulamasına ait detaylar Şekil 1.25'te verilmektedir.



Şekil 1.25. Düşey hatıl detayları [47].

Kuşatılmış yığma yapılarda düşey hatılların en kesit yükseklikleri 300 mm 'den az olmayacaktır. Buna bağlı olarak kullanılacak boyuna donatılar $6\phi 12$ 'den az, enine donatılar ise $\phi 8/150 \text{ mm}$ 'den az olmayacaktır. Düşey hatılların en kesit genişlikleri minimum duvar kalınlığı kadar olacak ve düşey hatıl donatılarındaki bindirmeli ekler 60ϕ 'den kısa olmayacaktır.

Donatılı yığma yapılarda kullanılacak yatay donatılar, yatay derzlerin içerisine ya da uygun çentiklere yerleştirilecektir. Donatıların düşey aralıkları 600 mm 'den daha fazla olmayacaktır. Duvarlardaki yatay donatı oranları, duvar brüt kesit alanı üzerinden $\%0,05$ 'den daha az olmayacaktır. Kullanılacak yatay donatıların yerleşimine ait detaylar Şekil 1.26'da verilmektedir.

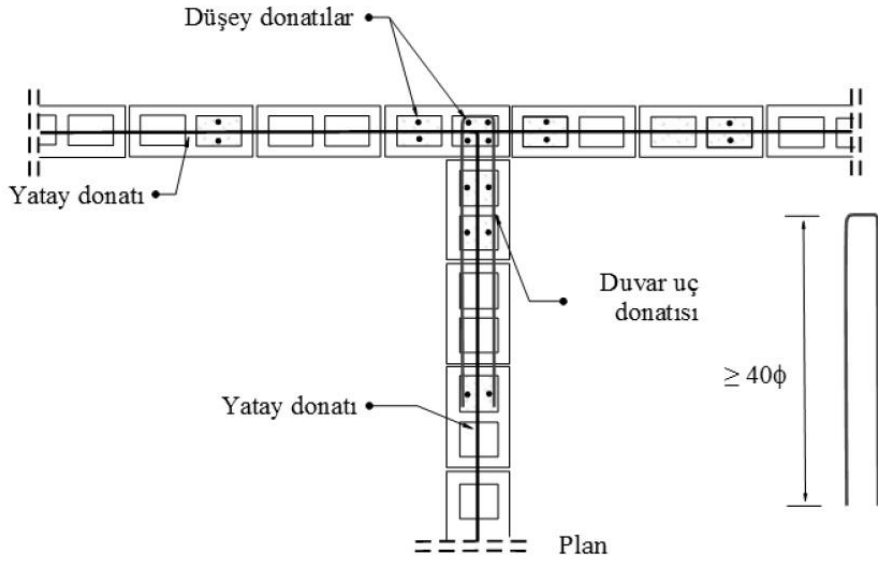
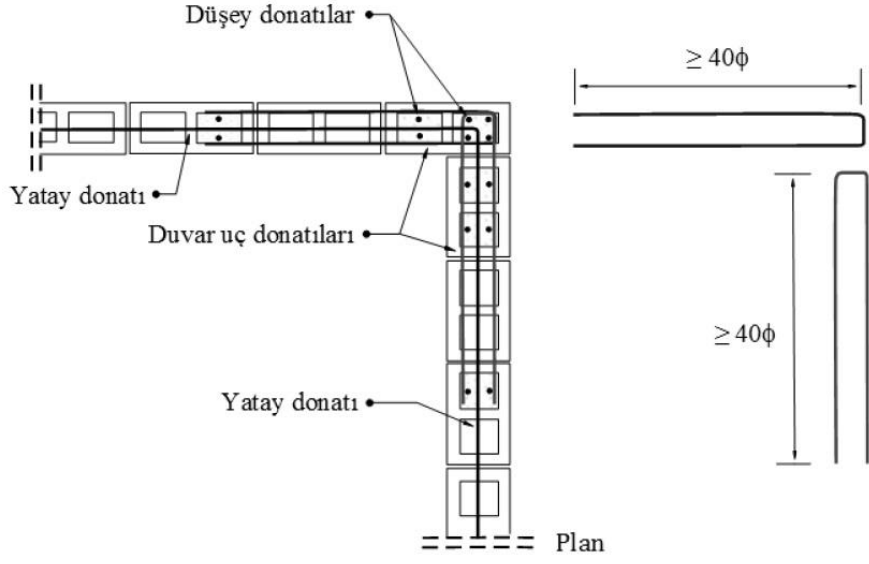


Şekil 1.26. Yatay donatıların yerleşimine ait detaylar [47].

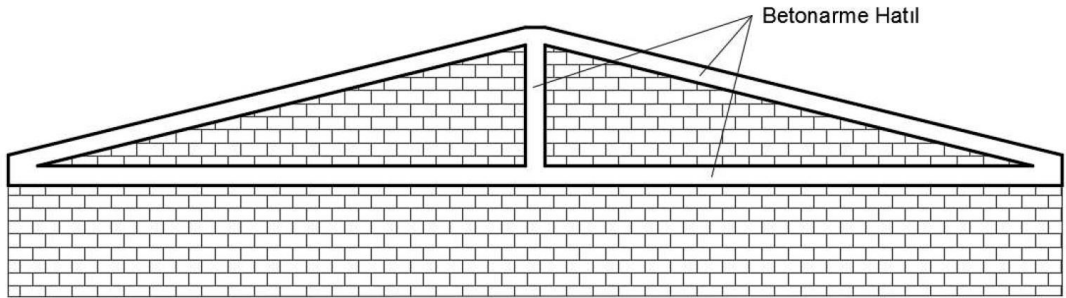
Donatılı yığma yapılarda kullanılacak düşey donatılar, kâgir birimlerdeki deliklere veya ceplere yerleştirilecektir ve donatıların oranı, duvar brüt kesit alanı üzerinden %0,08'den daha az olmayacaktır. Düşey donatılar arası mesafe en fazla 600 mm olacaktır. Ayrıca kapı ve pencere boşluklarının her bir kenarı boyunca $2\phi 12$ ek donatı kullanılacaktır. Duvar uç noktalarında kullanılan donatıların etrafından, çapı en az 4 mm olan etriye geçirilecektir. Donatılara ve etriyelere ait detaylar Şekil 1.27'de verilmektedir.

Yığma yapılarda, en üst yatay hatıla oturan çatı parapet duvarlarının 80 cm'den büyük olması durumunda Şekil 1.28'de gösterildiği gibi yatay ve eğik hatıllar yapılmak zorundadır.

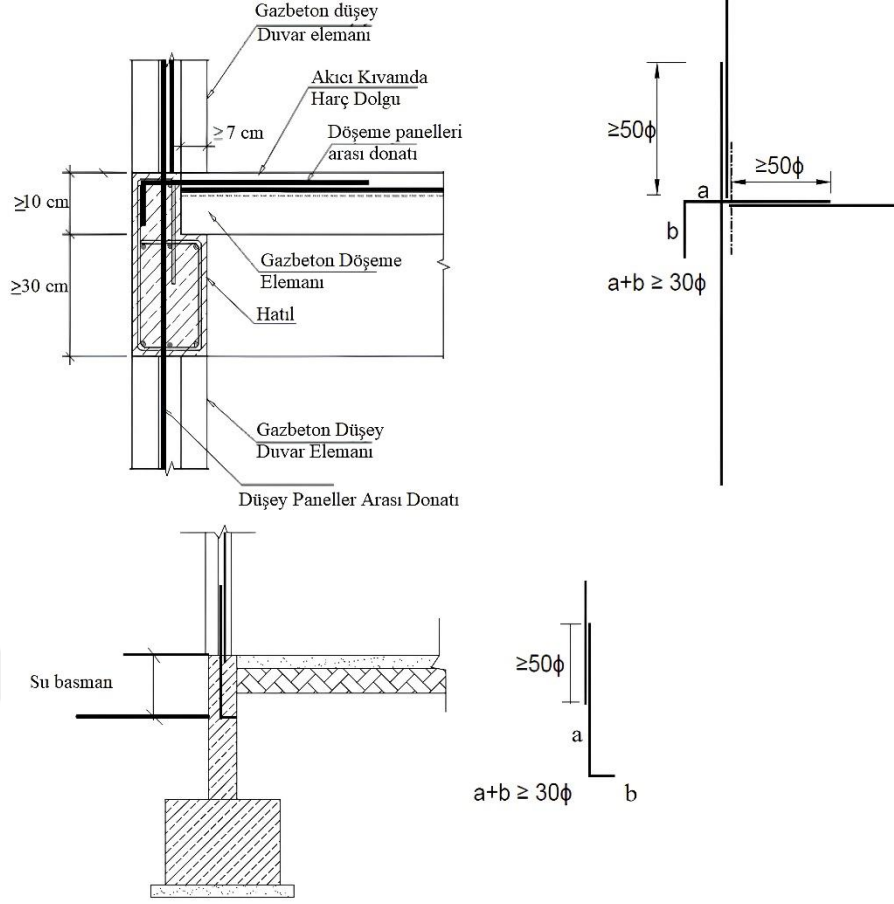
Donatılı paneller ile inşa edilen yığma yapıların döşeme panelleri ve mesnetlendikleri hatıllar ve bu hatıllara ait temel bağlantılarında uygulanacak olan detaylar Şekil 1.29'da verilmektedir.



Şekil 1.27. Donatılara ve etriyelere ait detaylar [47].



Şekil 1.28. Çatı parapet duvarı hatıl detayları [47].

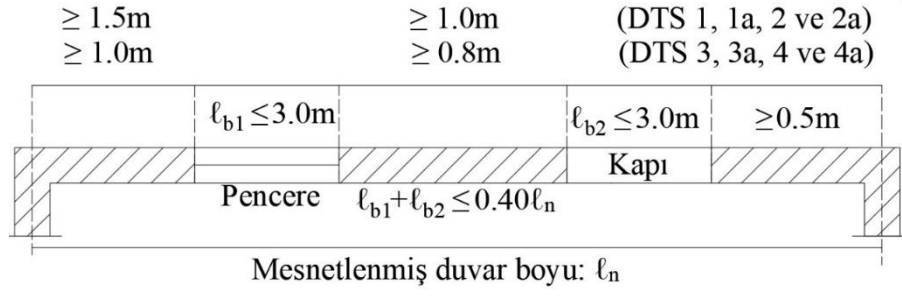


Şekil 1.29. Döşeme panelleri arası donatı ve temel bağlantı detayları [47].

İnşa edilecek tüm donatılı yığma binalarda, yukarıda daha önce bahsedilen donatılara ek olarak, taşıyıcı duvarların serbest kenarlarında, duvar-duvar birleşimlerinde ve her 5 m açıklık geçildiğinde $4\phi 12$ 'den az olmayacak şekilde düşey ilave donatılar yerleştirilerek, yerleştirildiği cepler veya delikler harç ile doldurulacaktır.

1.6.6. Taşıyıcı Duvarlarda Bırakılacak Boşluk Sınırları

Yığma yapı taşıyıcı elemanlarında bırakılacak kapı ve pencere gibi boşluklarda, boşlukların üzerine lento yapılacaktır ve lentoların duvarlara oturan bölümlerinin boyu 200 mm'den az olmayacaktır. Yapılacak lentoların yükseklikleri min. 150 mm olarak belirlenmiştir. Kapı ve pencere boşlukları ile ilgili geometrik detaylar Şekil 1.30'da verilmiştir.



Şekil 1.30. Kapı ve pencere boşluklarına ait geometrik detaylar [47].

1.6.7. Yığma Yapılarda Deprem Hesabı

Yığma yapıların tasarımı yapılırken, deprem yüklerinin hesabı TBDY 2018 bölüm 4'e göre yapılacak, bina taşıyıcı sistemi modellenecek, düşey ve yatay yüklerin birleşik etkisinde yapısal çözümlene yapılacaktır. Yapısal çözümlene sonlu elemanlar yöntemi ile veya eşdeğer çubuk yöntemi ile yapılabilecektir.

Yapısal çözümlene, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılacaksa eğer, taşıyıcı duvarlar; ayrıntılı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme veya makro modelleme ile modellenebilir. Ayrıntılı mikro modellemenin kullanılacağı durumlarda yığma duvar bileşenlerinin (kâgir birimleri, yatay ve düşey derzleri) ayrı ayrı dikkate alınmalıdır. Basitleştirilmiş mikro modellemede, yatay ve düşey derzler ihmal edilerek, genişletilmiş kâgir birimler ortalama ara yüzey çizgisi ile birbirinden ayrılmaktadır. Makro modellemede ise taşıyıcı duvarlar bütün bir kompozit eleman olarak düşünülebilir.

Eşdeğer çubuk yöntemi kullanılarak yapılacak çözümlenelerde ise yığma duvarların rijitliği, kayma parametreleri ve eğilme deformasyonları dikkate alınarak hesaplamalar yapılacaktır. Taşıyıcı duvarların elastisite modülü (E_{duv}), TS EN 1052-1 [48] dikkate alınarak hesaplanacak, kayma modülü (G_{duv}) ise elastisite modülünün %40'ı olarak alınacaktır. Dikdörtgen kesitli bir duvar parçasının elastik rijitliği, her iki ucu ankastre olarak kabul edilerek hesaplanmaktadır (1.3) [47].

$$k_{duv} = \frac{1}{\left(\frac{H^3}{12E_{duv}I} + \frac{H}{1.2G_{duv}A} \right)} \quad (1.3)$$

Burada;

A: Dolu duvar parçasının yatay en kesit alanını,

I: Dolu duvar parçasının atalet momenti olarak ifade edilmektedir.

Tüm yığma bina çeşitlerinde taşıyıcı duvar etkin rijitlikleri, bürüt rijitliklerin %50'si kadar azaltılarak alınacaktır. Taşıyıcı duvar etkin rijitlikleri kullanılarak hesaplanan yerdeğiştirmeler sonucunda oluşan görelî kat ötelenme oranının R/I katsayısı ile çarpımının 0,007 altında olması sağlanacaktır.

Duvar kesit uzunlukları, duvar kalınlığının iki katından az olan duvarlar hesaplamalar yapılırken taşıyıcı olarak dikkate alınmayacaktır. Ayrıca kuşatılmış yığma yapılarıdaki yatay ve düşey hatlılar da yapısal modellemede dikkate alınmayacaktır.

1.6.8. Yığma Yapılarda Taşıma Gücü Yöntemine Göre Hesap

Yığma duvarların taşıma gücü yöntemine göre hesabında, duvara düşey doğrultuda etki eden tasarım kuvveti (N_{Ed}), duvar düşey tasarım kuvvetinden (N_{Rd}) daha büyük olamaz. Tek katmanlı yığma taşıyıcı duvarların, düşey yük tasarım dayanımları (N_{Rd}) (1.4) ve tasarım basınç dayanımlarının (f_d) (1.5) hesaplanması için kullanılacak denklemler aşağıda verilmektedir.

$$N_{Rd} = \lambda A f_d \quad (1.4)$$

$$f_d = f_k / \gamma_m \quad (1.5)$$

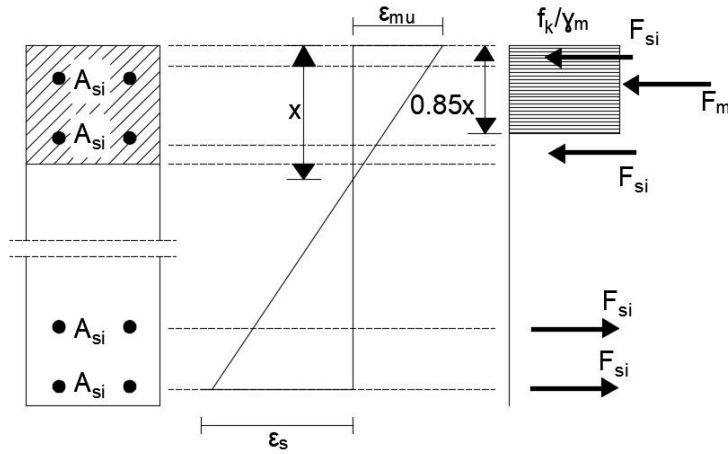
Buradaki, narinliğe bağlı kapasite azalma katsayısı (λ), narinlik oranının (h_{ef}/t_{ef}) 6 değerinden küçük olması durumunda 1,0 olarak, 6 ile 10 arasında olması durumunda 0,8 olarak ve 10 ile 15 arasında olması durumunda ise 0,7 olarak alınacaktır. Ayrıca narinlik oranının 15'ten büyük olmasına izin verilmemektedir. Dayanım azalma katsayısı (γ_m) ise gazbeton bloklarda 1,75 ve diğer yığma yapı malzemelerinde ise 2,0 olarak alınacaktır.

Donatısız taşıyıcı yığma duvarların tasarımında, duvar kesme kuvveti dayanımı (V_{Rd}), duvara etki eden tasarım kesme kuvvetinden (V_{Ed}) daha büyük olmak zorundadır. Duvar kesme kuvveti dayanımı (V_{Rd}), denklem (1.6) ve denklem (1.7) ile hesaplanan değerden en küçük olanı alınacak ve denklemde bulunan " f_b " değeri 25 MPa'dan daha büyük alınmayacaktır. Ayrıca duvar yüksekliğinin, duvar uzunluğuna oranı (b), 1,0'den küçük 1,5'ten büyük alınmayacaktır.

$$V_{Rd} = f_{vd} t \ell_c \quad (1.6)$$

$$V_{Rd} = \ell_t \frac{1.5f_{vdo}}{b} \sqrt{1 + \frac{N_{Ed}}{1.5\ell_t f_{vdo}}} \quad (1.7)$$

Donatılı yığma duvar ve panellerin düşey yük ve düzlem içi eğilme etkisindeyken tasarımlarında, yığma ve gazbeton malzemelerin çekme gerilmeleri ihmal edilecektir. Donatılı yığma duvarların kesitteki gerilme ve şekil değiştirmeleri Şekil 1.31'deki gibi dikkate alınacaktır. Tasarım dayanım momenti (M_{Rd}), verilen bu gerilme-şekil değiştirme eğrisine göre hesaplanacaktır. Yığma duvar tasarım dayanım momenti (M_{Rd}), duvara etki eden tasarım momentinden (M_{Ed}) daha büyük olmak zorundadır. Donatılı taşıyıcı duvarlarda, donatı akmadan önce basınç kırılması olmayacağı hesaplanarak gösterilmelidir.



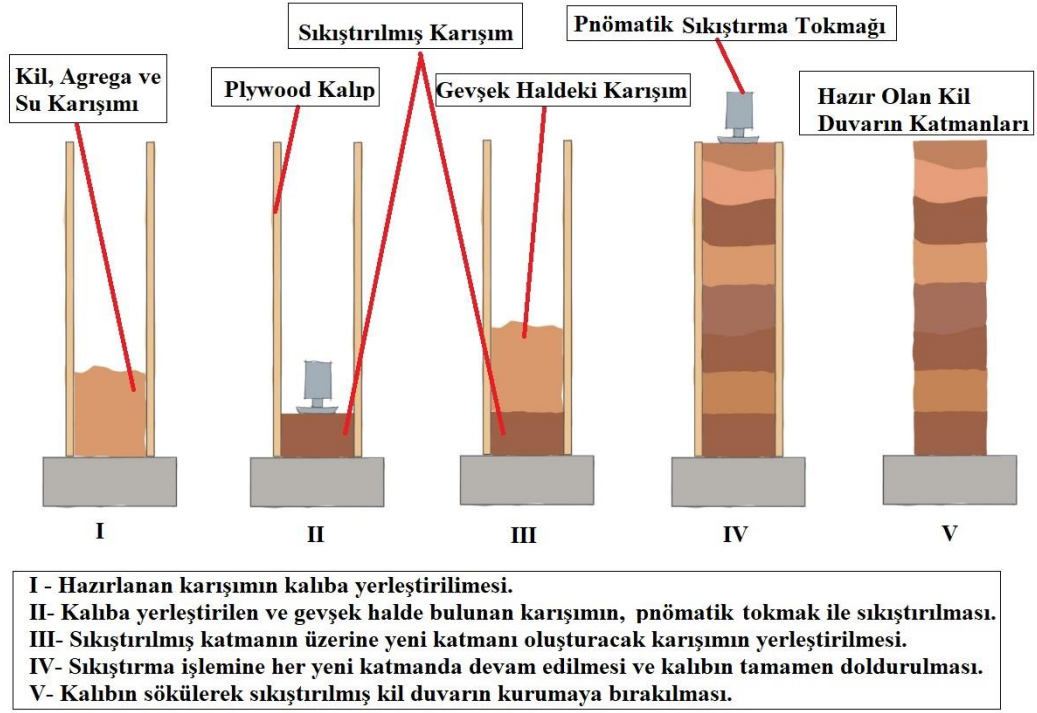
Şekil 1.31. Gerilme ve şekil değiştirme dağılımı [47].

Düzlem içi kesme etkisine maruz kalan donatılı yığma duvarların hesabında, duvarların tasarım kesme dayanımı (V_{Rd}), duvara etki eden tasarım kesme dayanımından (V_{Ed}) fazla olmalıdır. Düşey donatı içeren duvarların kesme dayanımlarının belirlenmesi ile ilgili detayların tamamı TBDY 2018 Bölüm 11.4.5'te [47], donatılı paneller ile teşkil edilen binaların kesme kuvvetinin belirlenmesi ile ilgili detaylar Bölüm 11.4.6'da ve donatısız yığma yapıların kesme kuvvetinin belirlenmesi ile ilgili detaylar Bölüm 11.4.7'de verilmektedir. Kuşatılmış yığma duvarların kesme kuvveti dayanımı, duvarı kuşatan hatılların kesme kuvvetleri toplanarak belirlenecektir. Yığma kesme kuvveti hesabı da donatısız yığma binalar için verilen esaslar dikkate alınarak yapılacaktır. Hatılların kesme kuvveti hesaplanırken, sadece beton katkısı dikkate alınıp, hatıl üzerindeki aksenal yükler ihmal edilecektir.

1.7. SIKIŞTIRILMIŞ KİL DUVARLAR VE ÜRETİM ŞEKİLLERİ

Sıkıştırılmış kil duvarlar binlerce yıldır uygulanan, insanların barınma ihtiyaçlarını karşılamak için yaptıkları yığma yapılarda kullanılan ilkel bir yapı elemanıdır. Bulunduğu bölgeden temin edilen malzemeler ile üretiliyor olması ve kullanımın ömrünü tamamladığında bulunduğu yerde ayrılarak doğaya tekrar kazandırılması sayesinde çevreye duvarlı bir yapı elemanı ve üretim tekniği olarak yıllarca var olmuştur.

Sıkıştırılmış kil duvarlar, agrega, killi toprak ve suyun belirli miktarlarda karıştırılarak uygun kıvama getirilmesi ve katmanlar halinde kalıba sıkıştırılması ile üretilmektedir. İlkel aletler kullanılarak üretimin yapıldığı basit bir yapım tekniğidir. İstenilen boyut ve şekillerde kalıplar hazırlanarak duvarlar üretilmektedir. İlkel koşullarda basit tokmaklar yardımıyla sıkıştırma işlemleri gerçekleştirilirken, günümüz koşullarda farklı sıkıştırma enerjisine sahip pnömomatik tokmaklar kullanılmaktadır. Hali hazırda zaten kolay bir üretim tekniği olan bu teknik, bunun gibi teknolojik ilerlemeler sayesinde daha da gelişmektedir. Üretimin ilk aşaması, kullanılacak olan toprağın optimum su içeriğinin belirlenmesi amacıyla standart proktor testinin yapılmasıyla başlamaktadır. Optimum su içeriği belirlendikten sonra, karışım hazırlanarak kalıplara yerleştirmeye uygun hale getirilmektedir. Sıkıştırılmış kil duvarları üretmek için istenilen şekilde ve boyutta kalıplar kullanılabilir. Hazırlanan karışımın her seferinde kalıba eşit miktarlarda yerleştirilmesi önem arz etmektedir. Bu sayede katman yükseklikleri ve sıkışma miktarları birbirine yakın olacaktır. Kalıba yerleştirilen karışım, tokmak yardımıyla eşit sürelerde sıkıştırma işlemine tabi tutulmaktadır. Optimum su içeriğiyle karışım hazırlanmasının önemi bu noktada ortaya çıkmaktadır. Optimum miktarın üzerinde su kullanılması, karışımın sıkıştırılmayacak kadar ıslak olmasına ve balçık halini almasına sebep olmaktadır. Optimum miktardan daha az su kullanılması ise, karışım tanelerinin birbirini tutmamasına, sıkıştırılmamasına ve dayanım kazanmamasına sebep olmaktadır. Bu sebeple optimum su içeriği ile karışım hazırlamak, sıkıştırılmış kil duvar üretimindeki en önemli adımı oluşturmaktadır. Eşit miktarda sıkıştırılan katmanlar birbiri üzerine yükselerek kalıbı doldurur ve sıkıştırılmış kil duvarı oluşturur. Üretim tamamlandıktan sonra kalıbın açılması için beklenmesine gerek yoktur. Ancak duvarın dayanım kazanabilmesi için tamamen kuruması gerekmektedir. Sıkıştırılmış kil duvarların katmanlar halinde sıkıştırılması Şekil 1.32’de gösterilmektedir.



Şekil 1.32. Kil duvarın kalıba sıkıştırılması.

1.8. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tamamen doğal malzemelerin kullanılması ve karbon ayak izinin düşük olması sıkıştırılmış kil tekniğini çevreye duyarlı bir yapım tekniği yapmaktadır. Sıkıştırılmış kil yapılar ömrünü tamamladığında olduğu yerde kolayca yıkılmakta ve doğada ayrılarak geri dönüşüme olanak sağlamaktadır [49]–[51]. Genellikle Çin ve Akdeniz bölgesinde yaygın olarak kullanımına başlanan bu yöntem, insanların göç hareketliliğine başlaması sonucunda dünya üzerinde geniş bir alana yayılmıştır. Avrupa'daki birçok ünlü kalenin yanı sıra piramitlerin bir bölümü de bu teknikle üretilerek daha sonra taş ile birleştirilmiştir. Yüzyıllar öncesinde üretilerek günümüze kadar gelen bu yapılar sıkıştırılmış kil duvar tekniğinin uzun ömürlülüğünün en güzel kanıtıdır [5], [6]. Tüm bu avantajlı özelliklerinin yanında, günümüz şartlarında üretilerek kullanılmaları için belirli standartları karşılamaları gerekmektedir. Düşük mekanik ve durabilite özelliklerinin stabilize edilmesi bu yüzden önemli bir zorunluluktur. Geleneksel killi toprak ve su karışımına, çeşitli malzemeler eklenerek belirli özelliklerin iyileştirilmesi işlemine stabilizasyon adı verilmektedir. Bu şekilde üretilen sıkıştırılmış kil duvarlara, stabilize edilmiş sıkıştırılmış kil duvarlar adı verilmektedir. Sıkıştırılmış kil duvarlar geçmişten

günümüze birçok farklı malzeme ile (çimento, kireç, alçı, endüstriyel atıklar vb.) stabilize edilmeye çalışılmıştır. Bu sayede mekanik ve durabilite özelliklerinin artırılması hedeflenmektedir. Çevre koşullarına doğrudan maruz kalan bu elemanların en büyük problemlerinden biri de suya karşı olan zayıflıklarıdır. Rüzgâr ile birlikte gelen yağmurun aşındırıcı etkisi sıkıştırılmış kil duvarların dayanıklılığını zamanla azaltmaktadır. Bu sebeple uzun ömürlü olması istenen sıkıştırılmış kil duvarların stabilizasyonu önem taşımaktadır. Artan çevre bilinci ve çevreci bir üretim tekniği olması sebebiyle, araştırmacıların sıkıştırılmış kil üzerindeki ilgisi son zamanlarda artmıştır [52]–[54].

Artan ilgi neticesinde literatürde sıkıştırılmış kil yapılar ve stabilizasyonları ile ilgili farklı birçok araştırmaya ulaşmak mümkündür. Yapılan çalışmalar genellikle mekanik özelliklerini iyileştirme noktasına yönelmektedir. Temel olarak iki basit malzemedan oluşan bu üretim tekniği için su ve killi toprak yeterli olmaktadır. Ancak günümüz koşullarında üretimi yapılmak isteniyorsa belirli standartların gerekliliklerini karşılamaları gerekmektedir. Bu sebeple stabilize edilmeleri önemlidir.

Sıkıştırılmış kil yapılarda temel olarak, farklı kil içeriğine sahip topraklar kullanılabilir. Ancak sıkıştırılmış kil gibi basit ve çevreci bir yapıım tekniği için bulunduğu yerel bölgeden hammadde temin edilmesi ana kriterlerden biridir [55]. Farklı toprak türlerinin üretim için uygunluğu ile ilgili olarak yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Jayasinghe ve Kamaladasa [56], Sri Lanka’da yaptıkları çalışmada, tropikal iklim koşullarına sahip bölgelerde sıklıkla bulunan laterit içerikli toprağın kullanılabilirliğini ve çimento ile stabilizasyonunu araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, killi laterit toprağın kullanılabilceği ve %6 oranında veya daha fazla çimento ile stabilize edilebileceğini tespit etmişlerdir. Çimento miktarı arttıkça basınç dayanımı özelliklerindeki iyileşmenin artacağı sonucuna varmışlardır. Ayrıca, yaygın olarak sıkıştırılmış kil yapıların bulunduğu Avustralya’da uygulanan standartlarına göre, çimento ve kireç stabilizasyonu için, kullanılacak toprağın, %11’den daha düşük doğrusal büzümeye, %64’den daha düşük kum içeriğine ve tercihen %21-%35 aralığında ince parçacıklara sahip olması gerektiği önerilmektedir [57], [58]. Silva ve diğ. [59] Portekiz’de bulunan atık granit toprak ile sıkıştırılmış kil yapı inşa edilebilirliğini araştırdıkları çalışmalarında, bu toprağın üretim için uygun olmadığını ancak farklı şekillerde stabilize edilirse kullanılabilceği sonucuna varmışlardır. Granit toprağın, uçucu külün alkali aktivasyonu ile stabilize edilebileceğini ve kullanılabilir hale gelebileceğini önermektedirler. Karışımların su içeriği de basınç dayanımı değerleri üzerinde oldukça etkilidir. Kullanılan

topraktaki optimum sıkışmayı sağlamak ve yüksek basınç dayanımı değerleri elde etmek için %10-%13 aralığında bir su içeriği kullanılması ve karışımın mümkün olduğunca homojen olarak hazırlanması önerilmektedir [60], [61].

Sıkıştırılmış kil elemanların stabilizasyonunda kullanılan malzemelerin yelpazesi gün geçtikçe genişlemektedir [62]–[64]. Portland çimentosu, günümüzde en yaygın tercih edilen stabilizasyon malzemesidir [65], [66]. Portland çimentosu, sıkıştırılmış kil elemanların mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmektedir [61], [63], [67]. Özellikle basınç dayanımı ile çimento miktarındaki artış arasında doğrusal bir ilişki vardır. Yaygın olarak kullanılan standartlarda bulunan basınç dayanımı kriterlerini sağlamak için çimento stabilizasyonu uygundur [68]–[70]. Eksenel yük altında sıkıştırılmış kil kolonların mekanik davranışlarını araştıran bir çalışmada, çimento ile stabilize edilen kolonların uygun şekilde tasarlandığında 2 katlı yapıların inşasında kullanılacağı sonucuna varılmıştır [71]. Yapım tekniği olarak sıkıştırılmış kilin yaygın olarak kullanıldığı Avusturalya, Yeni Zelanda ve Amerika Birleşik Devletleri gibi ülkelerde, çimento stabilizasyonu neredeyse rutin bir uygulama haline gelmiştir. Ancak çevresel sürdürülebilirlik ve mali kaygılar sebebiyle kullanım miktarı sınırlandırılmaktadır [62]–[64].

Portland Çimentosunun dışında endüstriyel atıkların stabilizasyonda kullanılması da yaygınlaşmaktadır. Bu amaçla uçucu kül, taban külü, yüksek fırın cürufu ve kalsiyum karbür kalıntıları gibi farklı atıklar tercih edilmeye başlanmıştır. Bu sayede bertaraf edilmesi zor olan atıkların değerlendirilerek kullanımının önü açılmaya çalışılmaktadır. Sıkıştırılmış kil yapıların davranışını en belirgin şekilde yansıtan mekanik özelliklerinden biri basınç dayanımıdır. Farklı oranlarda kalsiyum karbür kalıntısı ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların kullanılabilirliğini araştıran bir çalışmada, basınç dayanımının olumlu şekilde artış gösterdiği tespit edilmiştir [72]. Ayrıca stabilizasyon için taban külü, uçucu kül ve çimento kullanılan bir çalışmada basınç dayanımının önemli ölçüde iyileştiği sonucuna varılmıştır. Taban külü ve uçucu kül kullanım oranının %60-%40 şeklinde en iyi sonuçları verdiği ve çimento ilavesinin %3-%6 arasında optimum olduğu ifade edilmiştir [73].

Sıkıştırılmış kil elemanların davranışlarının iyileştirilmesinde kullanılan bir başka malzeme türü de liflerdir. Eski zamanlardan beri toprak ve kerpiç yapıların içine bitki sapı ve doğal liflerin katıldığı bilinmektedir. Bu malzemelerden bazılarını tahıl samanları, palmiye lifleri, su bitkilerinin sapları ve koyun yünleri gibi sıralamak mümkündür [74].

Son yıllarda çok yaygın olmamakla birlikte cam lifi, propilen lifler ve atık lastik gibi malzemelerin kullanımına da rastlanmaktadır [66], [75], [76]. Lif kullanımının mekanik özellikler üzerinde etkileri ile ilgili sonuçlar genellikle sınırlıdır ve net değildir. Liflerin tam olarak homojen dağılmaması ve dağılma yönüne göre de davranışın değiştiği bilinmektedir. Çimento ve atık yün ile stabilize edilmiş sıkıştırılmış kil elemanların kırılma enerjileri üzerine yapılan bir çalışmada, çimento kullanımının kırılma enerjisini arttırdığı ancak lif eklenmesinin düşürdüğü sonucuna varılmıştır. Çimento ve lifin birlikte kullanılması durumunda belirli oranlara kadar basınç dayanımının arttığı görülmüştür [77]. Bambu ve hindistancevizi lifi ile güçlendirilmiş sıkıştırılmış kil elemanların eğilme dayanımında artış olduğu ve bu liflerin kullanımının uygun olduğu tespit edilmiştir [78]. Zamanian ve diğ. [79] endüstriyel bir atık olan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve atık lastik liflerinin sıkıştırılmış kil duvarlarda, çimento stabilizasyonuna bir alternatif olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Yüksek fırın cürufunun alkali aktivasyonu için sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi kullanarak farklı miktarda NaOH içeren karışımlar hazırlamışlardır. Numunelerin basınç ve çekme dayanımlarını incelemişler ve alkali aktivasyonlu yüksek fırın cürufu içeren karışımların performanslarında iyileşmeler olduğunu tespit etmişlerdir. Özellikle atık lastik liflerinin eklenmesiyle de çekme dayanımında önemli artışların olduğunu belirtmişlerdir. Atık lastik kullanımının sünek davranışı önemli derecede arttırmasına rağmen elastisite modülünü çok fazla etkilemediğini ifade etmişlerdir. Düzlem içi çevrimsel yük etkisindeki sıkıştırılmış kil duvarların tekstil takviyeli harçlarla güçlendirilmesi üzerine yapılan bir çalışmada [80], daha önce hasar görmüş ve güçlendirilmiş bir duvar üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarına göre kırılma biçimi, yerdeğiştirmeler, rijitlik azalması ve enerji tüketme kapasitesi değerleri açısından tekstil harcı ile güçlendirilme yapılmasının olumlu etkiler ortaya koyduğunu belirtilmiştir.

Sıkıştırılmış kil elemanların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde birçok yapı malzemesinde de olduğu gibi basınç dayanımı önemli bir rol oynamaktadır. Genel olarak yığma yapılarda eksenel bir yük altında davranış sergileyen bu elemanlar için belki de en önemli mekanik özelliğin basınç dayanımı olduğu düşünülebilir. Basınç dayanımının belirlenmesinde tek eksenli olarak yapılan testlerde genellikle $\frac{1}{2}$ en boy oranına sahip silindirik numuneler kullanılırken, küp numunelerin kullanımına da rastlanmaktadır [81]–[84]. Basınç dayanımı testleri yapılırken malzemelerin elastisite modüllerini de hesaplamak mümkündür. Gerilme-gerinim eğrileri kullanılarak elastisite modülü

hesaplanabilmektedir [60], [73], [76], [85], [86]. Basınç dayanımında olduğu gibi elastisite modülünü de iyileştirmenin en yaygın yolu çimento kullanmaktır. Çimento ile stabilize edilmiş sıkıştırılmış kil elemanlar üzerinde yapılan çalışmalara göre %2-%10 arasında çimento kullanımıyla 250-750 MPa aralığında elastisite modülü değerleri elde etmek mümkündür. Buda stabilize edilmeyen elemanlara göre yaklaşık olarak 150%-500% aralığında bir iyileşme elde etmektir [60], [66], [76], [86], [87]. Sıkıştırılmış kil yapılar için basit bir gerilme-gerinim modeli geliştirmeyi hedefleyen bir çalışmada [88], beton ve betonarme yapılara yönelik bazı gerilme-gerinim ilişkilerinden de faydalanılarak bir model önerilmiştir. Önerilen modelin doğruluğu kontrol edilerek, uygulanması için yerine getirilmesi gereken tek koşulun nem içeriği olduğu ve sıkıştırılmış kil elemanların kuru durumda olması gerektiği belirtilmiştir. Islak durumdaki numunelerin davranışlarına yönelik bir ölçüm önerisi verilmemektedir. Yapılan bir dizi çalışma sonucunda önerilen modelin kuru haldeki stabilize edilmemiş ve stabilize edilmiş tüm sıkıştırılmış kil elemanlar üzerinde kullanılabileceği ifade edilmiştir. Avila ve diğ. [89] yaptıkları çalışmada, çatlak oluşumunun ve yayılmasının tarihi sıkıştırılmış toprak binaların sismik davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Elhamra'daki Muhammed Kulesi'nin sonlu elemanlar modelini oluşturan araştırmacılar, yapının mevcut çatlaklı ve çatlaksız halinin yapısal değerlendirmesini yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, çatlakların modele dahil edilmesinin binanın yapısal davranışını önemli ölçüde etkilediğini, gerilme dağılımını değiştirdiğini ve yük taşıma kapasitesini azalttığını tespit etmişlerdir

Sıkıştırılmış kil elemanların eğilme ve çekme dayanımlarının çok düşük olduğu bilinen bir gerçektir. Bu sebeple eğilme ve çekme özellikleri üzerine tasarlanarak kullanılmamaları gerekmektedir [65]. Zayıf gerilme davranışı yüzünden her ne kadar çevreci bir üretim yöntemi olsa da deprem bölgelerinde kullanılmaları önerilmemektedir [90], [91]. Eğilme ve çekme dayanımları lif kullanımı ile iyileştirilebilmektedir. Ancak lif miktarındaki artış basınç dayanımını azaltmaktadır. Lif kullanımını çimento ile dengelemek iyi bir sonuç vermektedir [76], [92]. Doğal ve sentetik lif kullanımı ile ilgili yapılmış farklı stabilizasyon çalışmaları mevcuttur [60], [65], [66], [74], [76], [87]. Avusturalya da yapılacak toprak yapıların kılavuzuna göre, lif kullanımını için optimumum likit limit değerlerinin 30-50 aralığında ve plastisite indisinin ise 15-35 aralığında olması önerilmektedir [93].

Sıkıştırılmış kil duvarlar ile ilgili yapılan çalışmaların genellikle boşluksuz ve tek katlı yapılar üzerine olduğunu ve açıklıklara sahip yapılarla ilgili çalışmaların çok az sayıda

olduğunu ifade eden bir çalışmada [94], uzunluğu 5,95 m, yüksekliği 6,20 m ve kalınlığı 0,65 m olan, her iki katta da açıklıkları bulunan, tam ölçekli iki katlı sıkıştırılmış toprak duvarların çevrimsel yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Tamir edilebilir seviyede hasara uğratılan duvar, çelik plakalar ile güçlendirilerek tekrar test edilmiştir. Onarılan ve güçlendirilen duvar yeniden test edildiğinde, rijitliğinin arttığını veya en azından eski haline döndüğü tespit edilmiştir. Ayrıca yük taşıma kapasitesinin güçlendirme öncesine kıyasla %208 oranında artmasının, çelik plakalarla yapılan güçlendirmenin olumlu sonuçlar verdiğini gösterdiğini ifade edilmiştir. Sıkıştırılmış kil duvarlarda bırakılacak olan kapı pencere boşluklarının yapısal davranışa etkisi üzerine yapılan bir çalışmada [95], farklı geometrik şekillerde boşluklar bırakılarak duvarın davranışı belirlenmiştir. Dikdörtgen şeklindeki açıklıkların, yarım daire açıklıklara göre duvarı daha zayıf hale getirdiği tespit edilmiştir. Yarım daire şeklinde (Kemer Tipi) boşluk bırakılan duvarların, dikdörtgen duvarlara kıyasla daha sağlam olduğu ve boşluk bırakıldıktan sonra güçlendirilme ihtiyacı olmadığı ifade edilmiştir. Ayrıca yarım daire şeklinde boşluk bırakılan duvar ile parabolik şekle sahip boşluk bırakılan duvar karşılaştırmalı olarak incelenmiş olup, parabolik boşluk bırakılan duvarın daha fazla yük taşısa da sünek davranış gösteremediği görülmüştür. Çalışma sonucunda dikdörtgen boşluk bırakılacaksa betonarme ya da prefabrik lentolar ile güçlendirilmesi gerektiği ve bu şekilde kullanımının uygun olacağı belirtilmiştir.

Sıkıştırılmış kil elemanların mekanik özelliklerinin yanında durabilite özelliklerinin de iyileştirilmesi, uzun ömürlülüğü açısından önem arz etmektedir. Özellikle yağmur gibi dış etkilerden oldukça etkilenmektedirler. Rüzgâr ile gelen yağmur, sıkıştırılmış kilin yüzeyini aşındırarak ömrünü azaltmaktadır. Erozyona karşı oldukça hassas olan bu yapı elemanlarının hava ve çevre koşullarından korunması gerekmektedir. Su yalıtımı için stabilize etmek ya da su ile temas etmelerini engellemek buna çözüm olabilir [63], [96]–[98]. Ayrıca çimento stabilizasyonun erozyona karşı bir miktar direnç gösterdiği yapılan çalışmalarla birlikte tespit edilmiştir [63], [93], [99]. Çalışmalarda genellikle Yeni Zelanda standartlarına uygun olarak hazırlanan erozyon testi yöntemleri kullanılmaktadır. Püskürtme veya damlama yöntemiyle aşındırma genellikle tercih edilen, yüzey bozulmalarının tespit edildiği iki yöntemdir. Bui ve arkadaşları [100], nemli bir karasal iklimde 20 yıl doğal etkilere maruz bıraktıkları stabilize edilmiş ve edilmemiş sıkıştırılmış kil elemanların dayanıklılığını inceledikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. 20 yılın sonunda aşınma değerlerini ölçtükleri elemanlarının hiçbirinde yıkılma söz

konusu olmamıştır. İnceledikleri sıkıştırılmış toprak elemanlarda ortalama aşınma derinliğinin yaklaşık olarak 6,4 mm olduğunu tespit etmişler ve stabilize edilmemiş duvarlarda en az 60 yıldan daha uzun kullanım ömrünün olabileceğini düşünmektedirler. Bu çalışmanın sonuçları bozulmadan günümüze kadar gelen sıkıştırılmış kil yapıların uzun ömürlülüğünü kanıtlar niteliktedir. Yapılan 16 yıllık bir başka çalışmada [101], yıllık ortalama 1174 mm yağış alan Kuzeydoğu Amerika Birleşik Devletleri'nin ılıman ikliminde inşa edilen, stabilize edilmemiş sıkıştırılmış kil elemanların hava etkisiyle aşınma davranışı açıklanmaktadır. Yoğun hava etkilerine maruz kalan duvarlarda yıllık 3,5 mm aşınma, orta düzeyde etkiye maruz kalan duvarlarda yıllık 1,5 mm aşınma ve düşük etkiye maruz kalan duvarlarda yıllık 0,5 mm aşınma meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkarak ortalama kalınlığı 300 mm olduğu varsayılan sıkıştırılmış kil duvarlara yaklaşık olarak en az 37 en çok 75 yıl ömür biçilmiştir.

Sıkıştırılmış kil elemanlar, geleneksel beton ve tuğlaya göre daha iyi ısı yalıtımı performansı göstermektedir. Stabilize edilmemiş olsalar bile kabul edilebilir bir aralıkta termal iletkenlik değerlerine sahiptirler [102]–[104]. Bu sebeple genel olarak mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Termal iletkenlik özelliklerini iyileştirmek için sınırlıda olsa çalışmalar yapılmaktadır [105]–[109]. Termal iletkenliğin yanında, sıkıştırılmış kil elemanların akustik performansı da oldukça yüksektir. Bu alanda da yeterli davranışı gösterdiği için konuyla ilgili çok fazla spesifik çalışma bulunmamaktadır. Yapılan az sayıdaki çalışma, diğer yapı elemanlarına kıyasla daha iyi performans gösterdiklerini ortaya koymaktadır [54], [110]–[114].

2. MATERYAL VE METOD

2.1. MATERYAL

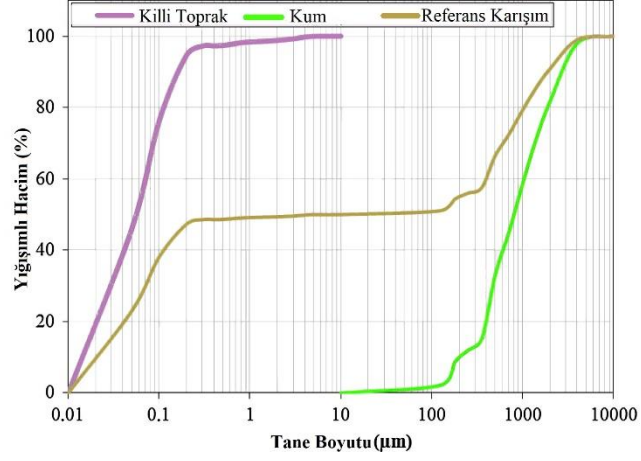
Sıkıştırılmış kil duvarların uzun ömürlü ve dayanıklı olması için çeşitli malzemeler ile stabilize edilmeleri son derece önemlidir. Sıkıştırılmış kil duvarların mekanik özelliklerinin ve durabilite özelliklerinin stabilize edilmesi için birçok farklı malzeme kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan tüm malzemeler bu başlık altında verilmektedir.

2.1.1. Killi Toprak ve Kum

Sıkıştırılmış kil duvarların üretiminde, çeşitli kil içeriğine sahip olan topraklar hammadde olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Düzce bölgesinden temin edilen kil, silt ve kum karışımından oluşan maksimum tane boyutu 4 mm olan killi toprak kullanılmıştır (Şekil 2.1a). Ayrıca karışımlarda kilin büzülmesinden dolayı oluşabilecek rötre çatlaklarının önüne geçebilmek için 4 mm tane boyutuna sahip agrega (sıva kumu), tüm karışımlarda %50 kil/%50 agrega olacak şekilde karıştırılarak kullanılmıştır (Şekil 2.1b). Kullanılan malzemelere ve karışıma ait tane boyut analizi Şekil 2.2’de verilmektedir.



Şekil 2.1. (a) Çalışmada kullanılan killi toprak, (b) agrega.



Şekil 2.2. Malzemelerin tane boyut analizi.

2.1.2. Çimento

Sıkıştırılmış kil duvarların stabilizasyonu için CEM I 42.5 R tipi Portland Çimentosu kullanılmıştır (Şekil 2.3). Çimentoya ait kimyasal özellikler Çizelge 2-1’de verilmektedir.



Şekil 2.3. CEM I 42,5R Portland Çimentosu.

Çizelge 2-1. Çimentoya ait kimyasal içerikler.

Kimyasal Bileşen	İçerik (%)
SiO ₂	18,95
Fe ₂ O ₃	4,07
Al ₂ O ₃	5,32
CaO	64,72
MgO	1,35
Na ₂ O	0,16
K ₂ O	0,51
SO ₃	2,90

2.1.3. Kireç

Sıkıştırılmış kil duvarların stabilizasyonu için kullanılan bir diğer malzeme de sönmüş kireçtir (Şekil 2.4). Kirece ait kimyasal özellikler Çizelge 2-2’de verilmektedir.



Şekil 2.4. Sönmüş kireç.

Çizelge 2-2. Sönmüş kirece ait kimyasal içerikler.

Kimyasal Bileşen	İçerik (%)
Ca(OH) ₂	Min. 83%
CaO+MgO	Min. 90%
MgO	Maks. 3%
H ₂ O	Maks. 2%
SO ₃	Maks. 2%
R ₂ O ₃	Maks. 1,5%

2.1.4. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Farklı malzemeler kullanılarak stabilize edilmeye çalışılan sıkıştırılmış kil duvarların stabilizasyonu için kullanılan bir diğer malzeme de öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufudur (ÖGYFC). Bu sayede endüstriyel bir atık değerlendirilmiş ve çevreye katkı sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıca yüksek fırın cürufunun aktive edilebilmesi için, yüksek fırın cürufu içeren karışımlarda su yerine 8 mol sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi kullanılmıştır. Çevre dostu üretimi desteklemek amacıyla NaOH kullanımı 8 mol ile sınırlandırılmıştır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufuna ait kimyasal özellikler Çizelge 2-3'de verilmektedir.



Şekil 2.5. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu.

Çizelge 2-3. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufuna ait kimyasal içerikler.

Kimyasal Bileşen	İçerik (%)
SiO ₂	40,52
Fe ₂ O ₃	1,10
Al ₂ O ₃	14,59
CaO	34,18
MgO	7,29
Na ₂ O	0,58
K ₂ O	1,10
SO ₃	0,16

2.1.5. Çinko Stearat

Sıkıştırılmış kil duvarların durabilite özelliklerini iyileştirmek, uzun ömürlü kullanımlarını sağlamak için önemli bir stabilizasyon yöntemidir. Bu sayede, özellikle suya olan hassasiyetleri giderilmeye çalışılarak, uzun ömürlü kullanım sağlanması amaçlanmaktadır. Bu amaçla, bazı karışımlarda su itici özelliği bulunan çinko stearat (Şekil 2.6) stabilizasyon için kullanılmıştır. Çinko stearata ait bazı özellikler Çizelge 2-4'te verilmektedir.



Şekil 2.6. Çinko Stearat.

Çizelge 2-4. Çinko stearat'a ait bazı özellikler.

Özellikler	
pH	6,5-7,5
Yoğunluk (g/cc)	1,095
Safılık Derecesi (%)	98,99
Erime Sıcaklığı (°C)	118-128
Kütle Yoğunluğu (g/L)	110-360
Ayrışma Sıcaklığı (°C)	>200

2.2. METOD

Sıkıştırılmış kil duvarların stabilizasyonunda kullanılan malzemelerin, mekanik ve durabilite özellikleri üzerine etkileri ve yapısal davranışa katkılarının incelendiği bu çalışmada, kullanılan malzemeler, karışım oranları, numune üretim aşamaları ve üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylere ait detaylar bu bölümde verilmektedir.

2.2.1. Numune Üretim Aşamaları ve Karışım Oranları

Deneylerde kullanılan bütün karışımlar, meydana gelebilecek büzülme çatlaklarının önüne geçebilmek adına 1/1 toprak ve kum oranı sabit tutularak üretilmiştir. Karışımlar hazırlanırken, doygun kuru yüzeyli kum ve killi toprak 5 dakika boyunca homojen bir kuru karışım elde edilene kadar el ile karıştırılmıştır. Daha sonra stabilizasyon malzemeleri eklenerek 5 dakika daha karıştırılmıştır. Son olarak suyu eklenen karışım homojen hale gelene kadar (yaklaşık 15 dakika) karıştırılmaya devam edilmiştir. Hazırlanan karışımlar havalı tokmak yardımıyla kalıplara yerleştirilmiştir. Karışımlara ait tanımlamalar Çizelge 2-5’de ve karışım oranları Çizelge 2-6’da verilmektedir. Karışım hazırlanmasına ait görseller Şekil 2.7’de verilmektedir.

Çizelge 2-5. Numune Tanımlamaları.

Numune Kodu	Numune Açıklaması
REF	Referans Karışım (Stabilize Edilmemiş)
5CSRE	%5 Çimento Stabilizasyonu
7.5CSRE	%7,5 Çimento Stabilizasyonu
10CSRE	%10 Çimento Stabilizasyonu
2LSRE	%2 Kireç Stabilizasyonu
4LSRE	%4 Kireç Stabilizasyonu
6LSRE	%6 Kireç Stabilizasyonu
5BFSRE	%5 Yüksek Fırın Cürüfu Stabilizasyonu
7.5BFSRE	%7,5 Yüksek Fırın Cürüfu Stabilizasyonu
10BFSRE	%10 Yüksek Fırın Cürüfu Stabilizasyonu
REFZS0.5RE	%0,5 Çinko Stearat Stabilizasyonu
REFZS1RE	%1 Çinko Stearat Stabilizasyonu
10C0.5ZSRE	%10 Çimento+%0,5 Çinko Stearat Stabilizasyonu
10C1ZSRE	%10 Çimento+%1 Çinko Stearat Stabilizasyonu
10BF0.5ZSRE	%10 Yüksek Fırın Cürufu+%0,5 Çinko Stearat Stabilizasyonu
10BF1ZSRE	%10 Yüksek Fırın Cürufu +%1 Çinko Stearat Stabilizasyonu

Çizelge 2-6. Karışım oranları.

Karışım	Toprak / Kum (0-4mm) (Oran)	Su (%)	8 Mol NaOH Çözeltisi (%)	Çimento (%)	Kireç (%)	Yüksek Fırın Cürufu (%)	Çinko Stearat (%)
REF	1/1	12	-	-	-	-	-
5CSRE	1/1	12	-	5	-	-	-
7.5CSRE	1/1	12	-	7.5	-	-	-
10CSRE	1/1	12	-	10	-	-	-
2LSRE	1/1	12	-	-	2	-	-
4LSRE	1/1	12	-	-	4	-	-
6LSRE	1/1	12	-	-	6	-	-
5BFSRE	1/1	-	12	-	-	5	-
7.5BFSRE	1/1	-	12	-	-	7.5	-
10BFSRE	1/1	-	12	-	-	10	-
REFZS0.5RE	1/1	12	-	-	-	-	0,5
REFZS1RE	1/1	12	-	-	-	-	1
10C0.5ZSRE	1/1	12	-	10	-	-	0,5
10C1ZSRE	1/1	12	-	10	-	-	1
10BF0.5ZSRE	1/1	-	12	-	-	10	0,5
10BF1ZSRE	1/1	-	12	-	-	10	1



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2.7. Karışım hazırlama aşamaları, (a) kuru karışımın karıştırılması, (b) karışım suyunun eklenmesi, (c) karışımın homojen hale gelene kadar karıştırılması, (d) kıvam kontrolü.

2.2.2. Malzeme Deneyleri

2.2.2.1. Proktor Deneyi

Referans karışımın optimum su içeriğinin belirlenmesi için TS 1900-1 [115] standardına

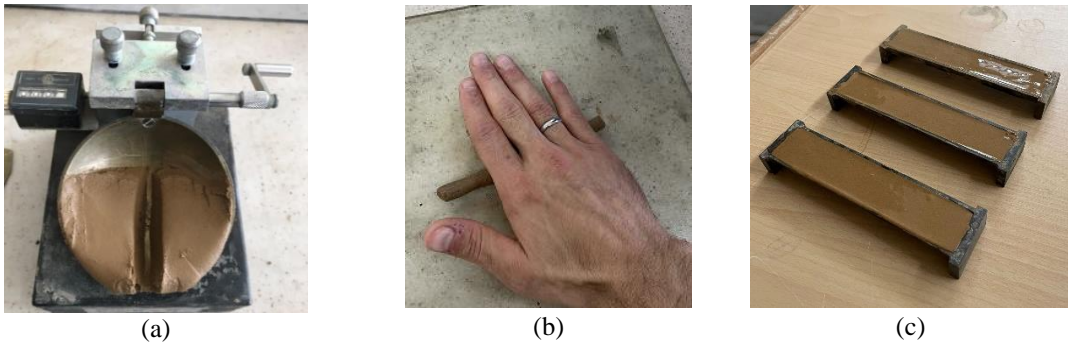
uygun şekilde standart proktor deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.8). Etüv kurusu halde bulunan bir miktar malzeme 4 mm elekten geçirilerek %8'i oranında su ile karıştırılmıştır. Daha sonra proktor kalıbına yerleştirilerek, standart proktor çekici ile her seferinde 25 düşüş olacak şekilde 3 eşit tabakada sıkıştırılmıştır. Doldurulmadan önce hassas terazide tartılan boş proktor kalıbı, malzeme doldurulduktan sonra tekrar tartılmıştır. Karışımdan bir miktar su içeriğinin belirlenmesi için ayrılmış ve tüm bu işlemler su içeriği belirli miktarlarda artırılarak 7 kere tekrar edilmiştir. Deneyler sonunda optimum su içeriği belirlenmiştir.



Şekil 2.8. Standart Proktor Deneyi.

2.2.2.2. Atterberg Limit Deneyleri

Kullanılan killi toprağın fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla TS 1900-1 standardına uygun olarak likit limit (Şekil 2.9a), plastik limit (Şekil 2.9b) ve rötre limit (Şekil 2.9c) deneyleri yapılmıştır.



Şekil 2.9. Likit limit deneyi (a), Plastik limit deneyi (b), Rötire limit deneyi(c).

2.2.3. Sertleşmiş Numune Deneyleri

Sertleşmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler için, basınç dayanımı deneyi sonuçları belirleyici olmuştur. Basınç dayanımı deneyi sonuçlarına göre, performansı

uygun olan seriler belirlenerek, diğ er mekanik ve durabilite testleri sadece bu numuneler üzerinde gerç ekleştirilmiştir. Sertleşmiş numuneler, 28 gün boyunca laboratuvar koşullarında tutulmuş ve deneyler yapılmadan önce 105 °C sıcaklıktaki etüvde kurutulmuştur.

2.2.3.1. Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Sıkıştırılmış kil elemanların birim hacim ağırlık değerlerinin belirlenebilmesinde, basınç dayanımı testleri için üretilen 10x20 cm boyutlarında ki silindir numuneler kullanılmıştır. Numunelerin ıslak birim hacim ağırlıkları, üretim aşamasında belirlenen ıslak ağırlıklarının hacmine bölünmesi yöntemiyle, kuru birim hacim ağırlıkları ise etüv kurusu hale getirilmiş numunelerin ağırlıklarının, hacmine bölünmesiyle belirlenmiştir.

2.2.3.2. Basınç Dayanımı Deneyi

Sıkıştırılmış kil elemanların basınç dayanımı davranışlarının belirlenmesi ve karşılaştırılması için 10x20 cm boyutlarında silindir numuneler kalıplara sıkıştırılarak üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde hidrolik pres yardımıyla basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Silindir numunelerin üretimi ve basınç dayanımı testi sırasındaki görüntüleri Şekil 2.10'da verilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2.10. Silindir numunelerin sıkıştırma işlemi (a), Basınç dayanımı testi (b).

2.2.3.3. Elastisite Modülünün Belirlenmesi

Basınç dayanımı sonucunda elde edilen veriler kullanılarak, mekanik testlere devam edilecek seriler belirlenmiştir. Bu serilerin elastisite modülünün belirlenmesi için 15x30 cm boyutlarında silindir numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin enine ve boyuna deformasyonları, deformasyon ölçerler (LVDT) yardımıyla basınç dayanımı testi yapılarak ölçülmüştür. Maksimum yükün %30'una kadar yükleme yapılarak elastisite modülü belirlenmiştir. Elastisite modülünün belirlenmesi için kullanılan deney düzeneği

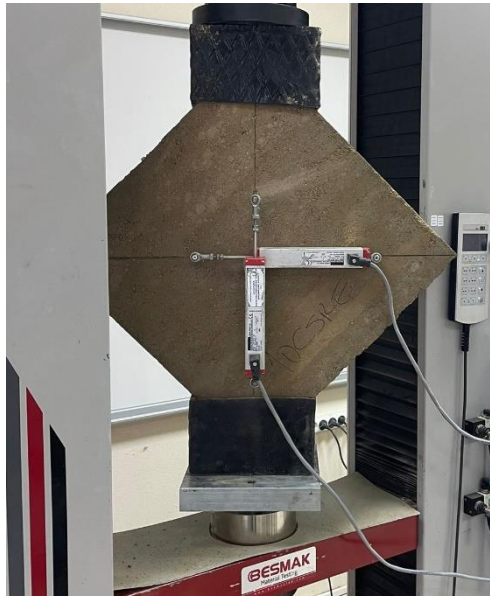
Şekil 2.11’de verilmektedir.



Şekil 2.11. Elastisite modülü test düzeneği.

2.2.3.4. Kayma Modülünün Belirlenmesi (Diagonal Tension Test)

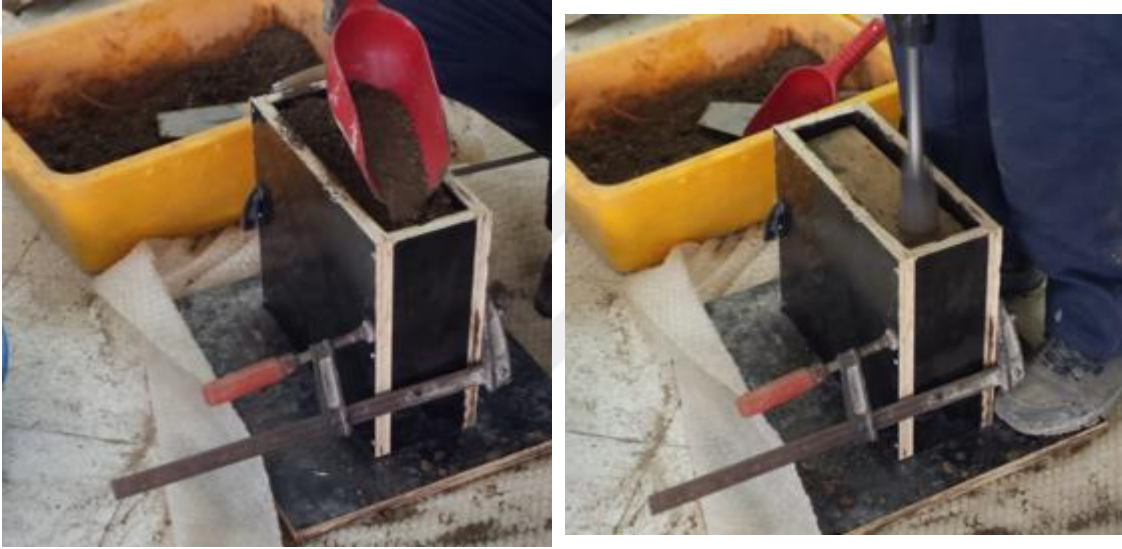
Sıkıştırılmış kil duvarların, sayısal modellerinin oluşturulmasında basınç dayanımı kadar elastisite modülü ve kayma modülünün de belirlenmesi önemlidir. Bu sebeple kayma modülünün ve kesme dayanımının belirlenmesi için ASTM E519 E519M-10 [116] standardına uygun şekilde aksel çekme testi gerçekleştirilmiştir. 50x50x10 cm boyutlarında üretilen prizmatik numuneler üzerine, standarda uygun şekilde yerleştirilen deformasyon ölçerler yardımıyla ölçümler yapılarak kayma modülü hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen teste ait düzenek Şekil 2.12’de verilmektedir.



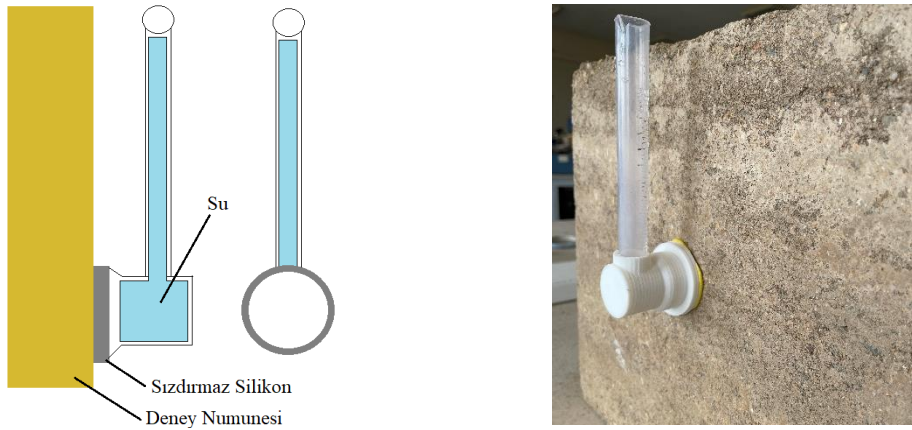
Şekil 2.12. Diagonal Tension test düzeneği.

2.2.3.5. Karsten Tüpü Deneyi

Bu testin temel amacı numunelerin su emme özelliklerini belirlemektir. Basınç dayanımı sonuçlarına göre yüksek performans gösteren seriler seçilerek, yüzey su emme değerlerini ölçmek için 30x30x10 cm boyutlarında prizmatik numuneler üretilmiştir. Prizma numune üretimlerine ait görseller Şekil 2.13'te verilmektedir. Numunelerin su emmeleri RILEM [117] önerisi ile karsten tüpü kullanılarak belirlenmiştir. Karsten tüpleri numune yüzeylerine sızdırmaz silikon kullanılarak yapıştırılmıştır ve içi su ile doldurulmuştur. Daha sonra deney başlatılarak 5, 10, 15, 30 ve 60 dakikada bir ölçüm yapılmıştır. Yapılan ölçümlere göre toplam su emme miktarı belirlenmiştir. Karsten tüpü deneyine ait detaylar Şekil 2.14'te verilmektedir.



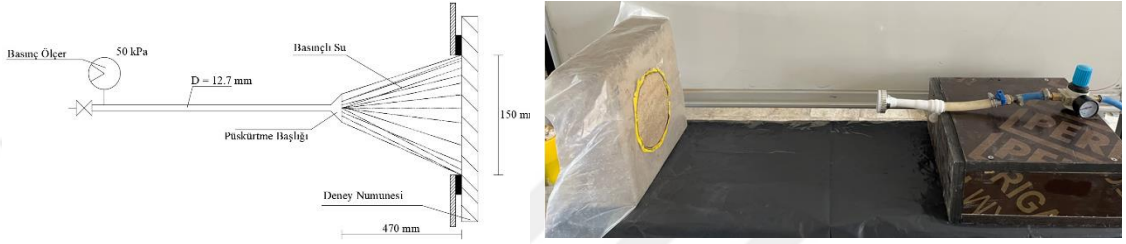
Şekil 2.13. Prizmatik Numunelerin Üretimi.



Şekil 2.14. Karsten Tüpü Deneyi.

2.2.3.6. Sprey Erozyon Deneyi

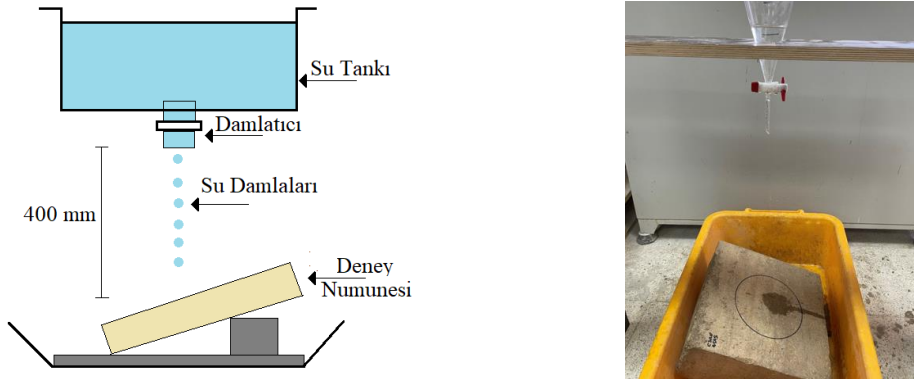
Sıkıştırılmış kil duvarların yüzeylerinin suya karşı aşınma değerlerini belirlemek durabilite özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu sebeple sprej erozyon testi NZS 4298 [70] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Erozyon derinliğini ölçebilmek için numune yüzeyine 470 mm uzaktan yaklaşık 50 kPa basınçlı su 60 dakika boyunca püskürtülmüştür. Her 15 dakikada bir ölçüm alınarak toplam aşınma derinliği tespit edilmiştir. Standarda uygun olarak hazırlanan deney düzeneğine ait detaylar Şekil 2.15'te verilmektedir.



Şekil 2.15. Sprey Erozyon Test Düzeneği.

2.2.3.7. Geelong Damla Erozyon Testi

Geelong erozyon testi, 20 ile 60 dk arasında değişen bir sürede numunelerin üzerine 100 ml su damlamasını ve bunun meydana getirdiği aşınmanın ölçülmesini içeren bir testtir. Damlalar 400 mm yükseklikten belirli bir açı ile numunelerin tam ortasına düşecek şekilde deney düzeneği kurulmuştur. Deney düzeneğine ait detaylar Şekil 2.16'da verilmektedir.

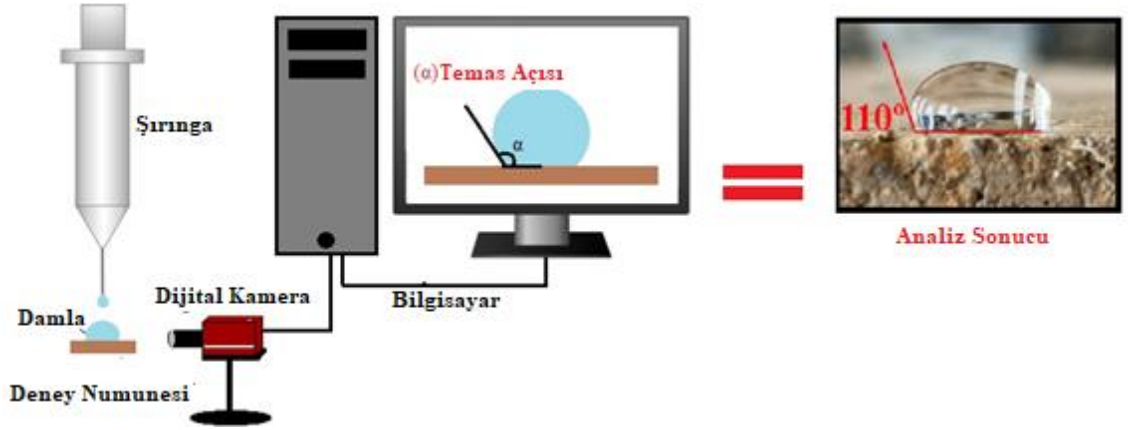


Şekil 2.16. Geelong Erozyon Test Düzeneği.

2.2.3.8. Yüzey Islanabilirlik Testi

Yüzeyin suya karşı olan direncini ölçmek için yapılan bu test, yüzeye bırakılan su damlalarının yüzey ile temasında yaptığı yatay açının ölçülmesiyle gerçekleştirilmiştir.

Ölçümler damla ile yüzeyin ilk temasından itibaren 5 saniye, 15 saniye, 2 dakika ve 10 dakika olmak üzere dört farklı sürede yapılmıştır [118]. Açı ölçümleri yüksek çözünürlüklü dijital bir kamera yardımıyla alınan görüntüler üzerinden yapılmıştır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Yüzeysel İslanabilirlik Testi.

2.2.4. Çevrimsel Yük Etkisi Altında Duvar Davranışlarının Belirlenmesi

Çalışma kapsamında, sıkıştırılmış kil duvarların çevrimsel yükler altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla 150x150x15 cm boyutlarında duvarlar üretilmiştir. Duvarların üretim aşamasında iç ölçüleri 150x150x15 cm olan özel profillerden oluşturulmuş sökülüp takılabilen bir kalıp sistemi kullanılmıştır. 75 cm yüksekliğinde iki farklı yakası bulunan kalıp sayesinde, ilk katmanlar tek yaka kullanılarak sıkıştırılmış daha sonra ikinci kalıp yakası takılarak duvarın kalan katmanlarının sıkıştırılması işlemine devam edilmiştir. Bu sayede tüm katmanların eşit ve düzgün bir şekilde sıkıştırılması sağlanmıştır. Kullanılan kalıp, üretim süreci ve bazı duvarlara ait görseller Şekil 2.18’de verilmektedir.



(a) Üretimlerde kullanılan kalıp sistemi



(b) Bıçaklı karıştırıcı yardımıyla karışımın hazırlanması



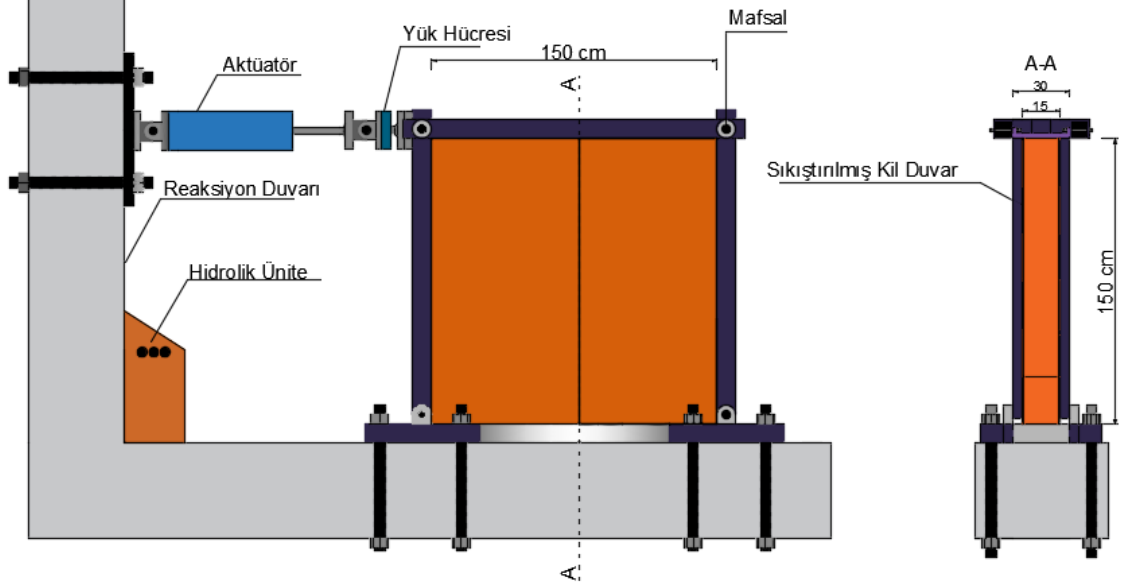
(c) Katmanların sıkıştırma işlemi



(d) Üretilen bazı duvarlar

Şekil 2.18. (a) Duvar üretiminde kullanılan kalıp tasarımı, (b, c) üretim aşamaları ve (d) üretilen bazı duvarlar.

Deneyler sonucunda elde edilen veriler ile çevrimsel yük eğrileri kullanılarak, yük taşıma kapasiteleri, enerji tüketme kapasiteleri ve yerdeğiştirme sünekliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Üretilen duvarların tamamına, çelik mafsallı bir çerçevede servo-hidrolik aktüatör yardımıyla çevrimsel yük uygulanmıştır. Mafsallı bir çelik çerçeve kullanılmasının temel amacı, uygulanan çevrimsel yük altında yatay ve düşey hatlı etkisini tamamen kaldırarak duvarın gerçek davranışını ortaya çıkarmaktır. Mafsallı çelik çerçeve, labil olduğundan ve yük taşımadığından, ölçülen tüm değerler duvarın davranışını doğru bir şekilde yansıtmaktadır. Test düzeneğinde yük 500 kN kapasiteli bir yük hücresi ile ölçülmüştür. Yüke karşılık gelen tepe yerdeğiştirmesi ise aktüatöre yerleştirilmiş 500 mm ölçüm kapasiteli bir LVDT ile ölçülmüştür. Tüm veriler bilgisayara 0.125 s aralıklarla kaydedilmiştir. Kullanılan deney düzeneğine ait detaylar Şekil 2.19'da ve yükleme çerçevesine duvarın yerleşimi Şekil 2.20'de verilmiştir.

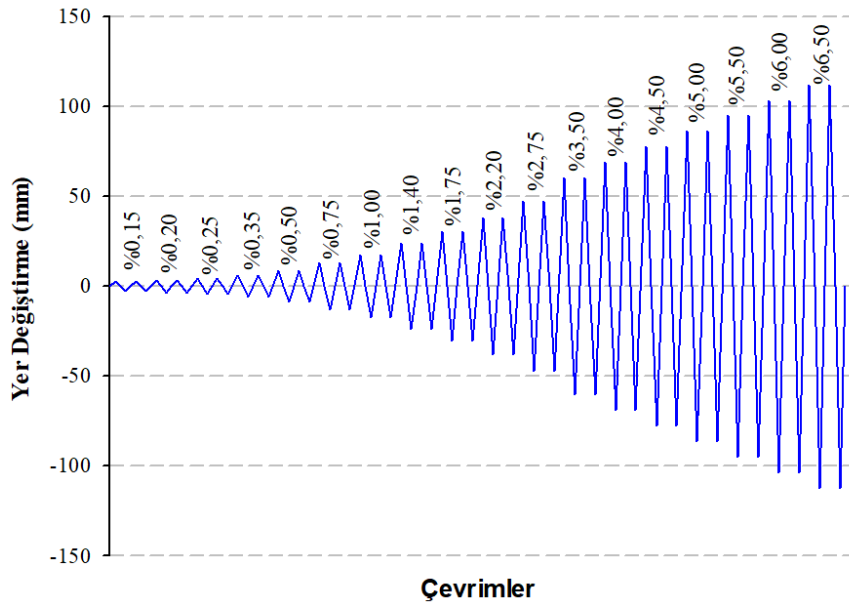


Şekil 2.19. Deney düzeneği.



Şekil 2.20. Yükleme çerçevesi ve sıkıştırılmış toprak duvar.

Üretilen duvarlara FEMA 461 [119] tarafından önerilen yükleme protokolü uygulanmıştır (Şekil 2.21). Uygulanan ötelenme oranları (δ/H) sırasıyla, %0,15, %0,20, %0,25, %0,35, %0,50, %0,75, %1,00, 1.40%, %1,75, %2,20, %2,75, %3,50, %4,00, %4,50, %5,00, %5,50, %6,00, %6,50 olarak seçilmiştir. Ötelenme oranının %3,5'dan daha fazla uygulanmasının nedeni duvarların tamamen harap olmasını görmektir. Her ötelenme oranı için yerdeğiştirme döngüsü iki kez tekrarlanmıştır.



Şekil 2.21. Yükleme protokolü.

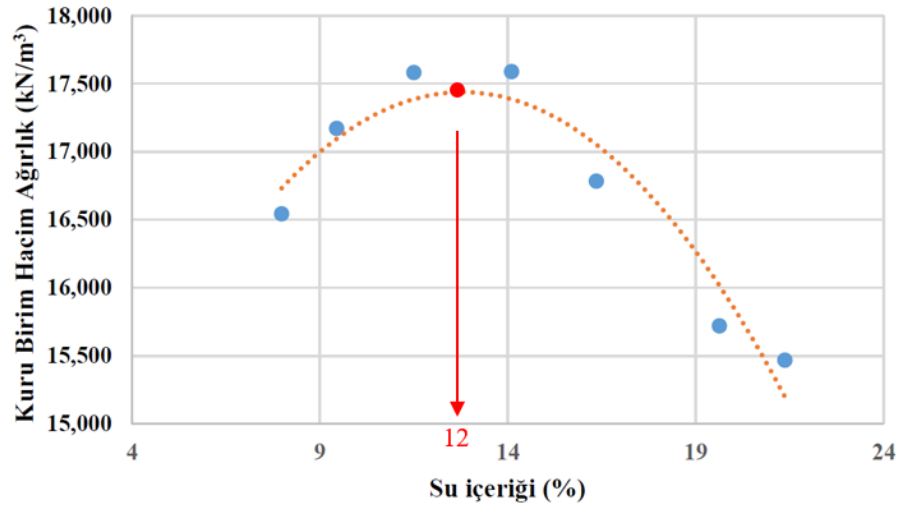
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. MALZEME DENEY SONUÇLARI

Sıkıştırılmış kil duvarların malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçları bu bölümde verilmektedir.

3.1.1. Standart Proktor Deneyi Bulguları

Karışımların optimum su içeriğinin belirlenmesi için yapılan standart proktor deney sonuçları Şekil 3.1’de verilmektedir. Şekil 3.1’e göre optimum su içeriği %12 olarak seçilmiştir.



Şekil 3.1. Standart Proktor Test Sonuçları.

Karışımların su içeriği de basınç dayanımı değerleri üzerinde oldukça etkilidir. Bu sebeple karışımdaki optimum sıkışmayı sağlamak, yüksek basınç dayanımı değerleri elde etmek için ilk yapılması gereken işlemdir. Yapılan deney sonucunda elde edilen %12 optimum su içeriği değeri tüm karışımlarda kullanılmıştır ve daha önce literatürde yapılan çalışmaların önerilerine göre doğru bir aralıkta değer tespit edildiği görülmektedir. Teknik literatürde, optimum su içeriği için yapılan çalışmalar incelendiğinde, %10-%13 aralığında su içeriğinin uygun olduğu belirtilmiştir. Bu durum, belirlenen su içeriğinin teknik literatürle uyumlu olduğunu göstermektedir [60], [61].

3.1.2. Atterberg Limitleri Deneyi Bulguları

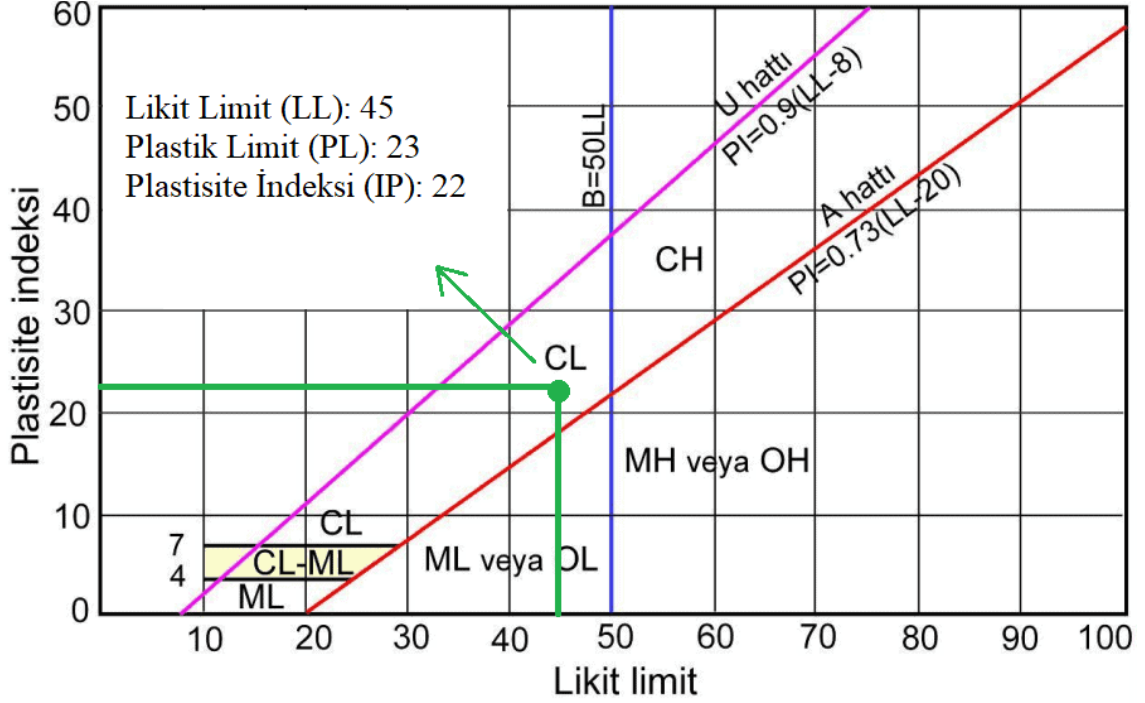
Kullanılan kilin fiziksel özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak için yapılan likit limit,

plastik limit ve rötre limit deneylerine ait sonuçlar Çizelge 3-1’de verilmiştir.

Çizelge 3-1. Limit deneyleri sonuçları.

Plastik Limit	Likit Limit	Rötre Limit	Plastisite İndisi
23	45	15	22

Çizelge 3-1 incelendiğinde, plastik limit ve likit limit deney sonuçlarına göre kullanılan kilin plastisite indisi 22 olarak hesaplanmıştır ve USCS [120] zemin sınıflandırma yöntemine göre de sınıfı CL düşük plastisiteli kil olarak belirlenmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Plastisite kartı.

Avustralya’da yapılacak toprak yapıların rehberine göre, kullanılan killi toprağın likit limit değerlerinin 30-50 aralığında ve plastisite indisinin ise 15-35 aralığında olması önerilmektedir [93]. Bu önerilere göre, elde edilen sonuçların literatür ile tutarlı olduğu görülmektedir.

3.2. SERTLEŞMİŞ NUMUNE DENEYLERİ

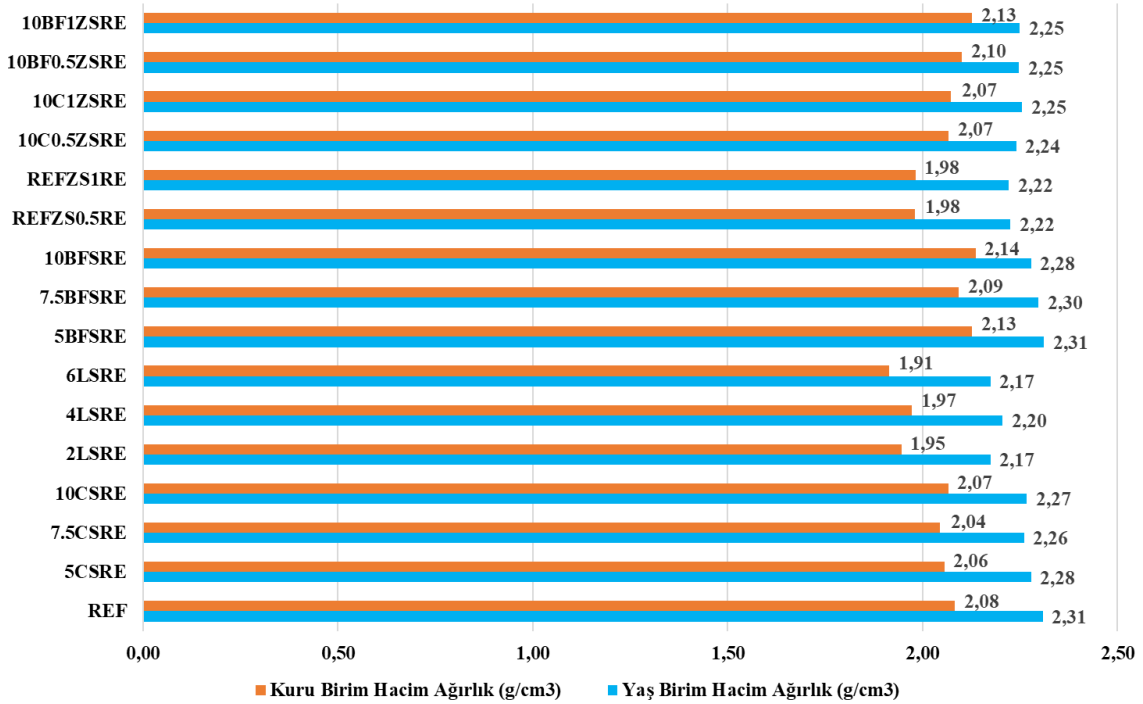
Sıkıştırılmış kil duvarların mekanik, fiziksel ve durabilite özelliklerinin belirlenmesi amacıyla üretilen sertleşmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar bu bölümde verilmektedir.

3.2.1. Birim Hacim Ağırlık Deneyi Bulguları

Sertleşmiş numunelerin birim hacim ağırlıklarının belirlenmesi amacıyla yapılan deneylere ait sonuçlar Çizelge 3-2 ve Şekil 3.3'te verilmektedir. Burada “Islak Birim Hacim Ağırlık” laboratuvar koşullarında bulunan numunenin üretim sırasında ölçülen birim hacim ağırlığını, “Kuru Birim Hacim Ağırlık” ise numunenin 105 °C etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar bekletildikten sonra belirlenen birim hacim ağırlığını ifade etmektedir.

Çizelge 3-2. Birim hacim ağırlık deneyi bulguları.

Numune Kodu	Islak Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	Kuru Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)
REF	2,31	2,08
5CSRE	2,28	2,06
7.5CSRE	2,26	2,04
10CSRE	2,27	2,07
2LSRE	2,17	1,95
4LSRE	2,20	1,97
6LSRE	2,17	1,91
5BFSRE	2,31	2,13
7.5BFSRE	2,30	2,09
10BFSRE	2,28	2,14
REFZS0.5RE	2,22	1,98
REFZS1RE	2,22	1,98
10C0.5ZSRE	2,24	2,07
10C1ZSRE	2,25	2,07
10BF0.5ZSRE	2,25	2,10
10BF1ZSRE	2,25	2,13



Şekil 3.3. Kuru ve ıslak birim hacim ağırlık değerleri.

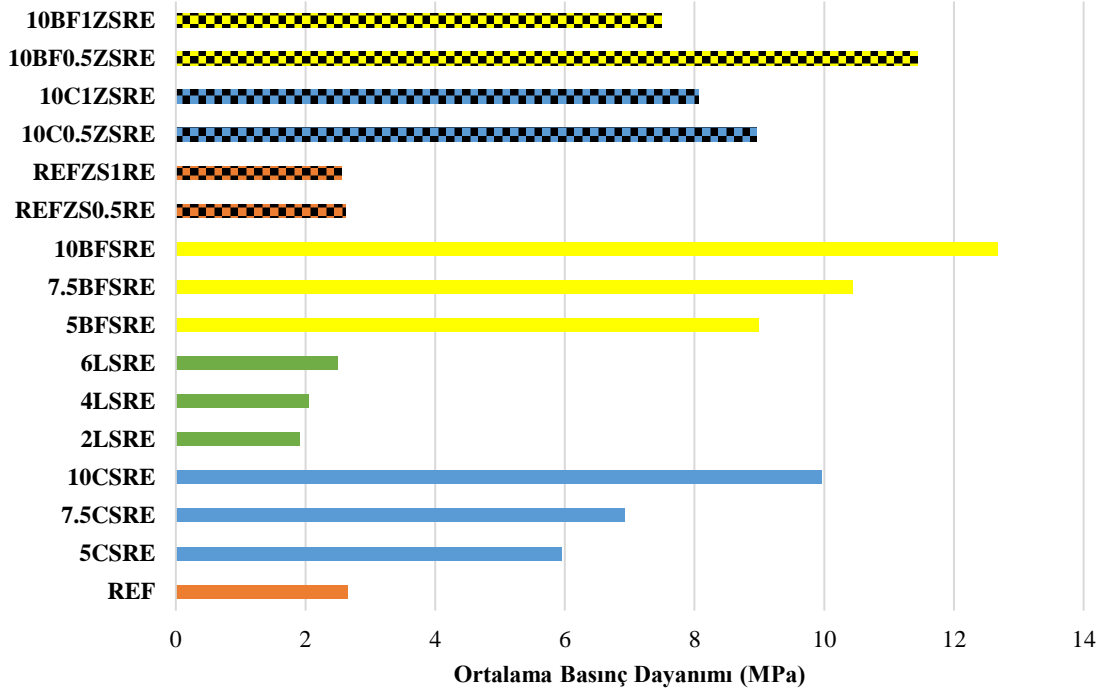
Kuru birim hacim ağırlık değerleri incelendiğinde, sıkıştırılmış kil elemanların geleneksel tuğlaya ($\sim 0,6 \text{ g/cm}^3$) kıyasla daha yoğun bir yapıda olduğu açıkça görülmektedir. Islak birim hacim ağırlık değerleri incelendiğinde, numunelerin birim hacim ağırlıklarının $2,17 - 2,31 \text{ g/cm}^3$ arasında değiştiği görülmektedir. Kuru birim hacim ağırlıklar ise $1,91 - 2,14 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. Burada en düşük kuru birim hacim ağırlık değerleri kireç stabilizasyonu olan 2LSRE, 4LSRE, 6LSRE deney numunelerinde elde edilmiştir. Bu durum kirecin yoğunluğunun çimentonun yoğunluğundan düşük olması ile açıklanabilmektedir.

3.2.2. Basınç Dayanımı Deneyi Bulguları

Sıkıştırılmış kil elemanlar üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanımı deneyi sonucunda elde edilen ortalama basınç dayanımı değerleri Çizelge 3-3 ve Şekil 3.4'te verilmektedir. Ayrıca numunelerin basınç dayanımlarındaki değişim oranlarının karşılaştırmaları Çizelge 3-4'te verilmektedir.

Çizelge 3-3. Ortalama Basınç Dayanımı Değerleri.

Numune Kodu	Basınç Dayanımı (MPa)
REF	2,65
5CSRE	5,94
7.5CSRE	6,93
10CSRE	9,95
2LSRE	1,91
4LSRE	2,05
6LSRE	2,49
5BFSRE	8,99
7.5BFSRE	10,44
10BFSRE	12,68
REFZS0.5RE	2,65
REFZS1RE	2,51
10C0.5ZSRE	8,96
10C1ZSRE	8,06
10BF0.5ZSRE	11,44
10BF1ZSRE	7,49



Şekil 3.4. Basınç dayanımı deney sonuçları.

Çizelge 3-4. Karşılaştırmalı basınç dayanımı değişimleri.

	REF	5CSRE	7.5CSRE	10CSRE	2LSRE	4LSRE	6LSRE	5BFSRE	7.5BFSRE	10BFSRE
	Basınç Dayanımı Değişiklik Oranları (%)									
REF		125,0	161,5	275,5	-27,9	-22,6	-6,0	239,2	277,4	377,7
5CSRE			16,7	67,5	-67,9	-65,5	-61,5	51,4	75,8	113,1
7.5CSRE				43,6	-72,4	-70,4	-64,1	29,7	50,7	83,0
10CSRE					-80,1	-79,4	-75,0	-9,7	4,9	27,3
2LSRE						7,3	30,3	370,7	446,6	563,9
4LSRE							21,5	338,5	409,3	517,6
6LSRE								261,0	319,3	408,4
5BFSRE									16,1	41,1
7.5BFSRE										21,5
10BFSRE										

Şekil 3.4 ve Çizelge 3-4 incelendiğinde, kireç stabilizasyonu yapılan numuneler hariç diğer tüm serilerin basınç dayanımlarının referans numuneye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Kireç içeren numunelerin basınç dayanımlarının düşük olmasının sebebi olarak, kirecin dayanım kazanabilmesi için gerekli olan CO₂ ihtiyacının karşılanamaması olduğu düşünülmektedir. Yapılan bazı çalışmalarda da yine kirecin basınç dayanımını düşürdüğünü gösteren sonuçlar elde edilmiştir [121]. Bu sebeple durabilite testlerine geçilmeden önce, basınç dayanımı düşük olan kireç stabilizasyonlu numunelere çinko stearat uygulaması yapılmaktan vazgeçilmiştir. Çimento stabilizasyonu yapılan

numuneler incelendiğinde, basınç dayanımlarının referans numuneye göre 5CSRE, 7.5CSRE ve 10CSRE numunelerinde sırasıyla %125, %161 ve %276 oranında arttığı tespit edilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda da, çimento stabilizasyonun, sıkıştırılmış kil elemanların basınç dayanımını arttırdığı ifade edilmiştir [122]. Yüksek fırın cürufu içeren numunelerin basınç dayanımlarının da referans numuneye göre arttığı tespit edilmiştir. 7.5BFSRE ve 10BFSRE numunelerinin basınç dayanımlarının, çimento içeren numunelere kıyasla daha yüksek olmasının, endüstriyel bir atık olan yüksek fırın cürufunun değerlendirilmesi anlamında önemli bir sonuç olduğu düşünülmektedir. Ayrıca tüm seriler arasında da en yüksek basınç dayanımı değeri 10BFSRE numunelerinden elde edilmiştir (12,675 MPa).

Basınç dayanımı deneyinden elde edilen sonuçlara göre, kireç stabilizasyonu yapılan seriler hariç tüm serilere %0,5 ve %1,0 oranında çinko stearat ilavesi yapılmıştır. Karışımların durabilite özelliklerini arttırması beklenen çinko stearat ilavesinin tüm serilerin basınç dayanımını bir miktar düşürdüğü tespit edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde çinko stearat ilavesinin basınç dayanımını düşürdüğü ancak durabilite özelliklerine katkı sağladığı ifade edilmektedir [123]. Basınç dayanımı testleri sonuçlarına göre, elastisite modülü, kayma modülü ve çevrimsel yük etkisi altında duvar davranışlarının belirlenmesi için yapılacak testlerin uygulanacağı seriler belirlenmiştir. Seçilen serilere ait kısaltmalar ve basınç dayanımı değerleri Çizelge 3-5'te verilmektedir.

Çizelge 3-5. Elastisite modülü, kayma modülü ve duvar deneyleri için seçilen karışımlar.

Numune Kodu	Basınç Dayanımı (MPa)
REF	2,65
10CSRE	9,95
10BFSRE	12,68
REFZS0.5RE	2,65
10C0.5ZSRE	8,96
10BF0.5ZSRE	11,44

3.2.3. Elastisite Modülü ve Kayma Modülü Deney Bulguları

Boyutları 15x30 cm olan standart silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç deneyleri sonucunda elde edilen elastisite modülü ve 50x50x10 cm boyutlarında prizmatik numuneler üzerinde gerçekleştirilen diyagonal çekme deneyleri sonucunda elde edilen kayma modülü değerleri Çizelge 3-6'te verilmektedir.

Çizelge 3-6. Elastisite modülü ve kayma modülü deney sonuçları.

Numune Kodu	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (E) (GPa)	Kayma Modülü (G) (MPa)	Kesme Dayanımı (MPa)
REF	2,65	0,72	281	0,14
REFZS0.5RE	2,65	0,66	252	0,13
10CSRE	9,95	3,92	1650	1,13
10C0.5ZSRE	8,96	3,75	1490	0,94
10BFSRE	12,68	4,48	1800	1,04
10BF0.5ZSRE	11,44	3,2	1280	1,02

Literatür incelendiğinde, sıkıştırılmış kil elemanların elastisite modülü ve kayma modülü için geniş bir aralık olduğu görülmektedir. Numune üretim koşulları ve test prosedürü bu aralığın değişmesindeki en önemli etkenlerdir [83], [124]. Referans numuneler için elastisite modülü aralığı yaklaşık olarak 0,060-1,00 GPa arasında değişmektedir [60], [82], [83], [124], [125]. Elastisite modülü deney sonuçlarına göre, referans numunelere ait değerlerin literatürde belirtilen aralıkta ve yapılan diğer çalışmalarda uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Diğer serilerde ise basınç dayanımının da artmasıyla birlikte elastisite modülünde beklenildiği gibi bir artış görülmüştür. Elastisite modülü ve kayma modülü ile ilgili yapılan çalışma sayısı sınırlı olup, elde edilen sonuçların bu çalışmalarla tutarlı olduğu görülmektedir [124], [126]. Kayma modülü sonuçları ile ilgili olarak literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, kayma modülü değerlerinin yaklaşık olarak 0,020-3,50 GPa aralığında değiştiği görülmektedir. Değerlerin bu kadar geniş bir aralıkta değişiklik göstermesinin sebebi olarak uygulanan test yöntemi, kullanılan ölçüm yöntemi ve üretim koşulları gösterilmektedir [127], [128]. Kesme dayanımı değerlerine göre, diğer mekanik özelliklerde olduğu gibi çimentonun ve yüksek fırın cürufunun davranışı iyileştirdiği görülmektedir. Bu değerlerin literatürde yapılan çalışma sonuçları ile uyumlu olması test yönteminin ve ölçüm tekniğinin uygun olduğunu göstermektedir.

Çizelge 3-7. Karşılaştırmalı elastisite modülü değişimleri.

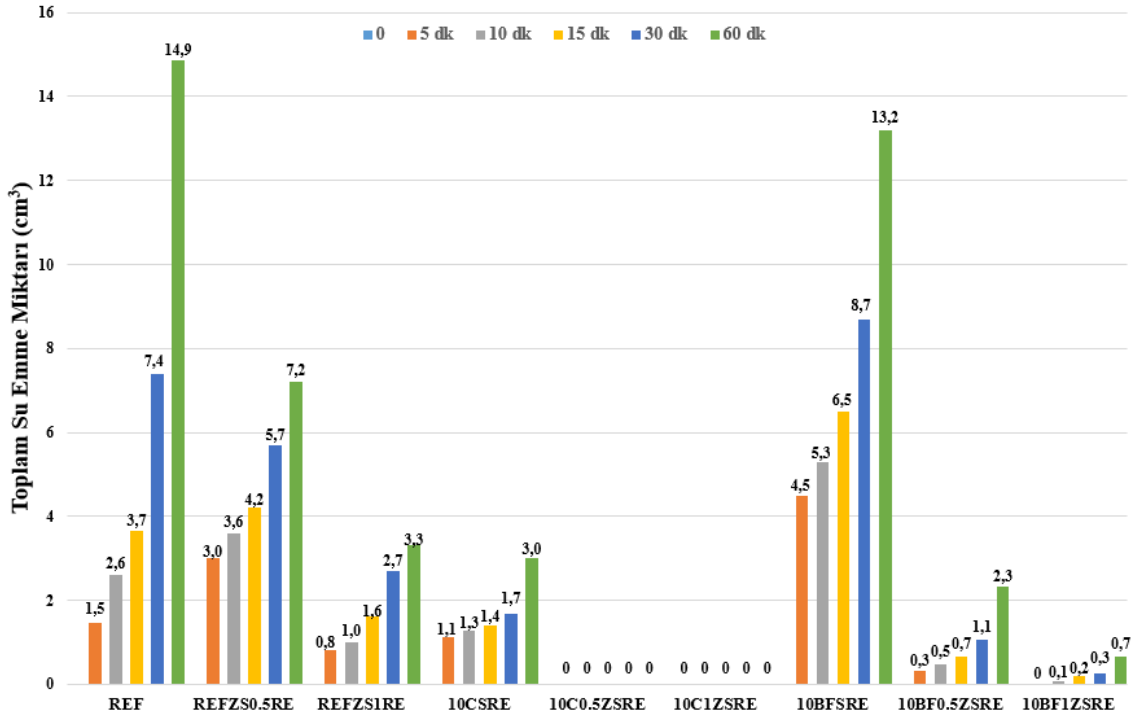
	REF	REF0.5ZSRE	10CSRE	10C0.5ZSRE	10BFSRE	10BF0.5ZSRE
	Elastisite Modülü Değişiklik Oranları (%)					
REF		-8,3	448,3	424,3	526,6	347,4
REFZS0.5RE			497,6	471,5	582,9	387,6
10CSRE				-4,5	14,3	-18,4
10C0.5ZSRE					19,5	-14,7
10BFSRE						-28,6
10BF0.5ZSRE						

Çizelge 3-7’de verilen elastisite modülü değerlerinin referans numunelere kıyasla değişimleri incelendiğinde sırasıyla %448,3 (10CSRE), %424,3 (10C0.5ZSRE), %526,6 (10BFSRE) ve %347,4 (10BF0.5ZSRE) oranlarında artış olduğu tespit edilmiştir. Tüm

seriler karşılaştırılmalı olarak incelendiğinde, çimento ve yüksek fırın cürufu stabilizasyonunun elastisite modülü üzerindeki olumlu etkileri görülebilmektedir.

3.2.4. Karsten Tüpü Deneyi Bulguları

Numunelere ait su emme miktarının belirlenmesi amacıyla yapılan Karsten Tüpü deneyine ait sonuçlar Şekil 3.5'te verilmektedir.



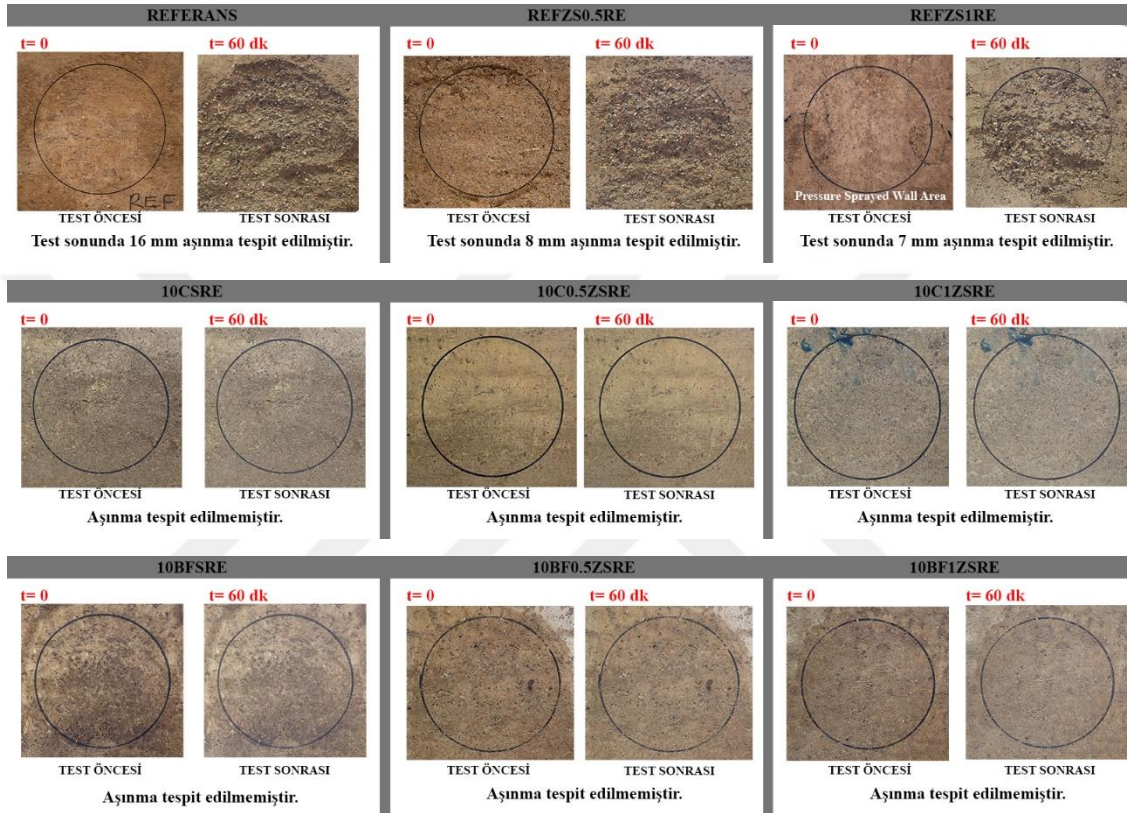
Şekil 3.5. Toplam su emme miktarı (cm³).

Şekil 3.5 incelendiğinde, toplam su emme miktarına göre en fazla suyu referans numunenin emdiği tespit edilmiştir (14.9 cm³). Referans serilere yapılan çinko stearat ilavesinin, toplam su emme miktarını sırasıyla %52 (REFZS0.5RE) ve %78 (REFZS1RE) oranında düşürdüğü görülmektedir. Karsten tüpü deneyi, su emme miktarının ölçülmesi için kullanılabilir gibi bir yüzeyin su itici olup olmadığını belirlemek amacıyla da kullanılabilir. Buna göre su emme değeri sıfır olduğunda yüzeyin su itici olduğu ifade edilmektedir [118]. Su emme oranları referans numunelere kıyasla daha düşük olan 10CSRE serisine yapılan çinko stearat ilavesi, 10C0.5ZSRE ve 10C1ZSRE serilerinin su emmesini engelleyerek yüzeylerine su itici özelliği kazandırmıştır. Çimento stabilizasyonu sayesinde daha düzgün yüzeye sahip olan bu serilerin, çinko stearat ilavesi ile de durabilite özelliklerine katkı sağlanmıştır. Yüksek fırın cürufu içeren numuneler incelendiğinde, 10BFSRE serisine yapılan çinko stearat ilavesinin, su emme miktarını

sırasıyla %82 ve %94 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir. Ancak yüzey su itici özellik kazanmamıştır.

3.2.5. Sprey Erozyon Deneyi Bulguları

Numunelerin basınçlı su altındaki aşınma miktarının belirlenmesi amacıyla yapılan sprej erozyon testine ait sonuçlar Şekil 3.6’da verilmektedir.



Şekil 3.6. Sprey erozyon test sonuçları.

Maksimum aşınmanın referans numunede meydana geldiği (16 mm), referans numunelere çinko stearat ilave edilmesiyle aşınma derinliğinin düştüğü tespit edilmiştir (Şekil 3.6). Ayrıca diğer tüm serilerin aşınmaya uğramadığı ve yüzeylerinin su aşınmasına dayanıklı olduğu görülmektedir. Yüzey su emme testlerinin bu sonuçları desteklediği görülmektedir.

3.2.6. Geelong Damla Erozyon Testi Bulguları

Numunelerin damlama etkisi altındaki zamana bağlı aşınma miktarlarını belirlemek amacıyla yapılan Geelong Damla Erozyon testine ait sonuçlar Şekil 3.7’de verilmektedir.

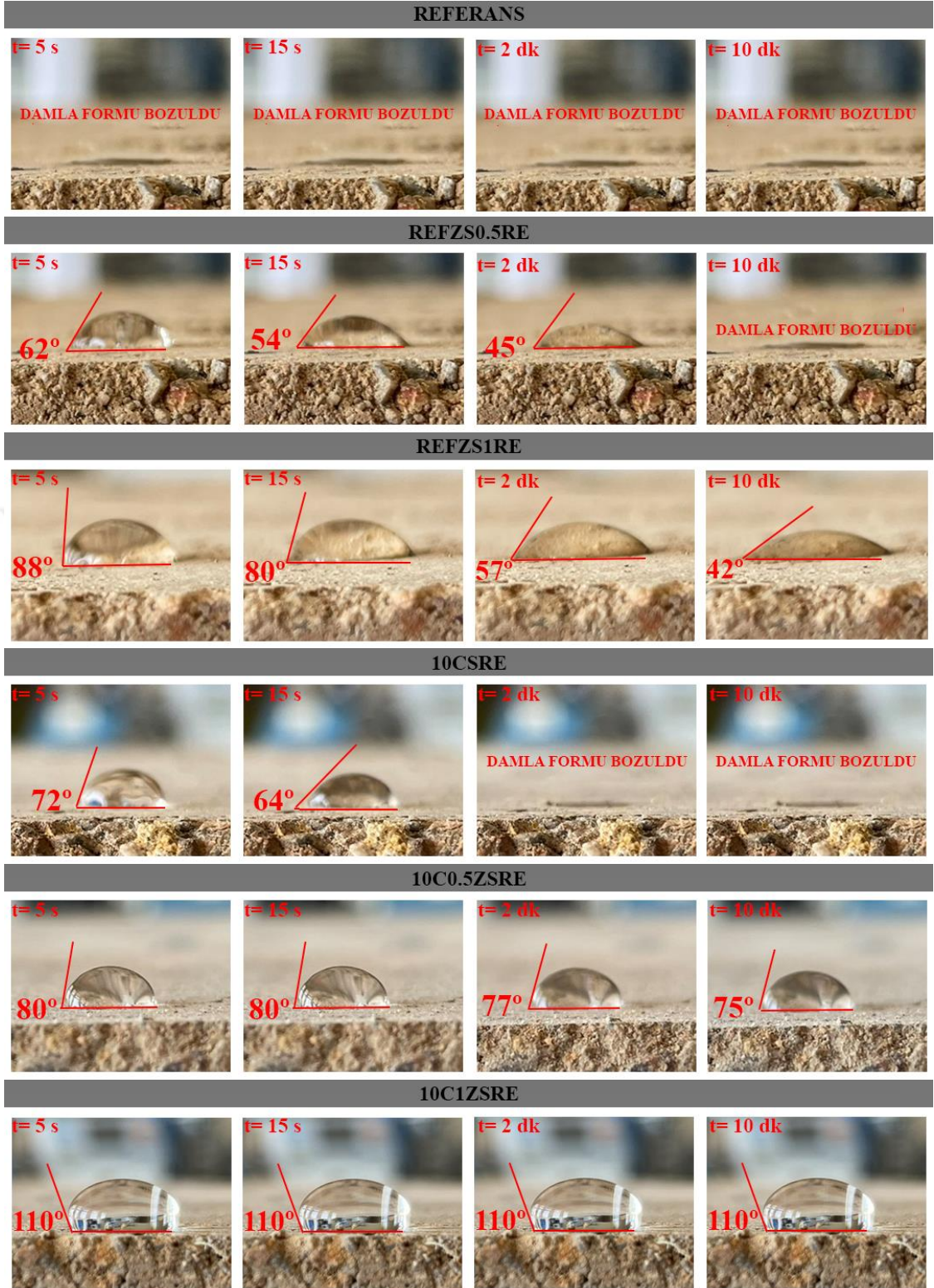


Şekil 3.7. Geelong damla erozyon test sonuçları.

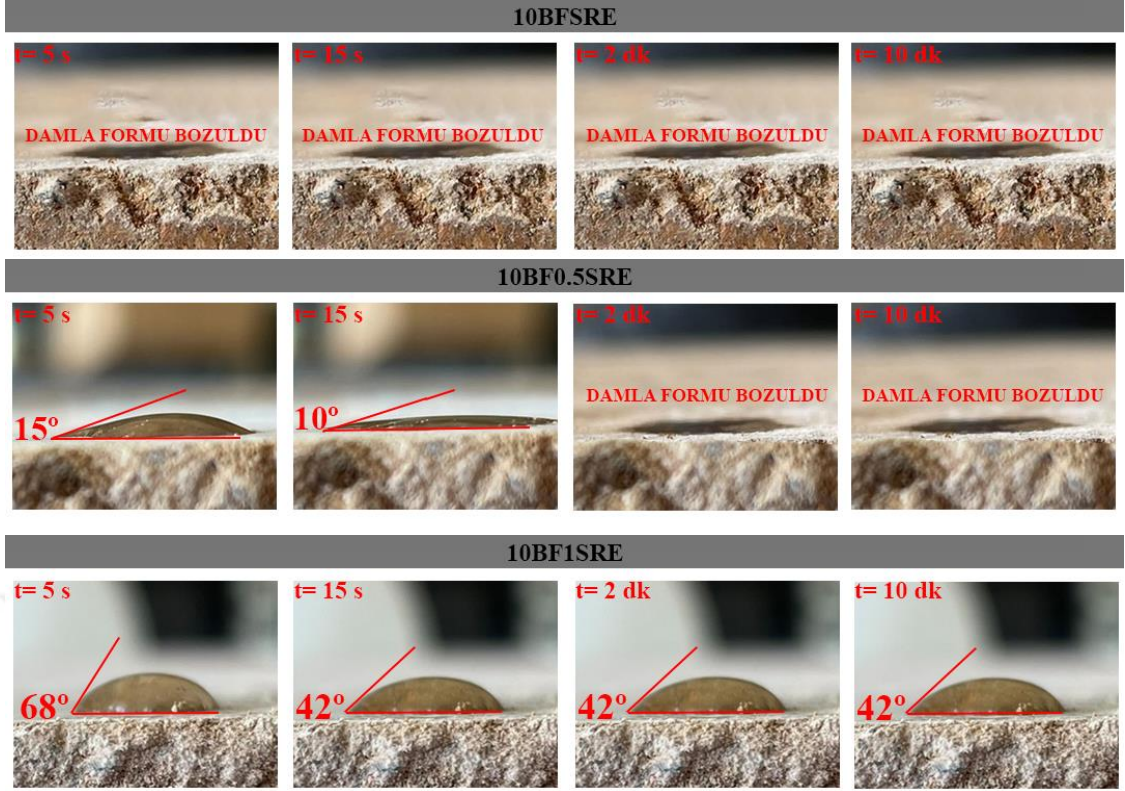
Geelong damla erozyon test sonuçları incelendiğinde (Şekil 3.7), sprey erozyon test sonuçlarında olduğu gibi en yüksek aşınma referans numunede meydana gelmiştir (5mm). Çinko stearat ilavesi yüzey aşınmalarını referans numuneye kıyasla, REFZS0.5RE serisinde %60 oranında ve REFZS1RE numunelerinde ise %80 oranında düşürmüştür. Diğer serilerde test sonuna kadar hiçbir aşınma gözlenmemiştir.

3.2.7. Yüzey Islanabilirlik Testi Bulguları

Numunelerin yüzeyde su tutma performansının belirlenmesi amacıyla yapılan yüzey ıslanabilirlik testine ait sonuçlar Şekil 3.8’de verilmektedir.



Şekil 3.8. Yüzey ıslanabilirlik testi bulguları.



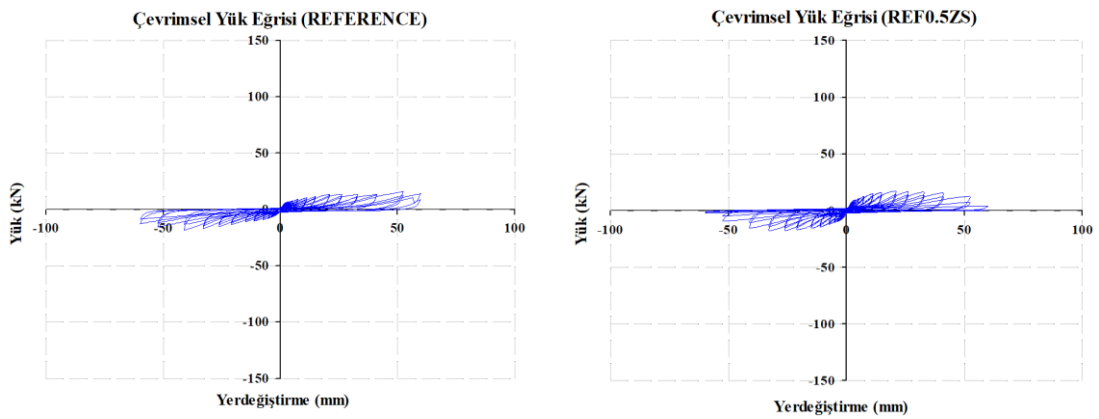
Şekil 3.8. (devam) Yüzey ıslanabilirlik testi bulguları.

Islanabilirlik testi ile ilgili genel olarak, yüzey ve damlaların temas açısının 90° ve üzerinde olması durumunda, yüzeyin az ıslanabilir yani hidrofobik ve su itici özelliğine sahip olduğu ifade edilmektedir. Daha düşük temas açılarında sahip yüzeylerin ise yüksek oranda ıslanabilir yani hidrofilik olduğu kabul edilmektedir [118]. Referans numuneleri, yüzeylerine bırakılan damlaları hızlı bir şekilde emerek ölçüm işlemini imkânsız hale getirmektedir. Bu sebeple yüzeylerinin tamamen hidrofilik olduğu tespit edilmiştir. REFZS0.5RE serisi incelendiğinde, damla bırakıldıktan 5 saniye sonra temas açısının 62° olarak ölçüldüğü ve zamanla temas açısının düşerek suyun tamamının emildiği tespit edilmiştir. Bu sebeple yüzeyi yüksek ıslanabilirlik özelliğine sahiptir. REFZS1RE serilerinde ise, deney başlangıcında 88° olan temas açısı, deney sonunda 42° 'ye kadar düşmüştür. Çinko stearat ilavesi referans serilerin yüzey özelliklerine olumlu yönde katkı sağlamıştır. 10CSRE numunelerinin deney başlangıcında temas açısının 72° olduğu ancak deney devamında tüm suyun emildiği tespit edilmiştir. 10C0.5ZSRE numunelerinde temas açısı başlangıçta 80° ve deney sonunda 75° olarak ölçülmüştür. Bu iki serisinde yüzeylerinin ıslanabilir olduğu tespit edilmiştir. 10C1ZSRE serisinde ise başlangıç temas açısı 110° olup, deney sonuna kadar bu açının bozulmadığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre 10C1ZSRE serisinin yüzeyinin tamamen hidrofobik olduğu

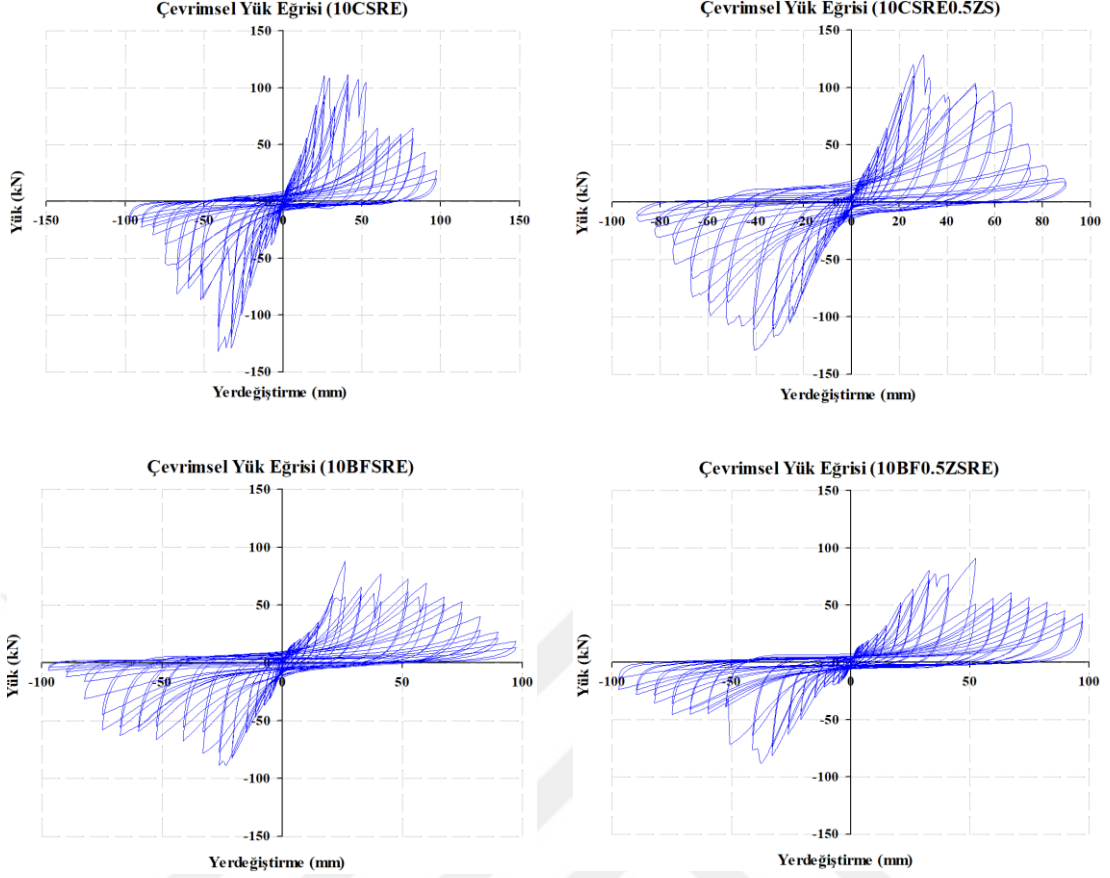
kabul edilmektedir. Karsten tüpü deneyi sonuçlarına göre su emmesinin de sıfır olması bu sonuçları kuvvetli şekilde desteklemektedir. Yüksek fırın cürufu içeren serilerde, 10BFSRE numunesi tüm suyu emerek ölçümü imkânsız hale getirmiştir. 10BF0.5ZSRE numunesinin başlangıç açısı 15° olsa da deney sonuna kadar tüm suyu emmiştir bu sebeple yüzeyi yüksek ıslanabilirlik özelliğine sahiptir. 10BF1ZSRE serisinde ise başlangıç temas açısı 68° olarak ölçülmüş ve deney sonunda 42° ye düşmüştür. Yüksek fırın cürufu içeren tüm serilerin su emme değerlerinin düşük olmasına rağmen, yüzeyleri yüksek ıslanabilirlik özelliğine sahiptir. Bunun sebebinin, yüksek fırın cürufunun aktive edilmesi için kullanılan sodyum hidroksitin yüzeyde meydana getirdiği sodyum tuzlarının suyu emmesi olduğu düşünülmektedir.

3.3. ÇEVİRİMSEL YÜK ETKİSİ ALTINDA DUVAR DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

Çevrimsel yükler altında davranışları incelenen duvarlara ait çevrimsel yük eğrileri Şekil 3.9'da verilmektedir. İtme ve çekme yönünde özellikleri aynı olan duvarların yük-yer değiştirme eğrilerin simetrik olması, test düzeneğinin istenilen şekilde doğru çalıştığını göstermektedir.



Şekil 3.9. Duvarlara ait Çevrimsel Yük-Yerdeğiştirme eğrileri.



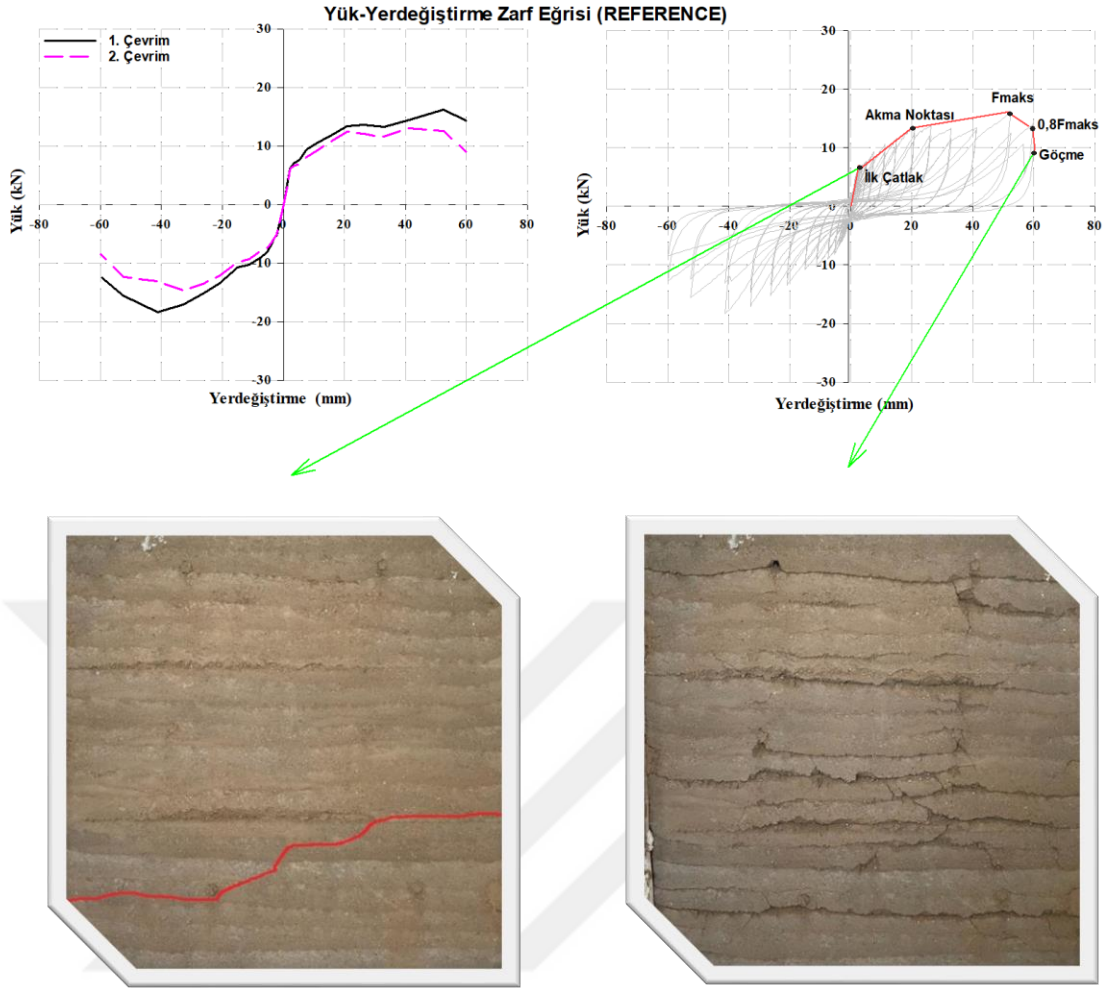
Şekil 3.9. (devam) Duvarlara ait Çevrimsel Yük-Yerdeğiştirme eğrileri.

3.3.1. Yük Taşıma Kapasitesi

Çevrimsel yük eğrilerinden elde edilen yük-yerdeğiştirme değerleri kullanılarak, birinci ve ikinci çevrimler için zarf eğrileri oluşturulmuştur. Her bir duvarın, itme ve çekme yönündeki maksimum yük ve yerdeğiştirme değerleri incelenmiştir. Zarf eğrilerinde (-) itme yönünü, (+) çekme yönünü ifade etmektedir.

Reference

Referans olarak üretilen duvara ait yük-yerdeğiştirme zarf eğrisi ve kırılma biçimi Şekil 3.10'da verilmektedir.

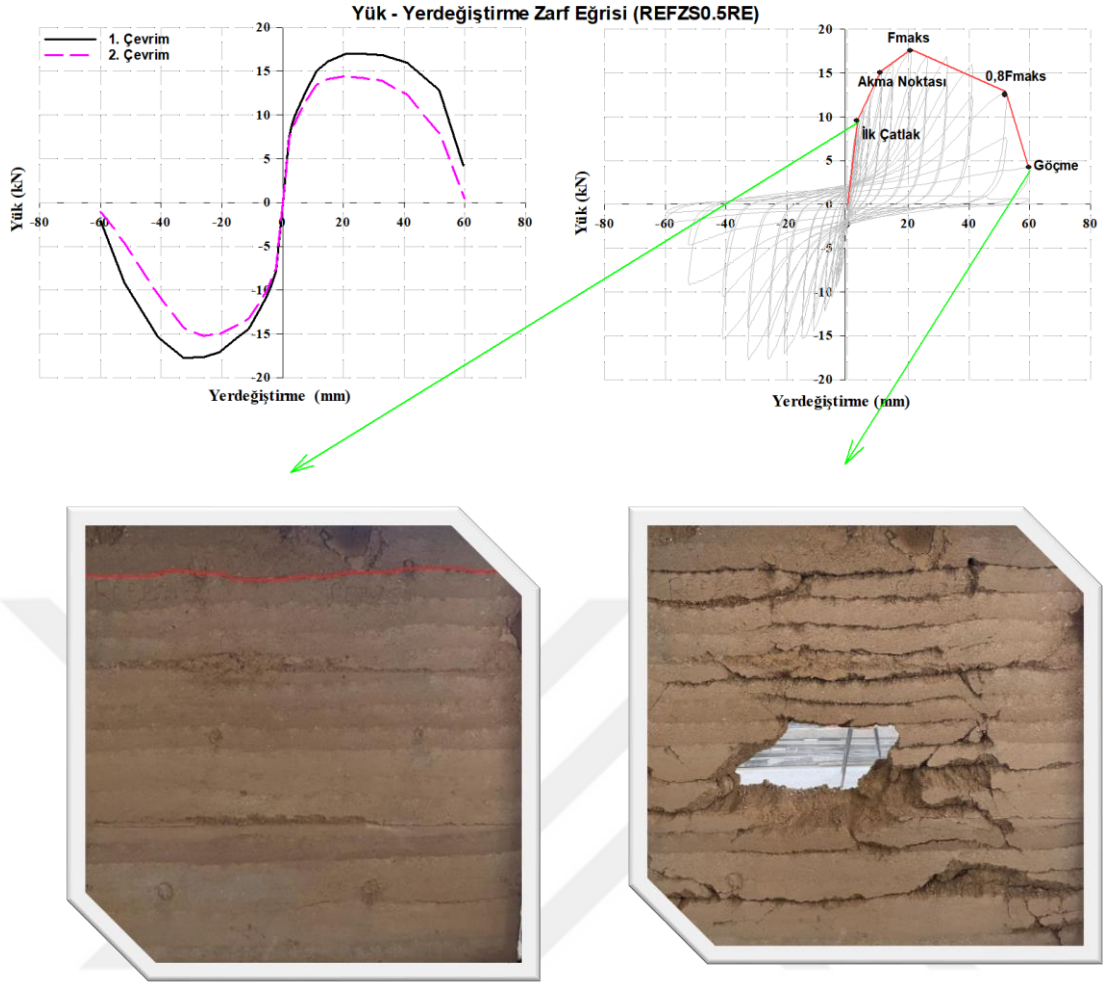


Şekil 3.10. Referans duvara ait zarf eğrisi ve kırılma biçimi.

Şekil 3.10 incelendiğinde, çekme ve itme yönünde ulaşılan maksimum yük ve bunlara karşılık gelen yerdeğiştirme değerleri sırasıyla 16,16 kN- 52,42 mm (%3,5 ötelenme oranı) ve 18,34 kN-41,18 mm (%2,74 ötelenme oranı) olarak tespit edilmiştir. İkinci çevrim incelendiğinde, aynı ötelenme oranlarında maksimum yük, çekme yönünde %22, itme yönünde ise %28 oranında düşüş göstermiştir. Referans karışımdan üretilen duvarın %3,5 ötelenme oranına kadar her iki doğrultuda da yük taşımaya devam ettiği ve maksimum yüklere göçmeden önce %3,5 ötelenme oranında ulaştığı görölmektedir. Ayrıca duvarın %3,5 ötelenme oranına kadar formunu bozmadığı, ayrışmaların katmanlar arasında gerçekteşiği ve duvarın tamamen göçmediği görölmüştür.

REFZS0.5RE

Durabilite özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla çinko stearat ilavesi yapılan referans karışım ile üretilen duvara ait (REFZS0.5RE) yük-yerdeğiştirme zarf eğrisi ve kırılma biçimi Şekil 3.11'de verilmektedir.

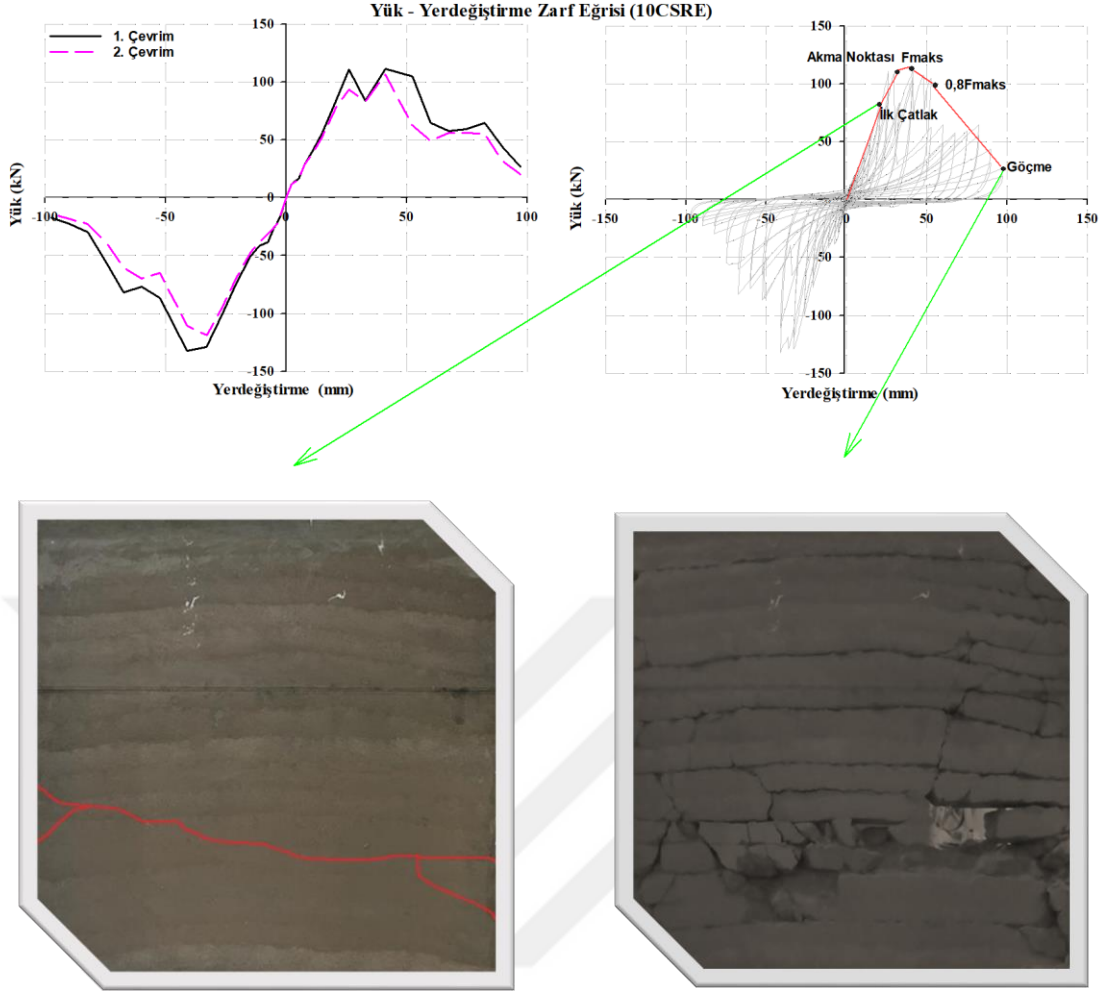


Şekil 3.11.REFZS0.5RE kodlu duvara ait zarf eğrisi ve kırılma biçimi.

REFZS0.5RE örneğine ait zarf eğrisi incelendiğinde (Şekil 3.11), çekme yönünde maksimum 17,02 kN yüke ve 41 mm yerdeğiştirmeye ulaşırken (%2,73 ötelenme oranı), itme yönünde maksimum 17,72 kN yüke ve bu yükün karşılığında 32,7 mm yerdeğiştirmeye ulaştığı görülmüştür (2.2% ötelenme oranı). İkinci çevrimin çekme yönünde, aynı ötelenme oranında ulaşılan yükün %15 oranında düştüğü, itme yönünde ise %19 oranında düştüğü görülmüştür. Referans duvara benzer bir davranış gösteren bu duvarında tamamen harap olmadan önce, %2,73 ötelenme oranına kadar formunu bozmadığı gözlemlenmiştir. İlk çatlak dahil diğer tüm bozulmaların katmanlar arası ayrışmalardan dolayı meydana geldiği açıkça görülmüştür.

10CSRE

Çimento ile stabilize edilen 10CSRE kodlu duvara ait zarf eğrisi ve kırılma biçimi Şekil 3.12’de verilmektedir.

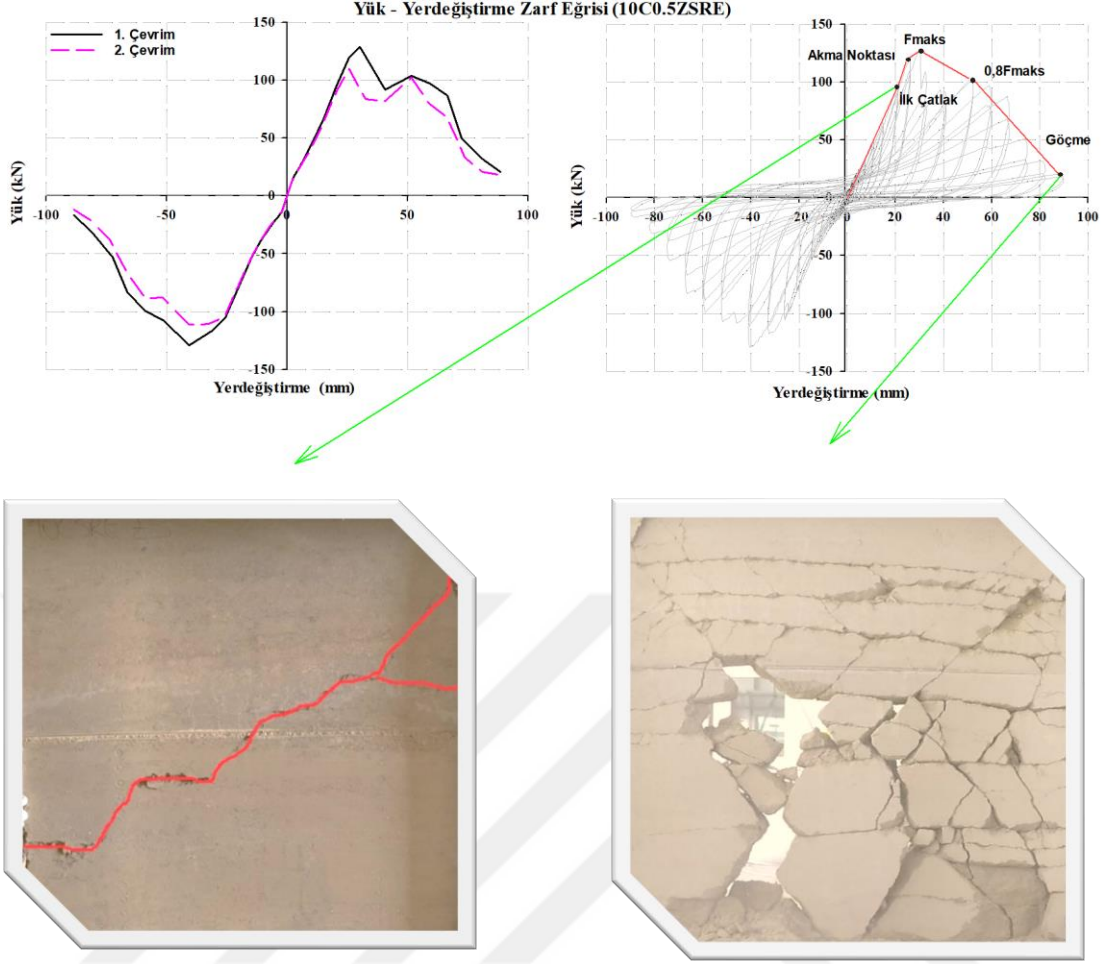


Şekil 3.12.10CSRE kodlu duvara ait zarf eğrisi ve kırılma biçimi.

Şekil 3.12 incelendiğinde, çimento ile stabilize edilen duvarın, çekme yönünde maksimum 111,60 kN ve bunun karşılığında 41,00 mm yerdeğiştirmeye ulaştığı, itme yönünde ise maksimum 132,10 kN yüke ve 41,00 mm yerdeğiştirmeye ulaştığı görülmektedir. Yüklemenin ikinci çevrimine bakıldığında, çekme yönünde maksimum yükün %5 oranında, itme yönünde maksimum yükün %16 oranında düştüğü tespit edilmiştir. Deneyin sonunda her iki yönde de (çekme ve itme), maksimum yüklere %2,75 ötelenme oranlarında ulaşıldığı görülmüştür. Maksimum yüke ulaştıktan sonra katmanlar arası çatlaklar oluşmuş ve enerji tüketmeye devam etmiştir.

10C0.5ZSRE

10C0.5ZSRE karışımıyla üretilen duvara ait zarf eğrisi ve kırılma biçimi Şekil 3.13'te verilmektedir.

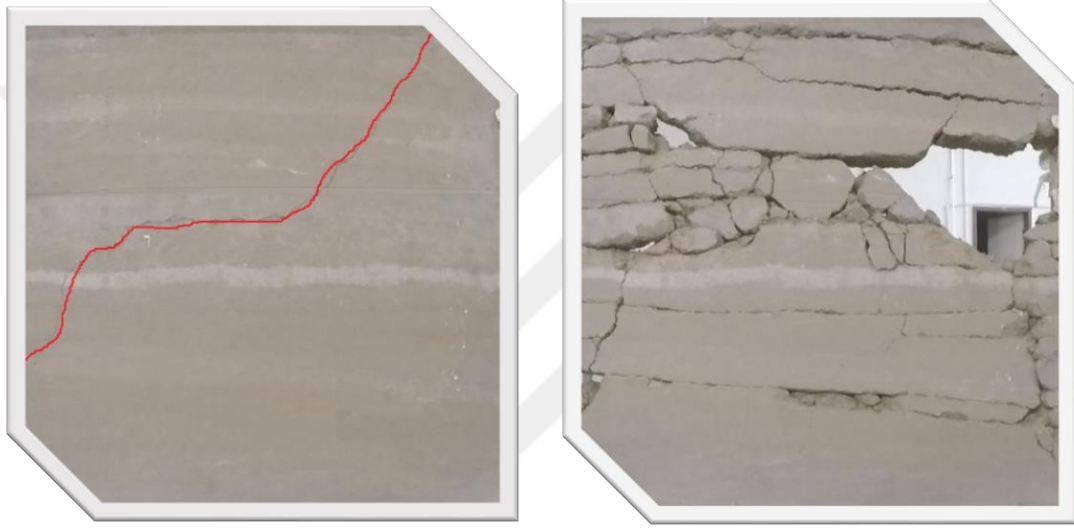
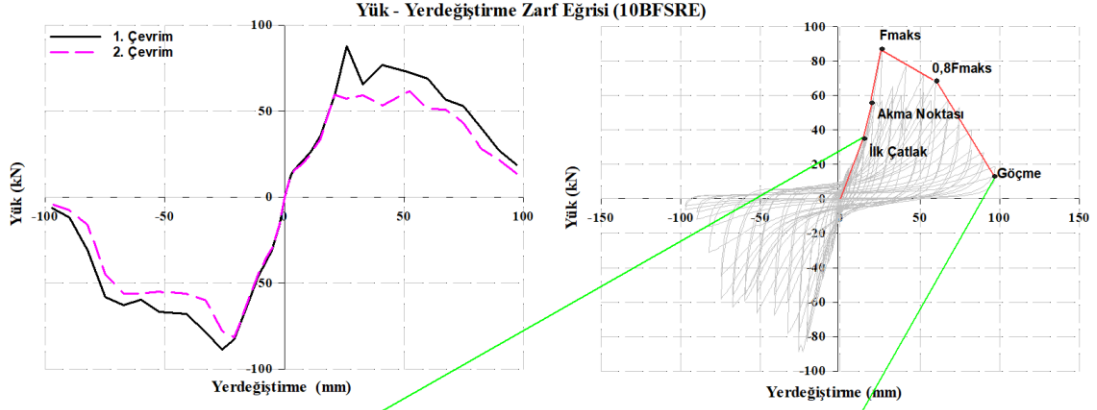


Şekil 3.13.10C0.5ZSRE kodlu duvara ait zarf eğrisi ve kırılma biçimi.

Şekil 3.13'te verilen zarf eğrisi incelendiğinde, çekme yönünde maksimum 128, 75kN yüke ve 30,15 mm yerdeğiştirmeye, itme yönünde maksimum 129,04kN yüke ve 40,05 mm yerdeğiştirmeye ulaşıldığı görülmüştür. Çekme yönünde maksimum yüke %2 ötelenme oranında, itme yönünde ise maksimum yüke %2,7 ötelenme oranında ulaşılmıştır ve zarf eğrisinden de görülebileceği gibi davranış simetriğe yakındır ve kırılma biçimi diyagonal çatlak oluşumlarıyla gerçekleşmiştir. Yüklemin ikinci çevriminde her iki doğrultuda da maksimum yük %15 oranında düşüş göstermiştir.

10BFSRE

Alkali aktivasyonlu yüksek fırın cürufu ile mekanik özellikleri stabilize edilen 10BFSRE kodlu duvara ait zarf eğrisi ve kırılma biçimi Şekil 3.14'te verilmektedir.

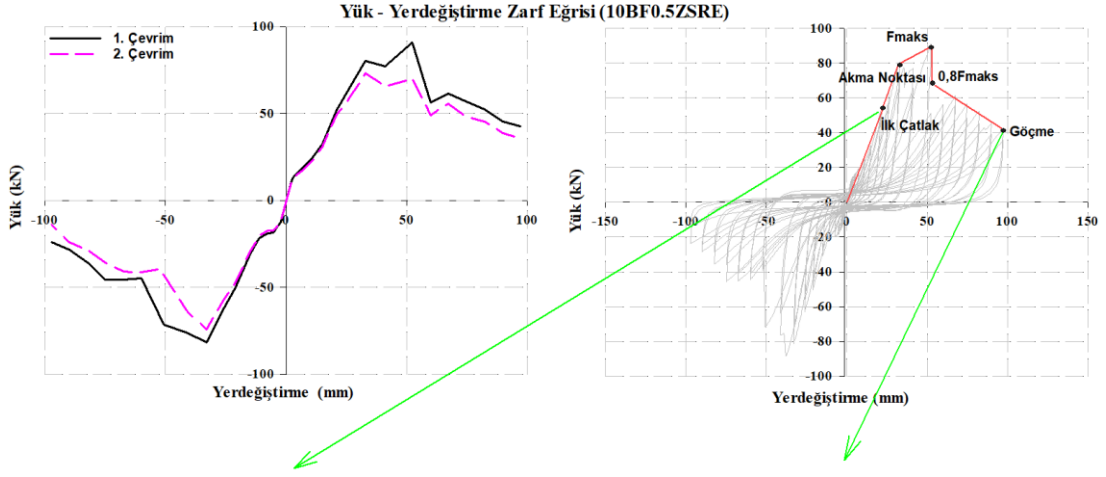


Şekil 3.14.10BFSRE kodlu duvara ait zarf eğrisi ve kırılma biçimi.

Şekil 3.14 incelendiğinde, 10BFSRE, çekme yönünde 87,86 kN maksimum yüke ve karşılığında 26,21 mm yerdeğiştirmeye ulaşmıştır. İtme yönünde ise maksimum 88,74 kN yüke ve karşılığında 26,19 mm yerdeğiştirmeye ulaşmıştır. Her iki yönde de %1,75 ötelenme oranında maksimum yüklere ulaşan duvar, 10CSRE ve 10C0.5ZSRE duvarlarında olduğu gibi, diyagonal bir kırılma ile taşıma kapasitesini kaybettiği gözlemlenmiştir.

10BF0.5ZSRE

10BF0.5ZSRE kodlu duvara ait zarf eğrisi ve kırılma biçimi Şekil 3.15'te verilmektedir.



Şekil 3.15. 10BF0.5SRE kodlu duvara ait zarf eğrisi ve kırılma biçimi.

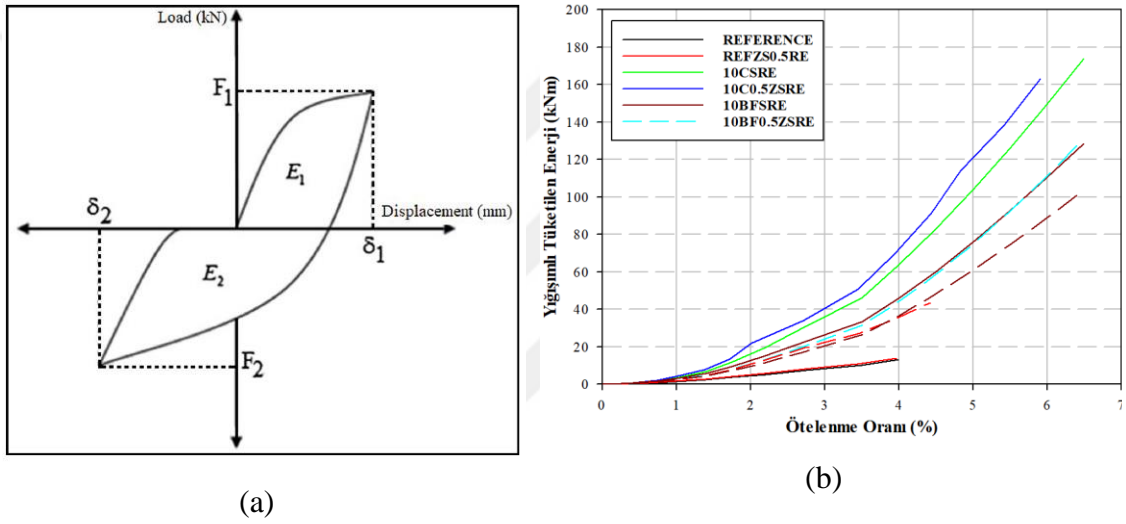
Şekil 3.15 incelendiğinde, 10BF0.5SRE, çekme yönünde 90,91 kN maksimum yük ve 52,40 mm yerdeğiştirmeye ulaşırken, itme yönünde ise maksimum 81,51 kN yüke ve 32,92 mm yerdeğiştirmeye ulaşmıştır. Duvarın itme ve çekme yönünde maksimum yüke ulaştığı ötelenme oranları ise sırasıyla %2,19 ve %3,5 olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde 10BFSRE, 10CSRE ve 10C0.5ZSRE duvarlarında olduğu gibi, referans duvarlara göre yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Diyagonal kırılmalar ile birlikte katman ara yüzlerinde de çatlaklar meydana gelmiş yük taşımaya ayrılmadan devam etmiştir. Duvarın kırılma biçimine bakıldığında formunu bozmadığı ve istenilen şekilde davrandığı görülmektedir.

Duvarlar genel olarak, maksimum yüke ulaştıkları ötelenme oranlarına gelene kadar dağılmadan formunu korumayı başarmıştır. Yapılan tüm deneylerin %3,5 ötelenme oranından sonra da devam ettirilmesinin sebebi nihai davranışın belirlenmesinin

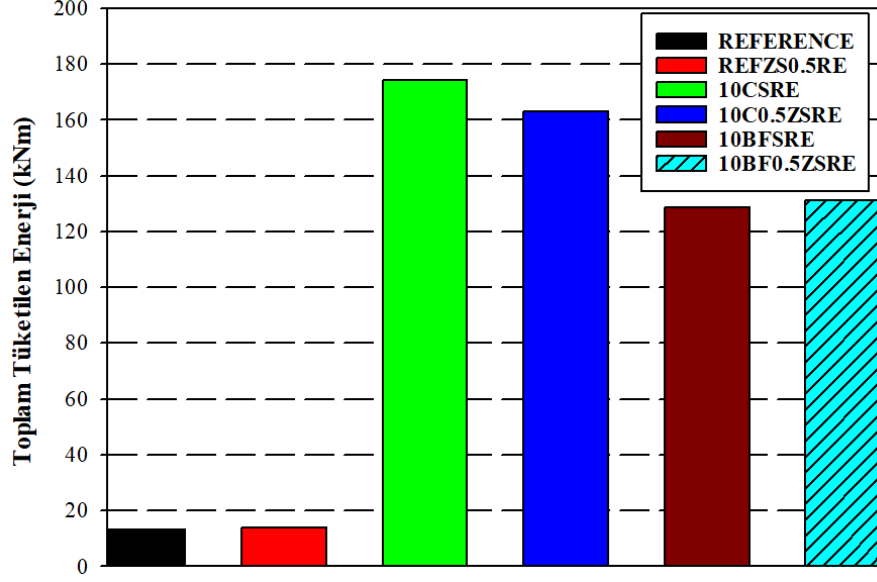
istenmesidir. Bu sonuçlar stabilizasyon işleminin yük taşıma kapasitesi açısından ne kadar önemli olduğu göstermektedir.

3.3.2. Enerji Tüketme Kapasitesi

Çevrimsel yükler altında test edilen duvarların deneyler sonunda tükettikleri toplam enerjiler Şekil 3.16a’da açıklandığı gibi, her çevrim için yük-yerdeğiştirme eğrisi altında kalan alanların yığılımlı olarak toplanmasıyla elde edilmiştir. Tüm duvarlara ait yığılımlı tüketilen enerji ve ötelenme oranı ilişkisi Şekil 3.16b’de verilmiştir. Ayrıca her bir duvara ait toplam tüketilen enerji miktarları Şekil 3.17’de verilmiştir. Tüm bunlara ek olarak toplam tüketilen enerjilerdeki değişim oranları Çizelge 3-8’de verilmektedir.



Şekil 3.16.(a) Her bir çevrim için tüketilen enerjilerin hesabı, (b) Duvarlara ait yığılımlı tüketilen enerjiler.



Şekil 3.17. Toplam tüketilen enerjiler.

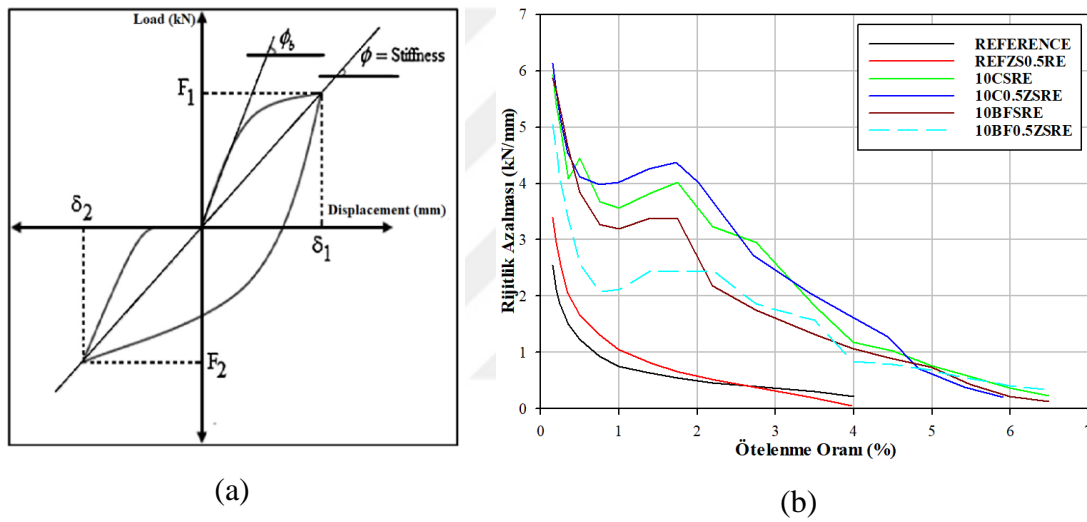
Çizelge 3-8. Karşılaştırmalı toplam tüketilen enerji değişimleri.

	REF	REF0.5ZSRE	10CSRE	10C0.5ZSRE	10BFSRE	10BF0.5ZSRE
	Toplam Tüketilen Enerji Değişiklik Oranları (%)					
REF		4,3	1222,2	1139,8	876,8	897,4
REF0.5ZSRE			1168,2	1089,2	836,9	856,7
10CSRE				-6,3	-26,1	-24,6
10C0.5ZSRE					-21,2	-19,6
10BFSRE						2,1
10BF0.5ZSRE						

Şekil 3.16b, Şekil 3.17 ve Çizelge 3-8 detaylı incelendiğinde, test numunelerinin enerji tüketme kapasitelerine, yapılan çimento stabilizasyonu ve alkali aktivasyonunun (YFC stabilizasyonu) önemli ölçüde katkıda bulunduğu görülmektedir. Toplam tüketilen enerji miktarlarına bakıldığında da (Şekil 3.17) benzer davranış gözlemlenmiştir. Yük taşıma kapasitesinde olduğu gibi, stabilizasyon işlemleri ile birlikte numunelerin enerji tüketme kapasitelerinde de önemli miktarda artış meydana geldiği görülebilmektedir. Enerji tüketme kapasitesi sonuçlarına göre en iyi performansı veren iki test numunesi 10CSRE ve 10C0.5ZSRE'dir. Maksimum yükün %15 düşüş gösterdiği ötelenme oranlarındaki enerji tüketmeler incelendiğinde duvarların sırasıyla 12 kNm (Referans), 12,7 kNm (REFZ0.5SRE), 38 kNm (10CSRE), 41 kNm (10C0.5ZSRE), 27,9 kNm (10BFSRE) ve 38 kNm (10BF0.5ZSRE) enerji tükettikleri tespit edilmiştir. Yük taşıma kapasitesinde olduğu gibi enerji tüketme kapasitesi sonuçları da özellikle çimento stabilizasyonunun önemini göstermektedir.

3.3.3. Rijitlik Azalması

Rijitlik azalması, deney elemanlarının genel davranışlarının yorumlanmasında kullanılan önemli bir rol parametredir. Bu davranışın belirlenmesinde, başlangıç rijitliklerini deney başlangıç verilerini kullanarak belirlemek olabilmektedir. Bunun en önemli sebebi, yüklemenin ilk başlarında duvarlarda lokal hasarlar meydana gelebilmesidir. Bu sebeple test elemanlarının rijitlikleri değerlendirilebilmesi için belirli bir ötelenme oranını belirlemek gerekmektedir. Test duvarlarının rijitlik azalmaları, her bir çevrimde çekme ve itme yönündeki tepe yüklerinden çizilen çizgilerin eğimleri yardımıyla hesaplanmıştır (Şekil 3.18a). Duvarların rijitlik azalması değerleri Şekil 3.18b’de, karşılaştırılmalı başlangıç rijitlik değişim oranları ise Çizelge 3-9’da verilmiştir.



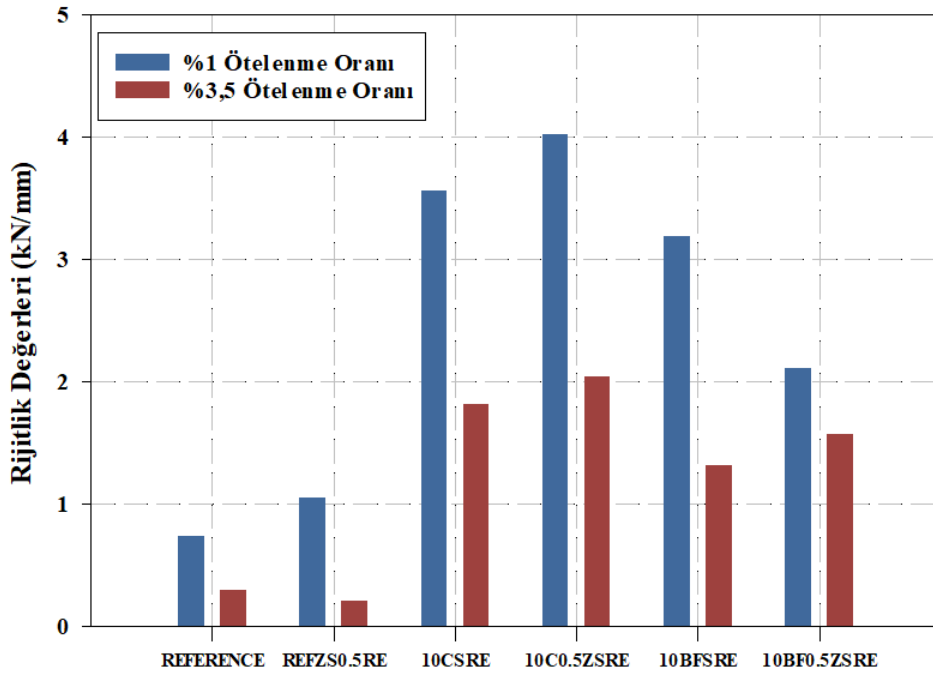
Şekil 3.18. (a) Her çevrim için sekant rijitliğinin hesaplanması, (b) Duvarların rijitlik azalmaları.

Çizelge 3-9. Karşılaştırmalı başlangıç rijitlikleri değişimleri.

	REF	REF0.5ZSRE	10CSRE	10C0.5ZSRE	10BFSRE	10BF0.5ZSRE
	Başlangıç Rijitlikleri Değişiklik Oranları (%)					
REF		33,9	133,5	141,3	131,1	98,8
REF0.5ZSRE			74,4	80,3	72,7	48,5
10CSRE				3,4	-1,0	-14,8
10C0.5ZSRE					-4,3	-17,6
10BFSRE						-14,0
10BF0.5ZSRE						

Şekil 3.18 incelendiğinde, başlangıç rijitlikleri en düşük olan numunelerin referans ve REFZS0.5RE olduğu ayrıca deney başladığı andan itibaren ötelenme oranı arttıkça aldıkları hasarlardan dolayı rijitlik değerlerinde de sürekli düşüşlerin meydana geldiği

görülmektedir. Deney sırasında bazı duvarların rijitlik değerlerinde ani artışlar meydana gelmiştir. Bu durumun deney sırasında duvarın sıkışıp anlık olarak taşıdığı yükün artmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Deney sonuna kadar tüm serilerin rijitlik değerlerinde ciddi azalmalar meydana gelmiştir. Başlangıç rijitliği en yüksek olan duvarın, 10C0.5ZSRE olduğu, 10CSRE ve 10BFSRE duvarlarının da başlangıç rijitliklerinin 10C0.5ZSRE duvarına yakın olduğu açıkça görülmektedir. Başlangıç rijitliklerinin referans duvara kıyasla sırasıyla, %33,9 (REFZS0.5RE), %133,5 (10CSRE), %141,3 (10C0.5ZSRE), %131,1 (10BFSRE) ve %98,8 (10BF0.5ZSRE) oranında artış gösterdiği görülmektedir (Çizelge 3-9). Duvarlara ait %1 ve %3,5 ötelenme oranlarındaki rijitlik değerleri, Şekil 3.18b kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 3.19'da verilmektedir.

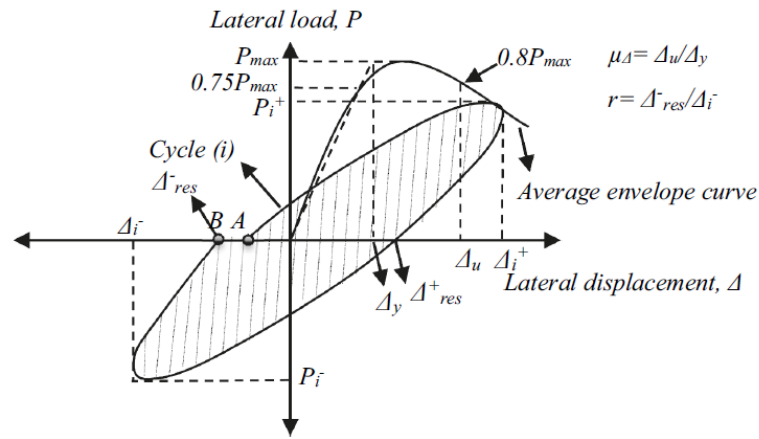


Şekil 3.19. %1 ve %3,5 ötelenme oranlarına ait rijitlik değerleri.

Şekil 3.19 incelendiğinde, duvarların %1 ötelenme oranına ulaştığındaki rijitleri sırasıyla 0,75 kN/mm (Referans), 1,05 kN/mm (REFZ0.5SRE), 3,56 kN/mm (10CSRE), 4,02 kN/mm (10C0.5ZSRE), 3,19 kN/mm (10BFSRE) ve 2,11 kN/mm (10BF0.5ZSRE) olarak belirlenmiştir. %3,5 ötelenme oranına ulaşıldığında ise duvarların rijitlikleri yaklaşık olarak %70 azalarak sırasıyla 0,21 kN/mm (Referans), 0,30 kN/mm (REFZ0.5SRE), 1,82 kN/mm (10CSRE), 2,04 kN/mm (10C0.5ZSRE), 1,32 kN/mm (10BFSRE) ve 1,57 kN/mm (10BF0.5ZSRE) değerlerine düşmüştür. Bu sonuçlar stabilizasyonun önemini ve duvarların davranışına katkısını bir kez daha göstermektedir.

3.3.4. Yerdeğiştirme Süneklikleri

Süneklik, taşıyıcı sistemin, taşıma kapasitesinde önemli bir değişme olmaksızın, elastik sınırın ötesinde şekil değiştirme ya da yer değiştirme yapabilme özelliği olarak tanımlanmaktadır. Yerdeğiştirme süneklikleri (μ) belirlenirken, yük- yerdeğiştirme zarf eğrilerinden faydalanılmaktadır (Şekil 3.20). Zarf eğrisinde, maksimum yükten çizilen doğru ve orijin noktasından çizilen teğetin kesiştiği noktaya denk gelen yerdeğiştirme " Δ_y " olarak, %20 dayanım azalmasına karşılık gelen nihai yerdeğiştirme ise " Δ_u " olarak belirlenir ve yerdeğiştirme süneklikleri hesaplanır. Hesaplanan yerdeğiştirme süneklikleri Çizelge 3-10'da verilmiştir.



Şekil 3.20. Yerdeğiştirme süneklikleri hesaplanışı.

Çizelge 3-10. Duvarların yerdeğiştirme süneklikleri.

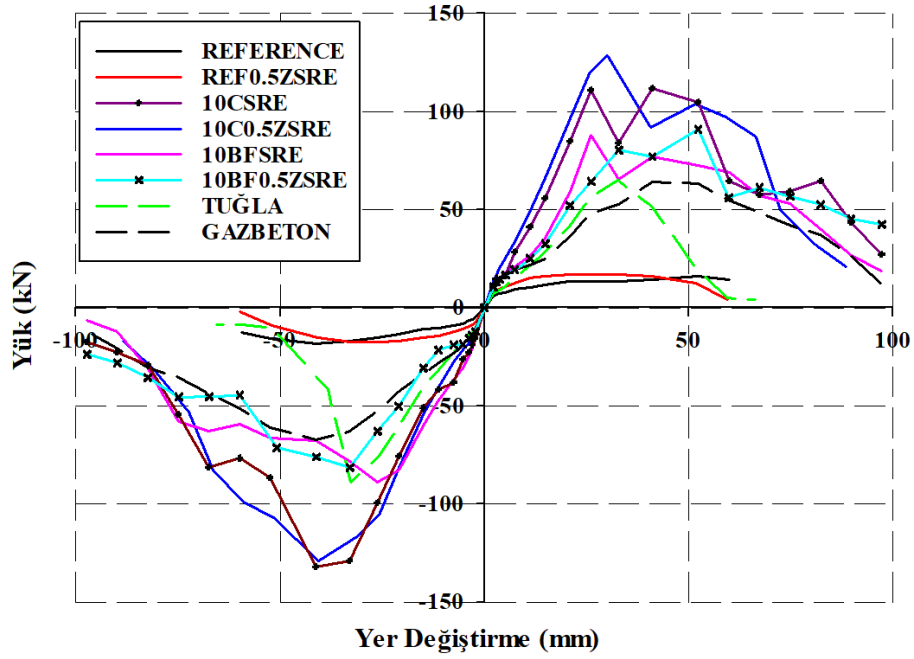
Numune Kodu	Ötelenme Oranı (%) [*]	İtme Yönü		Çekme Yönü					
		İtme Yönündeki Maksimum Yük (kN)	Çekme Yönündeki Maksimum Yük (kN)	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	Δ_u/Δ_y	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	Δ_u/Δ_y
REFERENCE	3,5	18,34	16,16	10,90	54,96	5,04	7,33	59,90	8,17
REFZS0.5RE	1,39	17,72	17,02	4,83	43,45	8,99	6,64	53,17	8,00
10CSRE	2,75	132,1	111,16	40,58	47,7	1,17	40,73	55,7	1,36
10C0.5ZSRE	2,01	129,046	128,57	48,05	56,87	1,18	28,46	52,16	1,83
10BFSRE	2,74	88,74	76,85	18,75	38,79	2,06	22,98	55,45	2,41
10B0.5ZSRE	2,74	81,51	90,91	35,50	50,74	1,42	35,82	52,36	1,46

^{*}(0.8Fmaks)

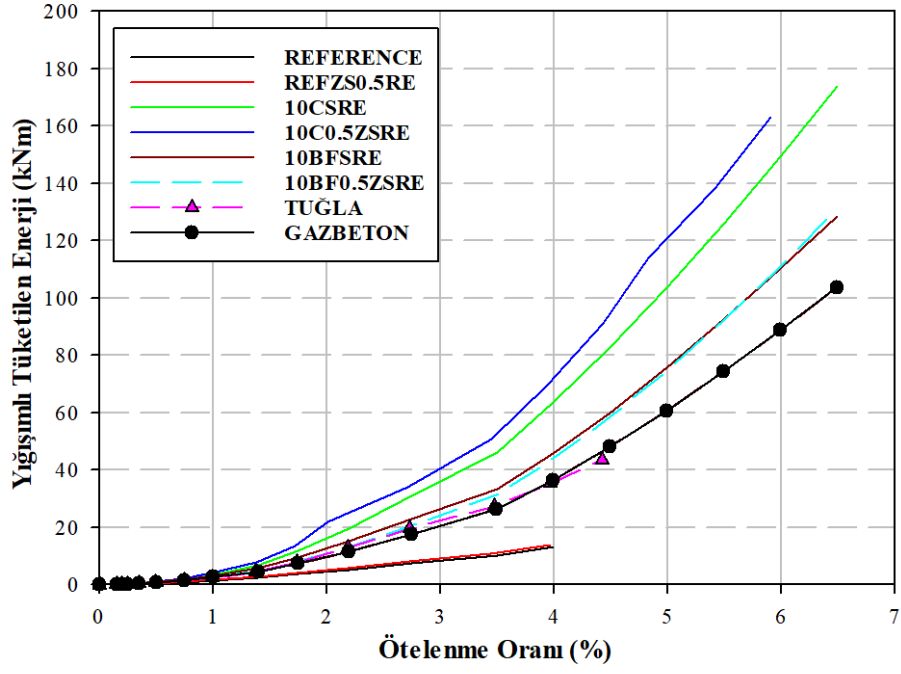
Yerdeğiştirme süneklikleri incelendiğinde, yük taşıma kapasiteleri ve enerji tüketme kapasiteleriyle doğru orantılı bir ilişki olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi, elemanlarda mafsallaşma oluşacak betonarme bir çerçevenin bulunmamasıdır.

3.4. SIKIŞTIRILMIŞ KİL DUVAR DAVRANIŞLARININ GELENEKSEL TUĞLA VE GAZBETON DUVARLAR İLE KIYASLANMASI

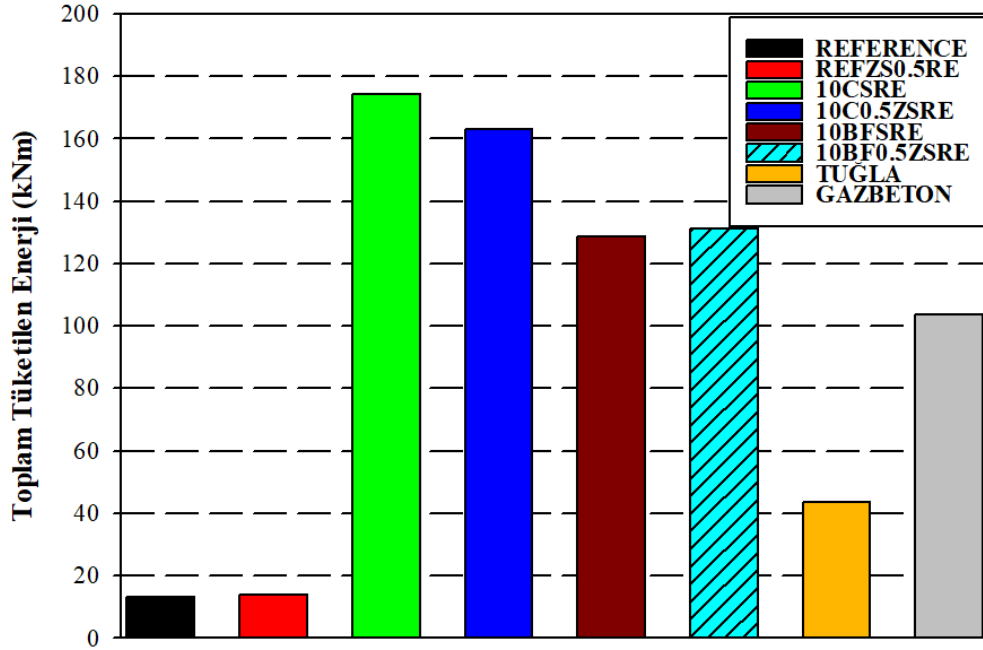
Geleneksel tuğla ve gazbeton bloklardan üretilen duvarlar ile sıkıştırılmış kil duvarların çevrimsel yükler altındaki davranışlarını kıyaslamak amacıyla 60x19x25 cm boyutlarında gazbeton bloklardan ve 19x13,5x19 cm boyutlarında geleneksel tuğlalardan oluşan duvarlar üretilmiştir. Üretilen bu duvarlara aynı test düzeneği ve yükleme protokolü kullanılarak çevrimsel yük uygulanmıştır. Elde edilen veriler bu duvarların sıkıştırılmış kil duvarlar ile kıyaslanmasında kullanılmıştır [129], [130]. Tüm duvarların kıyaslandığı karşılaştırmalı zarf eğrileri Şekil 3.21’de tüketilen yığılımlı enerjiler Şekil 3.22’de, toplam tüketilen enerjiler Şekil 3.23’te, karşılaştırmalı toplam tüketilen enerji değişim oranları Çizelge 3-11’de ve kırılma biçimleri Şekil 3.24’te verilmektedir.



Şekil 3.21. Geleneksel tuğla ve gazbeton bloklardan üretilen duvarlar ile sıkıştırılmış toprak duvarların yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması.



Şekil 3.22. Sıkıştırılmış toprak, tuğla ve gazbeton duvarlara ait karşılaştırmalı yığışım tüketilen enerjiler.



Şekil 3.23. Sıkıştırılmış toprak, tuğla ve gazbeton duvarlara ait karşılaştırmalı toplam tüketilen enerjiler.

Çizelge 3-11. Karşılaştırmalı toplam tüketilen enerji değişimleri.

	REF	REF0.5ZSRE	10CSRE	10C0.5ZSRE	10BFSRE	10BF0.5ZSRE	TUĞLA	GAZBETON
Toplam Tüketilen Enerji Değişiklik Oranları (%)								
REF		4,3	1222,2	1139,8	876,8	897,4	231,0	687,0
REF0.5ZSRE			1168,2	1089,2	836,9	856,7	217,0	654,7
10CSRE				-6,3	-26,1	-24,6	-75,0	-41,0
10C0.5ZSRE					-21,2	-19,6	-73,3	-37,1
10BFSRE						2,1	-66,2	-19,4
10BF0.5ZSRE							-66,9	-21,2
TUĞLA								138,1
GAZBETON								

Çizelge 3-11'e göre, referans sıkıştırılmış kil duvara kıyasla geleneksel tuğla duvarın toplam enerji tüketiminde %231,0 oranında ve gazbeton duvarın enerji tüketiminde %686,9 oranında artış olduğu görülmektedir. Ancak stabilize edilen karışımlar incelendiğinde, çimento stabilizasyonu yapılan 10CSRE serisine göre geleneksel tuğla duvarın %75 ve gazbeton duvarın %41 oranında daha az enerji tükettiği belirlenmiştir. Ayrıca alkali aktivasyonlu yüksek fırın cürufu içeren 10BFSRE serisine göre, geleneksel tuğla duvarın %66,2 ve gazbeton duvarın %19,2 daha az enerji tükettiği görülebilmektedir.



(REFERANS)



(REFZS0.5RE)

Şekil 3.24. Sıkıştırılmış toprak, tuğla ve gazbeton duvarlara ait kırılma biçimleri.



(10CSRE)



(10C0.5ZSRE)



(10BFSRE)



(10BF0.5ZSRE)



(GAZBETON)



(TUĞLA)

Şekil 3.24. (devam) Sıkıştırılmış toprak, tuğla ve gazbeton duvarlara ait kırılma biçimleri.

Tüm duvarlar birlikte kıyaslandığında, Referans ve REFZS0.5RE duvarları hariç diğer tüm serilerin, yük taşıma kapasitesi ve enerji tüketme kapasitesi olarak tuğla ve gazbetondan oluşan duvarlara göre daha iyi performans gösterdiği açıkça görülmektedir (Şekil 3.21, Şekil 3.22 ve Şekil 3.23). Duvarların kırılma biçimleri incelendiğinde (Şekil 3.24), özellikle tuğla kullanılarak üretilen duvarın enerji tüketme ve yük taşıma kapasitesinin düşük olmasının başlıca sebepleri, tuğla blokların dayanımlarının düşük, yapılarının boşluklu ve malzemenin gevrek olmasıdır. Gazbeton bloklardan oluşan duvarda ise diyagonal çatlaklar meydana gelmiş bu çatlaklar erken ötelenme oranlarında (%1,5) duvarın tamamına dağılmıştır. Bu sebeple duvar daha fazla enerji tüketememiş ve deney sonunda belirli kısmında dökülmeler meydana gelmiştir. Referans olarak üretilen sıkıştırılmış toprak duvarların kırılma biçimlerinde, sıkıştırma katmanlarından ayrışmalar meydana gelmiştir. Ötelenme oranı arttıkça katmanlar birbiri üzerinde kaymaya devam etmiş ve duvarın formu bozulmamıştır. Deneyin sonunda numunenin orta noktasında bir dökülme meydana gelse de tamamen yıkım söz konusu olmamıştır. Aynı durum REFZS0.5RE duvarı içinde geçerlidir. Çimento ile stabilizasyon yapılan 10CSRE ve 10C0.5ZSRE serilerinde ise diyagonal çatlaklar meydana gelmiş ve bu çatlaklar artan ötelenme oranlarında katmanlar arası yayılarak tüm duvara dağılmıştır. Sıkıştırma yüzeylerindeki ayrışmalar %3 ötelenme oranından sonra meydana geldiği için duvarlar enerji tüketmeye ve yük taşımaya devam edebilmiştir. Deney sonunda bazı bölgelerinde belirgin ayrışmalar olsa da duvarlar tamamen dökülmemiştir. Çimento stabilizasyonunda numunelerin arayüzey davranışları iyileşmiş ve çimentonun katmanlar arasındaki aderansı arttırdığı belirlenmiştir. Yüksek fırın cürufu stabilizasyonun duvar davranışına olumlu etkisi görülmektedir. 10BFSRE ve 10BF0.5ZSRE duvarları çimento stabilizasyonlu duvarlara benzer davranış gösterse de onlar kadar enerji tüketememiştir. Enerji tüketme ve yük taşıma kapasitesindeki farkın, çimentonun katmanlar arasındaki aderansa katkı sağlamasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, geleneksel yığma yapım tekniklerinden biri olan sıkıştırılmış kil duvarların stabilize edilerek hem mekanik hem de durabilite özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiş ve seçilen karışımlardan üretilen duvarların çevrimsel yükler altındaki davranışları incelenmiştir. Bu amaçla çalışmanın ilk bölümünde, sıkıştırılmış kil duvarlar, yığma yapılarla ilgili genel bilgiler ve literatür araştırması verilmiş, ikinci bölümde, deneylerde kullanılan malzemelerin bazı özellikleri, deney numunelerine ait detaylar, deney düzeneği ve deneylerin yapılışına dair detaylar verilmiştir. Elde edilen deneysel bulgular üçüncü bölümde verilmiş ve irdelenmiştir.

Çalışmanın bütününden çıkarılabilecek başlıca sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır.

- Sıkıştırılmış kil duvarların stabilizasyonunda kullanılan çimentonun, numunelerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği tespit edilmiştir.
- Endüstriyel bir atık olan yüksek fırın cürufunun alkali aktivasyon ile birlikte kullanılmasıyla, sıkıştırılmış kil duvarların mekanik özelliklerinde önemli derecede artış gözlemlenmiştir.
- Durabilite özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan çinko stearat, numunelerin basınç dayanımını bir miktar düşürse de mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi görülmemiştir.
- Basınç dayanımı deney sonuçlarında olduğu gibi, çimento ve yüksek fırın cürufu stabilizasyonunun, elastisite modülü ve kayma modülünü önemli derecede olumlu etkilediği görülmüştür.
- Çimento ve yüksek fırın cürufu stabilizasyonunun, sıkıştırılmış kil elemanların kesme mukavemetlerini arttırdığı tespit edilmiştir.
- Karsten tüpü deney sonuçlarına göre, toplam su emme miktarında en fazla suyu referans numunenin emdiği tespit edilmiştir (14.9 cm^3).
- Referans serilere yapılan çinko stearat ilavesinin, toplam su emme miktarını sırasıyla %52 (REFZS0.5RE) ve %77 (REFZS1RE) oranında düşürdüğü belirlenmiştir.

- Çinko stearat ilavesi, 10C0.5ZSRE ve 10C1ZSRE serilerinin su emmesini engelleyerek yüzeylerine su itici özelliği kazandırmıştır.
- 10BFSRE serisine yapılan çinko stearat ilavesi, su emme miktarını sırasıyla %82 (10BF0.5ZSRE) ve %94 (10BF1ZSRE) oranında düşürse de yüzey su itici özellik kazanmamıştır.
- Sprey erozyon ve Geelong damla erozyon testinde referans numunelere çinko stearat ilave edilmesiyle yüzey aşınmalarının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca diğer tüm serilerin aşınmaya uğramadığı ve yüzeylerinin su aşınmasına dayanıklı hale geldiği görülmüştür.
- 10C1ZSRE serisine yapılan yüzey ıslanabilirlik testinde, başlangıç temas açısı 110° olup, deney sonuna kadar bu açının bozulmadığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre 10C1ZSRE serisinin yüzeyinin tamamen hidrofobik olduğu kabul edilmektedir. Karsten tüpü deneyi sonuçlarına göre su emmesinin de sıfır olması bu sonuçları kuvvetli şekilde desteklemektedir.
- Yüzey ıslanabilirlik testine göre yüksek fırın cürufu içeren tüm serilerin su emme değerlerinin düşük olmasına rağmen, yüzeyleri yüksek ıslanabilirlik özelliğine sahiptir. Bunun sebebinin, yüksek fırın cürufunun aktive edilmesi için kullanılan sodyum hidroksitinin yüzeyde meydana getirdiği sodyum tuzlarının suyu emmesi olduğu düşünülmektedir. Ancak yine de su emme ve aşınma bakımından iyi bir performans göstermiştir.
- Duvarların yük taşıma kapasitesi ve enerji tüketme kapasitesi incelendiğinde en iyi sonuçları, çimento stabilizasyonu yapılan 10CSRE ve 10C0.5ZSRE duvarları vermiştir.
- Yüksek fırın cürufu stabilizasyonunun, duvarların yük taşıma kapasitesi ve enerji tüketme kapasitelerine olumlu katkı sağladığı tespit edilmiştir.
- Duvarların başlangıç rijitlikleri incelendiğinde, başlangıç rijitliği en yüksek olan duvarın, 10C0.5ZSRE olduğu, 10CSRE ve 10BFSRE duvarlarının da başlangıç rijitliklerinin 10C0.5ZSRE duvarına yakın olduğu belirlenmiştir.

Sıkıştırılmış kil düşük enerji gereksinimi olan, kolay temin edilebilen ve çevre dostu bir malzemedir. Çimento üretimindeki yüksek enerji ihtiyacı sebebiyle, yüksek fırın cürufu gibi bir atığın toprak ile kullanımı, toprağın çevreci özelliklerini desteklemektedir.

Yüksek fırın cürufunun aktive edilmesi için kullanılan sodyum hidroksit her ne kadar kimyasal olsa da çevreci üretimi desteklemek amacıyla 8 mol de sınırlı tutulmuş ve bu göz ardı edilebilecek bir miktar olduğu düşünülmektedir.

Çalışmanın sonucunda, sıkıştırılmış kil duvarların mekanik özelliklerinin stabilizasyonunda %10 çimento ve %10 alkali aktivasyonlu yüksek fırın cürufu kullanılmasının, durabilite özelliklerinin stabilizasyonunda ise %0.5 çinko stearat kullanılmasının uygun olacağı belirlenmiştir.

Sıkıştırılmış kil duvarların, yapısal davranışlarının ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde çimentonun yanı sıra yüksek fırın cürufu da kullanılması, endüstriyel bir atığın değerlendirilmesi amacıyla önerilmektedir. Sıkıştırılmış kil duvarların mekanik ve durabilite özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine daha fazla çalışma yapılması ve bu tekniğin günümüz koşullarında daha yaygın kullanılabilir hale getirilmesi ile birlikte, deprem sonrasında hızlı konut yapma ihtiyacının karşılanmasında kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu sebeple sıkıştırılmış kil duvarların deprem bölgelerinde kullanılabilirlikleri ve buna uygun tasarım esaslarının araştırılması için yapılacak çalışmalar önemli bir potansiyel taşımaktadır ve gelecekte yapılacak çalışmaların bu yönde yoğunlaşması önerilmektedir.

5. KAYNAKLAR

- [1] N. Başgelen, *Çağlar Boyunca Anadolu'da Duvar*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Arkeoloji ve Sanat Yayınları, 1993.
- [2] G. Minke, *Building With Earth - Design and Technology of Sustainable Architecture*, 1. baskı, Basel, İsviçre: Birkhäuser, 2006.
- [3] T. Söylemez, (2023, 15 Mart). *Barınak Yapmak*. [Online]. Erişim: <https://www.inploid.com/post/barinak-yapmak/47771>
- [4] F. Bandarin, (2005, 18 Şubat). *Old Towns of Djenné (Mali)*. [Online]. Erişim: <https://whc.unesco.org/en/list/116/gallery>
- [5] P. A. Jaquin, C. E. Augarde, & C. M. Gerrard, "Chronological description of the spatial development of rammed earth techniques", *International Journal of Architectural Heritage*, c. 2, sayı 4, ss. 377–400, 2008.
- [6] A. Yalama, "Farklı stabilizasyon malzemelerinin sıkıştırılmış kil duvarların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2015.
- [7] Anonim, (2022, 14 Mart). *Potala Palace*. [Online]. Erişim: <http://www.orangesmile.com/extreme/tr/ulasilamaz-binalar/potala-sarayi.htm>
- [8] S. T. Erdoğan & T. Y. Erdoğan, *Bağlayıcı Malzemelerin ve Betonun Onbinyıllık Tarihi*, Ankara, Türkiye: ODTÜ Yayıncılık, 2007.
- [9] E. A. Adam & A. R. A. Agib, "Compressed stabilised earth block manufacture in Sudan", *Fr. Paris Print. by Graphoprint UNESCO*, 2001.
- [10] G. M. Reeves, I. Sims & J. C. Cripps, *Clay Materials Used in Construction*, Londra, İngiltere: Geological Society of London, 2006.
- [11] E. Uzman, C. Öser, S. Kutu, M. Güler, & S. Cinicioglu, "Killerde kıvam parametrelerinin birbirleriyle ilişkilendirilmesi", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi*, Eskişehir, Türkiye, 2002, ss. 21-22.
- [12] U. Malayoğlu & A. Akar, "Killerin sınıflandırmasında ve kullanım alanlarının saptanmasında aranan kriterlerin irdelenmesi", *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 1995, ss. 125-133.
- [13] Ş. Oruç, "Kerpiç duvarlara uygulanan kil bağlayıcılı dış sıva hasarlarının irdelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye, 2004.
- [14] R. Kafescioğlu, *Çağdaş Yapı Malzemesi Toprak ve Alker*, İstanbul, Türkiye: İTÜ Vakfı Yayınları, 2017.
- [15] H. Sazcı, "Seramikte kullanılan killerin tanımı", *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 2001, ss. 28–42.
- [16] Ç. Koroğlu, "Ağaçlı ve Bolluca (İstanbul) yöresi seramik killerinin malzeme özelliklerinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [17] M. Özer, "Ultrasonik titreşimin kil çöktürmesinde etkisinin incelenmesi ve klasik çöktürme yöntemleri ile karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2002.

- [18] K. Darılmaz, *Depreme Dayanıklı Betonarme Binaların Tasarımına Giriş*, İstanbul, Türkiye: Yapı Yazılım Yayınları, 2012.
- [19] M. E. Arslan, “Deprem kumaşıyla güçlendirilen çevrimsel yük etkisindeki dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin davranışlarının deneysel ve teorik olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2013.
- [20] M. İspir, “19. yy. tarihi tuğla yığma duvarların davranışı üzerine kapsamlı deneysel bir çalışma”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [21] D. Karadeniz, “Yığma duvarların yatay yük kapasitesi için bir alt-sınır limit analiz çözümü”, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2019.
- [22] A. M. S. Semberou, “Yığma duvarların çevrimsel yükler altında davranışlarının deneysel ve sonlu eleman yöntemiyle belirlenmesi ve FRP Malzemesiyle güçlendirilmesi”, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2021.
- [23] V. Koç, “Depreme maruz kalmış yığma ve kırsal yapı davranışlarının incelenerek yığma yapı yapımında dikkat edilmesi gereken kuralların derlenmesi”, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, c. 2, ss. 36–57, 2016.
- [24] K. M. Şerbetçigil, “Yığma bir binada uygulanan deprem güçlendirmesinin doğrusal olmayan analitik yöntemle incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2021.
- [25] Y. Güner, “Mevcut tarihi yığma yapıların performans analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2018.
- [26] P. Yılmaz, “Tarihi yapıların modellenmesi ve deprem güvenliklerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2006.
- [27] Kâgir Birimler - Özellikler - Bölüm 1: Kil Kâgir Birimler (Tuğlalar), TS EN 771-1, 2005.
- [28] A. Batur, “Donatısız yığma binaların yatay yükler altındaki davranışı ve bazı ülkelerin şartnamelerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1999.
- [29] O. M. Kayırga, “Yığma yapıların deprem davranışının analitik ve deneysel olarak belirlenmesi”, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, 2017.
- [30] Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler - Bölüm 6: Tane Yoğunluğunun ve Su Emme Oranının Tayini, TS EN 1097-6, 2022.
- [31] A. Ural, “Yığma yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2009.
- [32] E. Sayın, “Yığma yapıların lineer olmayan statik ve dinamik analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2009.
- [33] M. Tomazevic, *Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings*, 1. Baskı, Singapur: World Scientific, 1999.
- [34] Kâgir Yapıların Tasarımı - Bölüm 1-1: Donatılı ve Donatısız Kâgir Yapılar için

Genel Kurallar, TS EN 1996-1-1, 2022.

- [35] A. Bayraktar, *Yığma Yapı Mühendisliğinin Gelişim Tarihi: Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımları*, İstanbul, Türkiye: Beta Yayınları, 2011.
- [36] H. Sesigür, O. C. Çelik, & F. Çılı, “Tarihi yapılarda taşıyıcı bileşenler, hasar biçimleri, onarım ve güçlendirme”, *Yapı Dergisi*, sayı 303, ss. 10-21, 2007.
- [37] N. Bayülke, *Yığma Yapılar*, 1. baskı, Ankara, Türkiye: İmar ve İskan Bakanlığı, 1992.
- [38] H. Yıldızoğlu, “Tarihi yığma yapıların performans analizi: Okul binası örneği”, Yüksek Lisans Tezi, Bayburt Üniversitesi, Bayburt, Türkiye, 2019.
- [39] P.Gülkan, E. Canbay, S. D. Akkar, H. Sucuoğlu, U. Ersoy, G. Özcebe,... & A. Yakut, *Binalar İçin Deprem Mühendisliği Temel İlkeler*, İstanbul, Türkiye: Evrim Yayınları, 2008.
- [40] Ç. Kaya, “Yığma duvarların elastik-plastik hesabı”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [41] A. O. Kuruşçu, “Yığma yapıların analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2005.
- [42] H. Yıldırım, “Yığma yapı elemanları için izotropik hasar modeli geliştirilmesi ve sonlu eleman uygulamaları”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [43] P. J. B. B. Lourenço, "Computational strategies for masonry structures", Doktora Tezi, Minho Üniversitesi, Braga, Portekiz, 1997.
- [44] F. Ersubaşı, “Yığma yapıların deprem davranışının sarsma masasında dinamik olarak incelenmesi ve farklı güçlendirme seçeneklerinin değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2008.
- [45] M. T. Çöğürçü & M. Karamanli, “Yığma yapıların dinamik ve mühendislik davranışının düzlem dışı kuvvetler altında deneysel olarak incelenmesi”, *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, c. 6, sayı 2, ss. 83–108, 2007.
- [46] G. Arun, “Yığma kâgir yapı davranışı”, *Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı*, 2005.
- [47] Deprem etkisi altında binaların tasarımı için esaslar, T.C. Resmi Gazete, Sayı: 30364, 18 Mart 2018.
- [48] Kâgir - Deney metotları -Bölüm 1: Basınç dayanımı tayini, TS EN 1052-1, 2000.
- [49] I. Arto, R. Gallego, H. Cifuentes, E. Puertas, & M. L. Gutiérrez-Carrillo, “Fracture behavior of rammed earth in historic buildings”, *Construction and Building Materials*, c. 289, sayı. 123167, 2021.
- [50] E. Sebastián & G. Cultrone, " Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures", *Technology of Rammed-Earth Constructions ('Tapial') in Andalusia (Spain): Their Restoration and Conservation*, Dordrecht: Springer Netherlands, 2010, ss. 11–28.
- [51] Q. Angulo-Ibáñez, Á. Mas-Tomás, V. Galvañ-Llopis, & J. L. Sántolaria-Montesinos, “Traditional braces of earth constructions”, *Construction and Building Materials*, c. 30, ss. 389–399, 2012.

- [52] J.-C. Morel, R. Charef, E. Hamard, A. Fabbri, C. Beckett, & Q.-B. Bui, “Earth as construction material in the circular economy context: practitioner perspectives on barriers to overcome”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, c. 376, sayı 1834, 2021.
- [53] S. S. D. Raavi & D. D. Tripura, “Predicting and evaluating the engineering properties of unstabilized and cement stabilized fibre reinforced rammed earth blocks”, *Construction and Building Materials*, c. 262, sayı 120845, 2020.
- [54] P. Walker, R. Keable, J. Martin, & V. Maniatidis, *Rammed Earth: Design and Construction Guidelines*, Berkshire, İngiltere: BREPress, 2005.
- [55] M. E. Arslan, M. Emiroğlu, & A. Yalama, “Structural behavior of rammed earth walls under lateral cyclic loading: A comparative experimental study”, *Construction and Building Materials*, c. 133, ss. 433–442, 2017.
- [56] C. Jayasinghe & N. Kamaladasa, “Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls”, *Construction and Building Materials*, c. 21, sayı 11, ss. 1971–1976, 2007.
- [57] S. Burroughs, “Recommendations for the selection, stabilization, and compaction of soil for rammed earth wall construction”, *Journal of Green Building*, c. 5, sayı 1, ss. 101–114, 2010.
- [58] Standards Association of Austria, *Methods of Testing Soils for Engineering Purposes*. North Sydney: The Association, 1993.
- [59] R. A. Silva, D. V Oliveira, T. Miranda, N. Cristelo, M. C. Escobar, & E. Soares, “Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal”, *Construction and Building Materials*, c. 47, ss. 181–191, 2013.
- [60] M. Hallal Mohamad, S. Sadek, & S. Najjar Shadi, “Evaluation of engineering characteristics of stabilized rammed-earth material sourced from natural fines-rich soil”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, c. 30, sayı 11, s. 4018273, 2018.
- [61] D. Tripura Deb & D. Singh Konjengbam, “Characteristic properties of cement-stabilized rammed earth blocks”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, c. 27, sayı 7, s. 4014214, 2015.
- [62] D. Ciancio & M. Boulter, “Stabilised rammed earth: a case study in Western Australia”, *Proceedings of the Institute of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, c. 165, sayı 2, ss. 141–154, 2012.
- [63] A. Arrigoni, C. Beckett, D. Ciancio, & G. Dotelli, “Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilised rammed earth”, *Construction and Building Materials*, c. 142, ss. 128–136, 2017.
- [64] J. C. Morel, A. Mesbah, M. Oggero, & P. Walker, “Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction”, *Building and Environment*, c. 36, sayı 10, ss. 1119–1126, 2001.
- [65] V. Maniatidis & P. Walker, *A Review of Rammed Earth Construction for DTi Partners in Innovation Project*, Bath, İngiltere: Natural Building Technology Group-University of Bath, 2003.
- [66] V. Toufigh & E. Kianfar, “The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts”, *Construction and Building Materials*, c. 200, ss. 616–

629, 2019.

- [67] M. Kosarimovahhed & V. Toufigh, “Sustainable usage of waste materials as stabilizer in rammed earth structures”, *Journal of Cleaner Production*, c. 277, s. 123279, 2020.
- [68] M. A. Ibrahim, L. Li, & P. Wang, “The design of 220kv substation grounding grid with difference soil resistivity using wenner and schlumberger methods”, *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 2018, ss. 2525–2530.
- [69] Rammed Earth Structures - Code of Practice, Sadc Harmonized Standart-983, 2014.
- [70] Materials and Workmanship for Earth Buildings, NZS 4298, 1998.
- [71] D. D. Tripura & K. D. Singh, “Axial load-capacity of rectangular cement stabilized rammed earth column”, *Engineering Structures*, c. 99, ss. 402–412, 2015.
- [72] S. Siddiqua & P. N. M. Barreto, “Chemical stabilization of rammed earth using calcium carbide residue and fly ash”, *Construction and Building Materials*, c. 169, ss. 364–371, 2018.
- [73] S. Raj S, A. K. Sharma, & K. B. Anand, “Performance appraisal of coal ash stabilized rammed earth”, *Journal of Building Engineering*, c. 18, ss. 51–57, 2018.
- [74] A. Laborel-Préneron, J. E. Aubert, C. Magniont, C. Tribout, & A. Bertron, “Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review”, *Construction and Building Materials*, c. 111, ss. 719–734, 2016.
- [75] E. W. Simenson, “Rammed earth: fiber-reinforced, cement-stabilized”, Yüksek Lisans Tezi, Colorado Üniversitesi, Denver, Amerika Birleşik Devletleri, 2013.
- [76] P. Zare, S. Sheikhi Narani, M. Abbaspour, A. Fahimifar, S. M. Mir Mohammad Hosseini, & P. Zare, “Experimental investigation of non-stabilized and cement-stabilized rammed earth reinforcement by waste tire textile fibers (WTTFs)”, *Construction and Building Materials*, c. 260, s. 120432, 2020.
- [77] A. Corbin & C. Augarde, “Fracture energy of stabilised rammed earth”, *Procedia Materials Science*, c. 3, ss. 1675–1680, 2014.
- [78] D. D. Tripura, S. Gupta, B. Debbarma, & R. S. S. Deep, “Flexural strength and failure trend of bamboo and coir reinforced cement stabilized rammed earth wallets”, *Construction and Building Materials*, c. 242, s. 117986, 2020.
- [79] M. Zamanian, M. Salimi, M. Payan, A. Noorzad, & M. Hassanvandian, “Development of high-strength rammed earth walls with alkali-activated ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and waste tire textile fiber (WTF) as a step towards low-carbon building materials”, *Construction and Building Materials*, c. 394, s. 132180, 2023.
- [80] A. Romanazzi, D. V Oliveira, R. A. Silva, & A. Barontini, “Effectiveness of a TRM solution for rammed earth under in-plane cyclic loads”, *Construction and Building Materials*, c. 407, s. 133551, 2023.
- [81] F. Ávila, E. Puertas, & R. Gallego, “Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: A review”, *Construction and Building Materials*, c. 270, s. 121435, 2021.

- [82] T. T. Bui, Q. B. Bui, A. Limam, & J. C. Morel, “Modeling rammed earth wall using discrete element method”, *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, c. 28, sayı 1, ss. 523–538, 2016.
- [83] V. Maniatidis & P. Walker, “Structural capacity of rammed earth in compression”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, c. 20, 2008.
- [84] L. Yamín, C. Phillips, J. C. Reyes, & D. M. Ruiz, “Seismic behavior and rehabilitation alternatives for adobe and rammed earth buildings”, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, 2002.
- [85] D. Ciancio, C. T. S. Beckett, & J. A. H. Carraro, “Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth”, *Construction and Building Materials*, c. 53, ss. 59–65, 2014.
- [86] V. Strazzeri, A. Karrech, & M. Elchalakani, “Micromechanics modelling of cement stabilised rammed earth”, *Mechanics of Materials*, c. 148, s. 103540, 2020.
- [87] A. Koutous & E. Hilali, “Reinforcing rammed earth with plant fibers: A case study”, *Case Studies in Construction Materials*, c. 14, s. e00514, 2021.
- [88] A. Koutous & E. Hilali, “Compression stress-strain curve of rammed earth: Measuring and modelling”, *Results in Engineering*, c. 18, s. 101012, 2023.
- [89] F. Ávila, E. Puertas, C. Torrús, & R. Gallego, “Influence of crack propagation on the seismic behavior of historic rammed earth buildings: The Tower of Muhammad in the Alhambra (Spain)”, *Engineering. Structures*, c. 301, s. 117365, 2024.
- [90] Q. B. Bui, S. Hans, J.-C. Morel, & P. do, “First exploratory study on dynamic characteristics of rammed earth buildings”, *Engineering. Structures*, c. 33, ss. 3690–3695, 2011.
- [91] M. I. Gomes, M. Lopes, & J. Brito, “Seismic resistance of earth construction in Portugal”, *Engineering. Structures*, c. 33, ss. 932–941, 2011.
- [92] G. Minke, *Earth Construction Handbook: The Building Material Earth in Modern Architecture*, Southampton, İngiltere: WIT Press, 2000.
- [93] P. Walker, *The Australian Earth Building Handbook*, Sydney, Australia: SAI Global Limited, 2002.
- [94] D. M. Ruiz, N. Barrera, J. C. Reyes, M. Restrepo,... & H. A. Vacca, “Strengthening of historical earthen constructions with steel plates: Full-scale test of a two-story wall subjected to in-plane lateral load”, *Construction and Building Materials*, c. 363, s. 129877, 2023.
- [95] T.-D. Nguyen, T.-T. Bui, A. Limam, & A. Topa, “Effect of openings on the behaviour of rammed earth structures under quasi-static loading”, *Engineering. Structures*, c. 281, s. 115759, 2023.
- [96] K. A. Heathcote, “Durability of earthwall buildings”, *Construction and Building Materials*, c. 9, sayı 3, ss. 185–189, 1995.
- [97] Y. Luo, M. Yang, P. Ni, X. Peng, & X. Yuan, “Degradation of rammed earth under wind-driven rain: The case of Fujian Tulou, China”, *Construction and Building Materials*, c. 261, s. 119989, 2020.
- [98] S. Ghasemalizadeh & V. Toufigh, “Durability of rammed earth materials”, *International Journal of Geomechanics*, c. 20, s. 4020201, 2020.

- [99] P. Narloch & P. Woyciechowski, “Assessing cement stabilized rammed earth durability in a humid continental climate”, *Buildings*, c. 10, sayı 2. 2020.
- [100] Q. B. Bui, J. C. Morel, B. V Venkatarama Reddy, & W. Ghayad, “Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering”, *Building and Environment*, c. 44, sayı 5, ss. 912–919, 2009.
- [101] C. Umubyeyi, K. Wenger, J. Dahmen, & J. Ochsendorf, “Durability of unstabilized rammed earth in temperate climates: A long term study”, *Construction and Building Materials*, c. 409, s. 133953, 2023.
- [102] G. Minke, *Building with earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Basel, İsviçre: Birkhäuser, 2013.
- [103] Building Materials and Products-Hygrothermal Properties-Tabulated Design Values and Procedures for Determining Declared and Design Thermal Values, ISO 10456:2012, 2012.
- [104] F. Ávila, E. Puertas, & R. Gallego, “Characterization of the mechanical and physical properties of stabilized rammed earth: A review”, *Construction and Building Materials*, c. 325, s. 126693, 2022.
- [105] M. Hall & D. Allinson, “Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials”, *Building and Environment*, c. 44, sayı 9, ss. 1935–1942, 2009.
- [106] M. Hall & D. Allinson, “Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials”, *Applied Thermal Engineering*, c. 29, sayı 4, ss. 740–747, 2009.
- [107] A. Karrech, V. Strazzeri, & M. Elchalakani, “Improved thermal insulance of cement stabilised rammed earth embedding lightweight aggregates”, *Construction and Building Materials*, c. 268, s. 121075, 2021.
- [108] M. Pakand & V. Toufigh, “A multi-criteria study on rammed earth for low carbon buildings using a novel ANP-GA approach”, *Energy and Buildings*, c. 150, ss. 466–476, 2017.
- [109] S. Serrano, C. Barreneche, L. Rincón, D. Boer, & L. F. Cabeza, “Optimization of three new compositions of stabilized rammed earth incorporating PCM: Thermal properties characterization and LCA”, *Construction and Building Materials*, c. 47, ss. 872–878, 2013.
- [110] L. Birznieks, “Designing and Building with Compressed earth”, Yüksek Lisans Tezi, Delft Teknoloji Üniversitesi, Delft, Hollanda, 2013.
- [111] A. N. Daza, E. Zambrano, & J. A. Ruiz, “Acoustic performance in raw earth construction techniques used in Colombia”, *EuroRegio2016*, 2016, ss. 1–10.
- [112] J. D. Racusin & A. McArleton, *The Natural Building Companion: A Comprehensive Guide to Integrative Design and Construction*, Londra, İngiltere: Chelsea Green Publishing, 2012.
- [113] U. Röhlen & C. Ziegert, *Earth Building Practice: Planning-Design-Building*, Berlin, Almanya: Beuth Verlag, 2011.
- [114] A. W. G. Bruno “Hygro-mechanical characterisation of hypercompacted earth for building construction”, Yüksek Lisans Tezi, Pau Üniversitesi, Pau, Fransa, 2016.

- [115] İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, TS EN 1900-1, 2006.
- [116] Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages, ASTM E-519, 2003.
- [117] T. C. Rilem, “25-PEM. Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods”, *Material Structures*, c. 13, sayı 75, ss. 175–253, 1980.
- [118] F. Stazi, A. Nacci, F. Tittarelli, E. Pasqualini, & P. Munafò, “An experimental study on earth plasters for earthen building protection: The effects of different admixtures and surface treatments”, *Journal of Cultural Heritage*, c. 17, ss. 27–41, 2016.
- [119] Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components, FEMA-461, 2007.
- [120] Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM D2487-17, 2020.
- [121] M. Ramezanpour, A. Eslami, & H. Ronagh, “Seismic performance of stabilised/unstabilised rammed earth walls”, *Engineering Structures*, c. 245, s. 112982, 2021.
- [122] M. Emiroğlu, A. Yalama, & Y. Erdoğan, “Performance of ready-mixed clay plasters produced with different clay/sand ratios”, *Applied Clay Sciences*, c. 115, ss. 221–229, 2015.
- [123] T. Vergül, “The effects of silica fume and hydrophobic materials on mechanical and physical properties of clay plasters”, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2019.
- [124] T. T. Bui, Q. B. Bui, A. Limam, & S. Maximilien, “Failure of rammed earth walls: From observations to quantifications”, *Construction and Building Materials*, c. 51, ss. 295–302, 2014.
- [125] R. El-Nabouch, Q.-B. Bui, O. Plé, & P. Perrotin, “Assessing the in-plane seismic performance of rammed earth walls by using horizontal loading tests”, *Engineering Structures*, c. 145, ss. 153–161, 2017.
- [126] L. Miccoli, U. Müller, & P. Fontana, “Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob”, *Construction and Building Materials*, c. 61, ss. 327–339, 2014.
- [127] G. S. Pavan, S. N. Ullas, & K. S. Nanjunda Rao, “Shear behavior of cement stabilized rammed earth assemblages”, *Journal of Building Engineering*, c. 27, s. 100966, 2020.
- [128] R. A. Silva, O. Domínguez-Martínez, D. V Oliveira, & E. B. Pereira, “Comparison of the performance of hydraulic lime- and clay-based grouts in the repair of rammed earth”, *Construction and Building Materials*, c. 193, ss. 384–394, 2018.
- [129] M. E. Arslan, B. Aykanat, M. A. Ayyıldız, S. Subaşı, & M. Maraşlı, “Effects of basalt and glass fiber composites usage for strengthening on the cyclic behavior of brick infill walls”, *Journal of Building Engineering*, c. 52, s. 104405, 2022.
- [130] M. E. Arslan, B. Aykanat, S. Subaşı, & M. Maraşlı, “Cyclic behavior of autoclaved aerated concrete block infill walls strengthened by basalt and glass fiber

composites”, *Engineering Structures*, c. 240, s. 112431, 2021.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Batuhan AYKANAT

Yabancı Dili :İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	İnşaat Müh.	Düzce Üniversitesi	2024
Y. Lisans	İnşaat Müh.	Düzce Üniversitesi	2018
Lisans	İnşaat Müh.	Bayburt Üniversitesi	2018
Lise	Fen	Ulus Anadolu Teknik Lisesi	2009

YAYINLAR

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

[1] Ş. Eren, B. Poyraz, N. Gökçe, A. Şamandar, B. Aykanat, & S. Subaşı, "Investigation of the initiator effect on mechanical, thermal and chemical properties of polyesters used in composite material production", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, c. 33, s. 4, ss. 1383-1396, 2018.

[2] M.E. Arslan, B. Aykanat, S. Subaşı, & M. Maraşlı, "Cyclic behavior of autoclaved aerated concrete block infill walls strengthened by basalt and glass fiber composites", *Engineering Structures*, c. 240, s. 112431, 2021.

[3] B. Çomak, A. Bideci, B. Aykanat, & Ö. Sallı Bideci, "Determination of color homogeneity by image processing in cement based mortars", *Revista Romana de Materiale-Romanian Journal of Materials*, c. 51, s. 4, ss. 552-557, 2021.

[4] B. Çomak, B. Aykanat, Ö. Sallı Bideci, & A. Bideci, "Determination of homogeneity index of cementitious composites produced with eps beads by image processing techniques", *Computers and Concrete*, c. 29, s. 2, ss. 107-115 2022.

- [5] E. Yılmaz, B. Aykanat, & B. Çomak, “Environmental life cycle assessment of rockwool filled aluminum sandwich facade panels in Turkey”, *Journal of Building Engineering*, c. 50, s. 104234, 2022.
- [6] M. N. Olabi, N. Çağlar, M. E. Arslan, H. Öztürk, ...& B. Aykanat, “Response of nonconforming RC shear walls with smooth bars under quasi-static cyclic loading”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, c. 20, ss. 6683-6794, 2022.
- [7] M.E. Arslan, B. Aykanat, M. A. Ayyıldız, S. Subaşı, & M. Maraşlı, “Effects of basalt and glass fiber composites usage for strengthening on the cyclic behavior of brick infill walls”, *Journal of Building Engineering*, c. 52, s. 104405, 2022.
- [8] B. Çomak, B. Aykanat, S. Aydın, & M. Emiroğlu, “Characterization of cement-based spacers for high performance concretes”, *Journal of Building Engineering*, c. 57, s. 104780, 2022.
- [9] B. Aykanat, E. Ertürk, A. C. Altunışık, & M. E. Arslan, “Field investigation on reinforced concrete and masonry buildings damages after november 23, 2022 Golyaka (Duzce) Earthquake”, *Journal of Earthquake and Tsunami*, c. 17, s. 4, 2023.
- [10] B. Aykanat, M. E. Arslan, & A. Şen, “Effects of different wall openings on the cyclic behavior of aerated concrete block infilled rc frames”, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, c. 67, s. 4, 2023.
- [11] A. C. Altunışık, M. E. Arslan, V. Kahya, B. Aslan, ...& G. Osman, “Field observations and damage evaluation in reinforced concrete buildings after the February 6th, 2023, Kahramanmaraş-Türkiye Earthquakes”, *Journal of Earthquake and Tsunami*, c. 17, s. 6, 2023.
- [12] V. Kahya, A. F. Genç, F. Sunca, R. Boudjamaa, ...& T. Akgül, “Evaluation of earthquake-related damages on masonry structures due to the 6 February 2023 Kahramanmaraş-Türkiye earthquakes: A case study for Hatay Governorship Building”, *Engineering Failure Analysis*, c. 156, s. 107855, 2024.

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

- [1] A. Şen, M. E. Arslan, & B. Aykanat, “Gaz beton dolgu duvar pencere boşluklarının betonarme çerçeve davranışına etkilerinin deneysel olarak incelenmesi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 10, s. 2, ss. 652-664, 2023.
- [2] E. Ertürk, B. Aykanat, A. C. Altunışık, & M. E. Arslan, “Seismic damage assessment based on site observation following the Düzce (Gölyaka) earthquake (Mw = 5.9, November 23, 2022)”, *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, c. 4, s. 5, ss. 197-221, 2023.
- [3] M. E. Arslan, B. Aykanat, & M. Emiroğlu, “Effects of glass fiber usage on fracture energy and mechanical behavior of concrete: An experimental approach”, *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, c. 6, s. 1, ss. 70-83, 2023.
- [4] B. Atmaca, M. E. Arslan, M. Emiroğlu, A. C. Altunışık, ...& T. Akgül, “On the earthquake-related damages of civil engineering structures within the areas impacted by

Kahramanmaraş earthquakes”, *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, c. 6, s. 2, ss. 98-116, 2023.

Uluslararası kitaplar veya kitaplardaki bölümler:

[1] İ. Çelik, A. Bideci, B. Çomak, Ö. Sallı Bideci, & B. Aykanat, “Durability characteristics of lightweight concretes obtained with polyester coated pumice aggregates”, *Academic Researches in Engineering Sciences*, İzmir, Türkiye: Duvar Publishing, 2020, ss. 35-58.

[2] S. R. Aksoy, A. Bideci, B. Aykanat, Ö. Sallı Bideci, & B. Çomak, “Properties of waste rubber additive polymer concrete pumice aggregates”, *Current Researches in Engineering Sciences*, İzmir, Türkiye: Duvar Publishing, 2020, ss. 65-75.

[3] B. Çomak, B. Aykanat, A. Bideci, & Ö. Sallı Bideci, “Behavior of lightweight expanded polystyrene concrete containing blast furnace slag”, *Current Studies in Engineering Sciences*, İzmir, Türkiye: Duvar Publishing, 2021, ss. 6-17.

[4] B. Aykanat, & M. E. Arslan, “Rammed earth walls and cement stabilization”, *Advances in Engineering Sciences*, Ankara, Türkiye: Platanus Publishing, 2023, ss. 146-155.

[5] B. Aykanat, & M. E. Arslan, “Rammed earth: An eco-friendly construction technique”, *Academic Analysis and Discussion in Engineering*, Gaziantep, Türkiye: Özgür Publication, 2023, ss. 195-211.

