



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI STABİLİZASYON MALZEMELERİNİN SIKIŞTIRILMIŞ KİL
DUVARLARIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHMET YALAMA

EKİM 2015

DÜZCE

KABUL VE ONAY BELGESİ

Ahmet YALAMA tarafından hazırlanan "Farklı stabilizasyon malzemelerinin sıkıştırılmış kil duvarların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi" isimli lisansüstü tez çalışması, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 12.10.2015 tarih ve 2015/898 sayılı kararı ile oluşturulan jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Üye
(Tez Danışmanı)
Yrd. Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU
DÜ Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği EABD

Üye
Yrd. Doç. Dr. Sedat SERT
Sakarya Üniversitesi

Üye
Yrd. Doç. Dr. Mehmet Emin ARSLAN
Düzce Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 16.10.2015

ONAY

Bu tez ile Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Ahmet YALAMA'nın İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans derecesini almasını onamıştır.

Prof. Dr. Haldun MÜDERRİSOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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.

16 Ekim 2015

Ahmet YALAMA

Sevgili Aileme

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve bu tezin hazırlanması süresince gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU'na en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet Emin ARSLAN'a da şükranlarımı sunarım.

Bugüne kadar yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen, bugünlere gelmemi sağlayan ve hiçbir şekilde haklarını ödeyemeyeceğim sevgili annem Fatma, babam Ramazan ve kardeşim Nida YALAMA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma boyunca bana numune hazırlamada çok yardımcı olan İsmet AL, Mehmetcan YÜKSEK, Batuhan AYKANAT ve Bayram PEKTAŞ'a teşekkür ederim. Tez hazırlama ve kontrolde yardımcı olan arkadaşlarım Mine KURTAY ve Onur YEŞİLBAŞ'a çok teşekkür ederim. Özellikle değerli arkadaşım Abdulkерim AYDIN'a tezimin tüm aşamalarında yaptığı katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, TÜBİTAK 114M582 numaralı projesi ile desteklenmiş ve Düzce Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölüm laboratuvarlarında yürütülmüştür.

16 Ekim 2015

Ahmet Yalama

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR SAYFASI	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ÖZET	1
ABSTRACT	2
EXTENDED ABSTRACT.....	3
1. GİRİŞ.....	6
1.1 Amaç ve Kapsam	6
1.2 Geçmişten Günümüze Duvarlar	6
1.3 Sıkıştırılmış Kil Duvar.....	11
1.3.1 Sıkıştırılmış Kil Duvarın Tarihçesi	11
1.3.2. Sıkıştırılmış Kil Duvarın Üretim Şekli.....	12
1.3.3 Sıkıştırılmış Kil Duvarın Özellikleri	14
1.3.4 Literatür Araştırması	15
2. MATERYAL VE YÖNTEM	22
2.1. Malzemeler	22
2.1.1 Kil.....	22
2.1.2. Agrega	23
2.1.3. Su.....	24
2.1.4 Çimento.....	24
2.1.5 Yüksek Fırın Cürufu	25
2.1.6 Dolomit.....	26
2.1.7 Cam Lifi.....	28
2.2. Yöntem.....	28
2.2.1. Karışım Oranlarının Belirlenmesi	29
2.2.1.1 Kıvam (Atterberg) Limitleri	31
2.2.1.2 Birim Hacim Ağırlık.....	32
2.2.2. Optimum Su İçeriği ve Sıkıştırma Enerjisinin Belirlenmesi	32
2.2.2.1 Şıkıştırma (Proktor) Deneyi.....	32

2.2.3. Takviyeli (Stabilize) Karışımların Belirlenmesi.....	33
2.2.3.1 <i>Rezonans Frekansı</i>	34
2.2.3.2 <i>Ultras es Geçiş Hızı</i>	34
2.2.3.3 <i>Basınç Dayanımı</i>	35
2.2.3.4 <i>Eğilme Dayanımı</i>	35
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	36
3.1. Kıvam (Atterberg) Limitleri	36
3.2. Birim Hacim Ağırlık.....	36
3.3. Sıkıştırma (Proktor) Deneyi.....	38
3.4. Rezonans Frekansı.....	39
3.5. Ultras es Geçiş Hızı	40
3.6. Basınç Dayanımı	40
3.7. Eğilme Dayanımı.....	42
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	43
5. KAYNAKLAR.....	45
ÖZGEÇMİŞ.....	49

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. İlkel barınak örnekleri	6
Şekil 1.2. MÖ 8300 yıllarına ait Duvarlar Hallan Çemi Tepesi ve 10.000 yıl öncesinin Çayönü yerleşmesi	7
Şekil 1.3. Kerpiç tuğlalar ve derz aralarındaki kil harçları ve kerpiçten üretilen bir değirmenin kalıntıları	8
Şekil 1.4. Anadolu'dan kerpiç ev örnekleri	8
Şekil 1.5. İstanbul'da tarihi ahşap ev örnekleri	9
Şekil 1.6. Betonarme yapı örnekleri	9
Şekil 1.7. Yenilenebilir malzemelerden yenilenemeyen malzemelere olan bağımlılığı gösteren zaman çizelgesi	10
Şekil 1.8. Tarihi sıkıştırılmış kil duvar örnekleri	12
Şekil 1.9. Kil duvarın sıkıştırılma adımları	13
Şekil 1.10. Sıkıştırılmış kil duvar ile üretilen yapı örnekleri	15
Şekil 2.1. Çalışmada kullanılan kil örneği	22
Şekil 2.2. Kil tane boyut analizi sonucu	23
Şekil 2.3. Çalışmada kullanılan agrega	23
Şekil 2.4. Çalışmada kullanılan çimento	24
Şekil 2.5. Çimentoya ait tane boyut analizi sonucu	25
Şekil 2.6. Çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu	25
Şekil 2.7. Yüksek fırın cürufuna ait tane boyut analizi sonucu	26
Şekil 2.8. Çalışmada kullanılan dolomit	27
Şekil 2.9. Dolomite ait tane boyut analizi sonucu	27
Şekil 2.10. Kil, YFC, dolomit ve çimentoya ait karşılaştırmalı tane boyut analizi	28
Şekil 2.11. Çalışmada kullanılan cam lifi	28
Şekil 2.12. Çalışmada izlenen adımlar	29
Şekil 2.13. Karışım kodlama biçimi	29
Şekil 2.14. Ön karışımlara ait birim hacim ağırlık değerleri	30
Şekil 2.15. Ön karışımlara ait basınç dayanımı değerleri	30
Şekil 2.16. Kıvam (Atterberg) limit deneyleri	31

Şekil 2.17.	Yaş ve kuru haldeki numune örnekleri	32
Şekil 2.18.	Sıkıştırma (Proktor) deneyinden görüntüler	33
Şekil 2.19.	Silindir numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyi	35
Şekil 2.20.	Eğilme dayanımı deneyi	35
Şekil 3.1.	Takviyeli karışımlara ait birim hacim ağırlık değerleri	37
Şekil 3.2.	Sıkıştırma (Proktor) deney işlemleri	38
Şekil 3.3.	C5S5 karışımına ait sıkıştırma deney grafiği	39
Şekil 3.4.	Dinamik elastisite modülü deney sonuçları	39
Şekil 3.5.	Karışımlara ait ultrases geçiş hızı deney sonuçları	40
Şekil 3.6.	Karışımlara ait basınç dayanımı deney sonuçları	41
Şekil 3.7.	Eğilme dayanımı deney sonuçları	42

ÇİZELGE LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1.	Yığma yapı sistemlerinde taşıyıcı duvarların minimum basınç dayanımı	11
Tablo 2.1.	Kilin XRF analizi	22
Tablo 2.2.	Çimentonun kimyasal kompozisyonu ile fiziksel ve mekanik özellikleri	24
Tablo 2.3.	Yüksek fırın cürufuna ait kimyasal kompozisyon ve fiziksel özellikler	26
Tablo 2.4.	Çalışmada kullanılan dolomite ait kimyasal analiz sonucu	27
Tablo 2.5.	Takviyeli karışım oranları	33
Tablo 3.1.	Kilin kıvam (Atterberg) limitleri	36

SİMGELER VE KISALTMALAR

C	Kil
S	Agrega/Kum
Cim/Cem	Çimento
YFC	Yüksek fırın cürufu
Dol	Dolomit
GF	Cam lifi

ÖZET

FARKLI STABİLİZASYON MALZEMELERİNİN SIKIŞTIRILMIŞ KİL DUVARLARIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Ahmet YALAMA

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU

Ekim 2015, 50 Sayfa

Alternatif yapı teknikleri üzerine yapılan araştırmalar, çevreci yapıların önem kazanmasıyla artmaktadır. Dünya üzerinde çeşitli çevreci yapı malzemeleri ile üretilen yapı tasarımları bulunmakta olup bunlardan biri de sıkıştırılmış kil duvar tekniğidir. Sıkıştırılmış kil duvarlar, belirli oranlarda kil, agrega ve suyun karıştırılıp kalıp içerisine katmanlar halinde yayılarak sıkıştırılması ile üretilen çevreci, yenilenebilir, sağlıklı ve ekonomik bir yığma yapım tekniğidir. Ülkemizde kerpiç ve hıms gibi malzeme ve üretim tekniği açısından sıkıştırılmış kil duvarlara benzer yığma yapım uygulamalarına rastlanmakla birlikte, sıkıştırılmış kil duvarlar dayanım ve dayanıklılık açısından farklılık arz etmektedir. Ayrıca sıkıştırılmış kil duvarlar sağlık, enerji verimliliği ve çevreye duyarlılık gibi hususlarda yığma duvar sistemlerinden daha iyi performans sergilemektedir. Bu çalışmada, farklı kil/kum oranlarında numuneler hazırlanarak birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı kriterleri göz önünde bulundurularak en uygun kil/kum oranı belirlenmiştir. Daha sonra, maksimum kuru birim hacim ağırlıktaki optimum su oranını belirlemek için standart sıkıştırma (proktor) deneyi yapılmıştır. Devamında takviye yapılacak karışım oranları ile hazırlanan 15x30 cm silindir ve 10x10x50 cm prizma numuneler üzerinde basınç dayanımı, birim hacim ağırlık, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı, rezonans frekansı deneyleri yapıp en iyi özelliklere sahip karışımlar belirlenmiştir. Sonuç olarak, tüm kil duvar karışımlarının kuru haldeki birim hacim ağırlıklarının 2.05 gr/cm³ değerinden düşük olduğu; çimento, çimento-dolomit ve çimento-yüksek fırın cürufu takviyeli kil duvarların dayanım değerlerinin ülkemizin deprem yönetmeliğinde taşıyıcı duvarlardan istenen minimum 5 MPa kriterini sağladığı, ultrases geçiş hızı ve rezonans frekansı deney sonuçlarının elde edilen veriler ile tutarlılık gösterdiği, %10 çimento-%0.5 cam lifi ve %10 çimento-%1 cam lifi takviyeli sıkıştırılmış kil duvar numunelerinin en yüksek performansa sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cam Lifi, Dolomit, Sıkıştırılmış Kil Duvar, Yığma Yapı Sistemleri, Yüksek Fırın Cürufu

ABSTRACT

EFFECT OF DIFFERENT STABILIZATION MATERIALS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF RAMMED EARTH WALLS

Ahmet YALAMA

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Yrd. Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU

October 2015, 50 Pages

Alternative construction techniques have been searched based on increasing the importance of the green building. All over the world, various building designs have been seen produced with a variety of environmentally friendly building materials such as rammed earth wall construction. Rammed earth wall which is produced as compacting the mixture of certain amount of clay, aggregate and water layer by layer in the mold, is green, renewable, healthy and economic production technique. In our country, although buildings constructed with similar techniques to rammed earth in terms of materials and/or production techniques such as adobe and half-timbered construction have been seen, rammed earth walls have different mechanical and durability characteristics compared to them. Also, rammed earth walls have showed better performance on health, energy efficiency and environmental sensitivity compared to alternative structural wall systems. In this study, suitable clay / sand ratio have been determined as preparing different clay/sand ratio samples considering unit weight and compressive strength criteria. Then, standard proctor test has been used to determine the optimum water content at maximum dry density. Afterwards compressive strength, unit weight, flexural strength, ultrasonic pulse velocity, the resonance frequency experiments will be made on 15x30 cm cylinder and 10x10x50 cm prism stabilized rammed earth samples. The mixtures that show the best test results will be evaluated. As a result, it was identified that dry density of all rammed earth walls are lower than 2.05 gr/cm³; all rammed earth walls stabilized with cement, cement-dolomite, cement-blast furnace slag meet the requirement of minimum 5 MPa compressive strength according to earthquake regulations of Turkey on masonry construction systems, results of the ultrasonic pulse velocity and the resonance frequency tests show compatibility with the data obtained from compressive strength test and also, rammed earth walls reinforced with 10% cement-0.5% glass fiber and 10% cement-1% glass fiber have the highest performance in terms of physical and mechanical properties.

Keywords: Glass Fiber, Dolomite, Stabilized Rammed Earth, Masonry Construction System, Blast Furnace Slag

EXTENDED ABSTRACT

EFFECT OF DIFFERENT STABILIZATION MATERIALS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF RAMMED EARTH WALLS

Ahmet YALAMA

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Yrd. Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU

October 2015, 50 pages

1. INTRODUCTION:

In primitive societies, home culture which has gone through many evolutions until today starts with producing structures using the stone and wood for the purpose of sanctuary. In advancing periods, using clay as a binder in the structures produced with stone, plastering walls with clay and in the ongoing century, structures produced by putting clay and straw mixture into the molds and drying them under the sun (adobe) have been used by mankind. It is possible to see these structures or their remains even nowadays. Rammed earth wall which is produced as compacting the mixture of certain amount of clay, aggregate and water layer by layer in the mold, is a simple green construction technique. Recent studies showed that physical, mechanical, thermal etc. properties and changes in bond strength had been investigated on rammed earth walls reinforced and/or replaced with some stabilizers such as cement, fly ash, etc., various fibers. But it was seen that some materials such as dolomite and blast furnace slag were not used as stabilizers on rammed earth walls. In this study, physical and mechanical properties of rammed earth walls stabilized with dolomite, blast furnace slag and cement were investigated comparatively. Besides, glass fiber was used in dolomite, blast furnace slag and cement stabilized rammed earth walls.

2. MATERIAL AND METHODS:

This thesis consisted of 3 basic stages. First one is determining the suitable clay/sand ratio according to unit weight and compressive strength test results. Low unit weight and high compressive strength was the parameters to determine the ratio. The pre-studies show that C5S5 was chosen as suitable clay/sand ratio to use stabilized rammed earth mixtures. Next, optimum water content and compaction energy was determined with Standard Proctor Test. Stabilizing chosen mixture with dolomite, blast furnace slag, cement and also glass fiber and performing unit weight, ultrasonic pulse velocity, resonance frequency, compressive strength and flexural strength tests on the 15x30 cm cylinder 10x10x50 cm prismatic specimens were the last stage.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS:

It was identified that dry density of all rammed earth walls are lower than 2.05 gr/cm^3 . When the stabilized mixtures considered, physical and mechanical performance of all stabilized mixtures were better than reference mixture. That positive effect was observed especially on cement, cement-dolomite and cement-blast furnace slag stabilized mixtures and also all rammed earth walls stabilized with cement, cement-dolomite, cement-blast furnace slag met the requirement of minimum 5 MPa compressive strength according to earthquake regulations of Turkey on masonry construction systems. The results of the ultrasonic pulse velocity and the resonance frequency tests showed parallelism with the data obtained from compressive strength test and also, rammed earth walls named as CEM10 and CEM10-GF1 had the highest performance in terms of physical and mechanical properties.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK:

The results obtained in this study indicate that;

- C5S5 was found as suitable clay/sand ratio considering unit weight and compressive strength test and 13.5% water content as optimum water content according to standard proctor test.
- A positive effect was observed especially on cement, cement-dolomite and cement-blast furnace slag stabilized mixtures which could be used as stabilized walls in terms of load bearing situations.
- Glass fiber (12mm length) had a positive effect on compressive strength of all

mixtures.

- Results of the ultrasonic pulse velocity and the resonance frequency tests showed consistency with the data obtained from compressive strength test.
- All rammed earth walls stabilized with cement, cement-dolomite, cement-blast furnace slag met the requirement of minimum 5 MPa compressive strength according to earthquake regulations of Turkey on masonry construction systems.

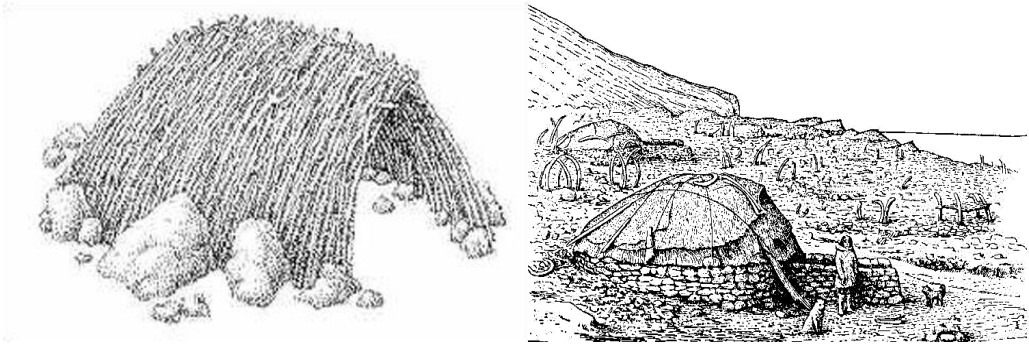
1. GİRİŞ

1.1. AMAÇ VE KAPSAM

Tezin amacı, eski çağlardan beri insanoğlunun tercih ettiği ve günümüze kadar varlığını sürdüren örneklerine rastladığımız sıkıştırılmış kil duvarların çimento, yüksek fırın cürufu, dolomit ve cam lifi gibi malzemelerle takviye edilerek performanslarının artırılmasıdır. Ayrıca taşıyıcı ya da taşıyıcı olmayan yığma duvar sistemlerine göre daha iyi (termal, ekonomiklik, çevreye duyarlılık ve sağlık gibi) özelliklere sahip ve tamamen yerli hammadde ile üretilebilen sıkıştırılmış kil duvar tekniği hakkında ülkemiz açısından bilgi birikimi sağlanması da çalışmanın amaçlarından biridir.

1.2. GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE DUVARLAR

İnsanoğlunun mağara ve kaya sığınağı türünden doğal barınakları terk edip yapay konutlar oluşturmasından itibaren duvar inşa etme sorunu hep var olmuştur. İlk yapay barınaklar günümüzden yaklaşık 40.000 yıl önce ortaya çıkmaktadır. Bunlar temelsiz olarak toprağa sokulan dallardan oluşan, genellikle dairesel planlı kulübelerdir (Şekil 1.1). İç-dış mekân ilişkisini kesmek için büyük ihtimalle dalların üzeri deri ve postlarla kaplanmaktaydı. Dolayısıyla, duvar kavramı bu dönemde giysi kavramından tam anlamıyla farklılaşmış değildir. (Başgelen N., 1993).



Şekil 1.1. İlkel barınak örnekleri (URL – 1)

İnsanların "dört duvar" arasındaki yaşantısının ilk kez ne zaman, nerede başladığı bugün için tam olarak saptanmış değildir. Ancak duvar dediğimiz olgunun dünya üzerinde bilinen en eski ve önemli örnekleri Türkiye toprakları üzerinde yer almaktadır. Batman

suyu vadisinde Hallan Çemi Tepesinde 1992'de yapılan kazı çalışmalarında MÖ 8300 yıllarına ait Anadolu'nun bilinen en eski duvarları gün ışığına çıkarılmıştır. Diyarbakır İli Ergani ilçesi yakınlarındaki, günümüzden yaklaşık 10.000 yıl öncesinin Çayönü yerleşmesi, neolitik devir olarak da tanımlanan ilk besin üretimciliğine geçiş evresinin çarpıcı mimarisiyle ünlüdür. Yapı biçiminin yuvarlak planlı dal örgü kulübelerden, taş temelli kerpiçten dört duvarlı bina yapımına doğru nasıl bir gelişme gösterdiği en iyi şekilde burada izlenmektedir (Şekil 1.2). Buradaki yapılaşmanın sonraki aşamalarında ise bir taş platformun üzerindeki subasmanın üzerine kerpiç çamuru dökülerek yapılan ilk kerpiç duvarlı barınaklar görülmektedir (Başgelen N., 1993).



Şekil 1.2. MÖ 8300 yıllarına ait Duvarlar Hallan Çemi Tepesi ve 10.000 yıl öncesinin Çayönü yerleşmesi (Başgelen N., 1993)

Doğu Anadolu'da uygulanan, İngiliz halk mimarlığında yakın dönemlere kadar kullanılan ve Güney Afrika'nın kimi bölgelerinde hala yaygın bir biçimde kullanılmaya devam eden dökme kerpiç sistemi, balçığın taş temelin üstünden başlayarak bir kalıp içine yerleştirilip sıkıştırılması şeklinde yapılmaktadır. Dökme kerpiçten sonraki aşama; kalıplanmış kerpicingin, yani saman kırıklarıyla balçığın karıştırılıp kerpiç tuğlanın yapımıdır. Ancak M.Ö. 7000-6500 yıllarında kalıplanmış kerpiç malzeme henüz tuğla olarak nitelendirilmeyecek kadar büyük boyutlardadır. M.Ö. 6000 yılından itibaren dev kerpiçler tuğla denilebilecek boyutlara indirgenmiş ve 40 cm'yi geçmeyecek şekilde üretimi yapılmıştır (Şekil 1.3). Arkeologlar M.Ö 5000 yıllarında Çin'de sıkıştırılmış kil duvar tekniğinin kullanıldığını ve M.Ö 2000 yıllarında yaygınlaşmaya başladığını keşfetmişlerdir (Başgelen N., 1993; Yuan vd., 2011).



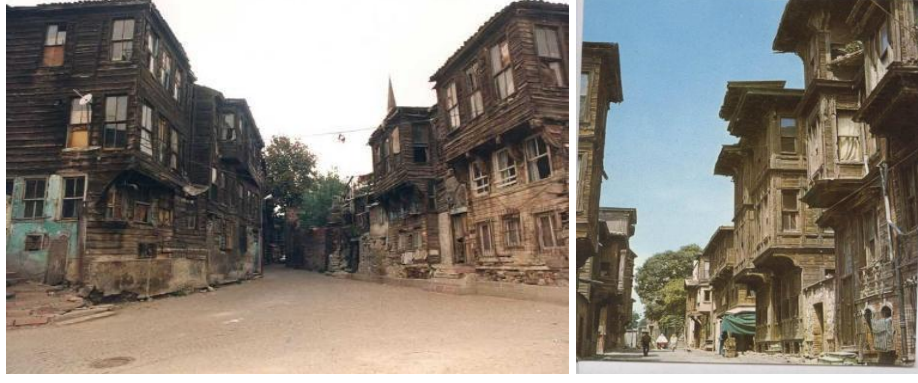
Şekil 1.3. Kerpiç tuğlalar ve derz aralarındaki kil harçları ve kerpiçten üretilen bir değirmenin kalıntıları (URL - 4; URL - 5)

M.Ö. 3000'den başlayarak duvar yapım tekniklerinde yeni arayışlar başladığına dair pek çok ipucu vardır. Moloz taş duvarlar, artık ele geçen her malzemenin birbiri üstüne yığılmasıyla değil, taşların oluşturduğu örgüde, daha doğru işlevselleştirilmesi ile meydana gelmektedir. Önceleri kuru olarak örülürken, sonraları aralarının toprak harçla bağlandığı ve üzerlerinin de kille sıvandığı görülmektedir (Şekil 1.4) (Başgelen N., 1993).



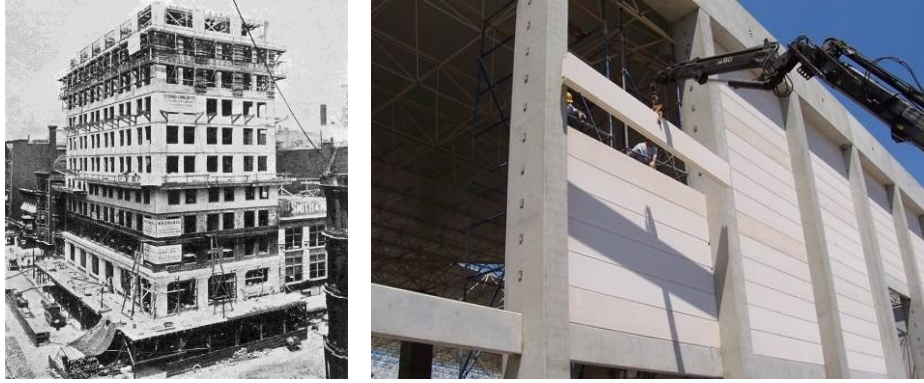
Şekil 1.4. Anadolu'dan kerpiç ev örnekleri (URL – 6; URL – 7)

Özellikle 17. yüzyıl sonlarından itibaren, dünyanın belli başlı merkezlerindeki sivil yapılarda geniş ölçüde ahşap kullanılmaya başlanmıştır. Böylece mimarlar ahşap kullanımının getirdiği rahatlık ve kolaylıklardan yararlanarak bu alanda en güzel ve görkemli eserleri meydana getirmişlerdir (Şekil 1.5). İç-dış mimaride belli bir üslup ve biçim olgunlaşmıştır. Ahşap mimari, tüm bu zenginliğine ve kolaylığına rağmen ateş karşısında kolayca yanmaktaydı (Başgelen N., 1993).



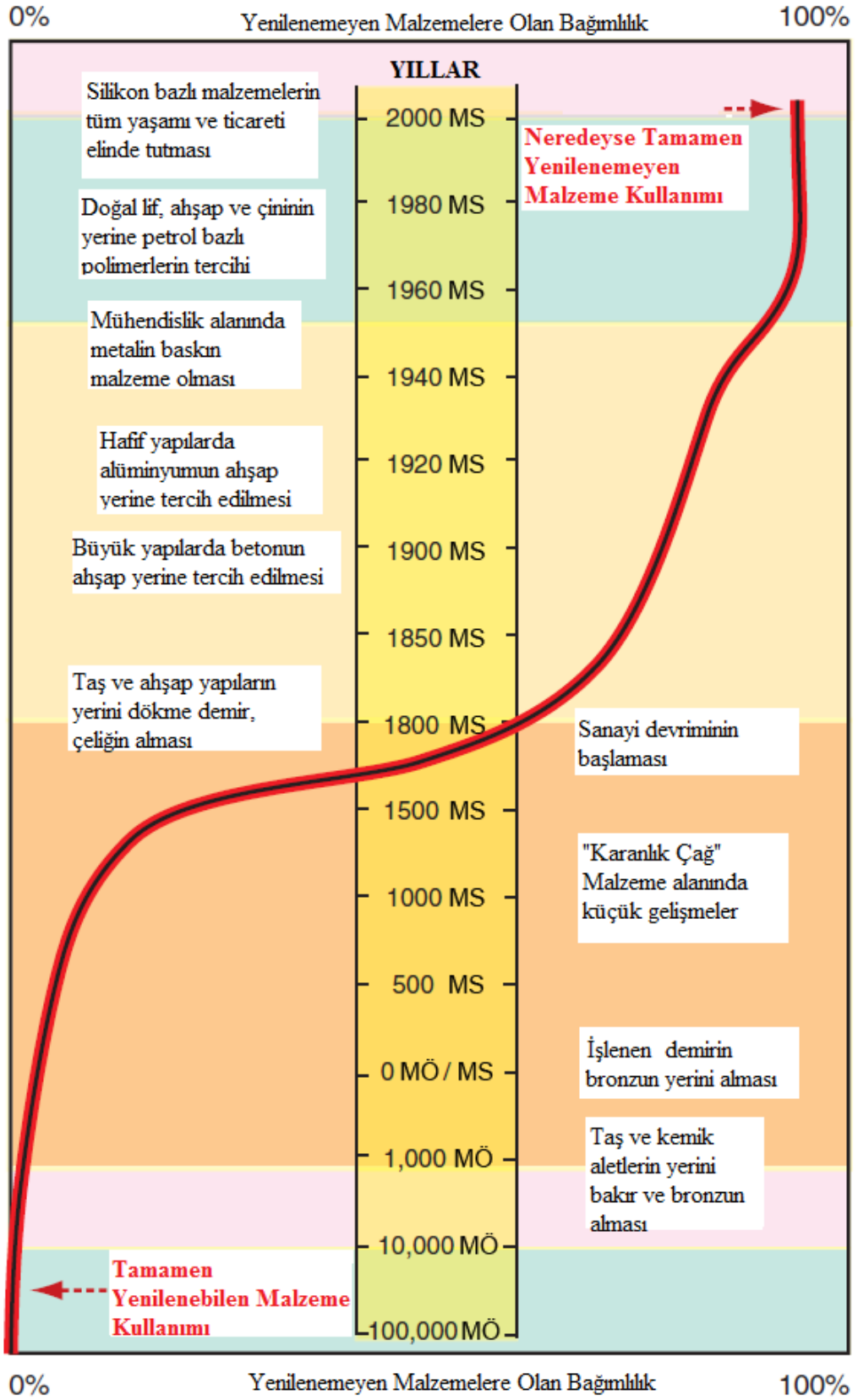
Şekil 1.5. İstanbul’da tarihi ahşap ev örnekleri (URL – 8)

Köşk tipi inşaat 1. Dünya Savaşına kadar revaçta bir yap tarzı olmuştur. Bu yapı tarzı savaş sonrası şartları nedeniyle ortadan kalkmış, yapılarda ahşap kullanımı da büyük ölçüde azalarak yerini çimentonun da bulunması ile betonarme inşa tarzına bırakmıştır (Şekil 1.6). Son zamanların inşaat sektöründe kullanılan en yaygın yapı malzemesi olmakla birlikte beton ve çeliğin yol açtığı bu değişim, günümüzün yerleşim birimlerini doğadan kopuk, çok katlı binalarla doldurmaktadır. (Başgelen N., 1993; Erdoğan S. T. ve Erdoğan T. Y. ,2007).



Şekil 1.6. Betonarme yapı örnekleri (URL – 10; URL – 11)

300 yıl kadar küçük bir süre insanlık taş, tahta, deri, kemik ve doğal elyaf gibi tamamen yenilebilir malzemeler kullanmıştır. Yenilenemeyen bakır, demir, kalay, çinko gibi malzemeler küçük oranda kullanılmıştır. Gittikçe bağımlılığın doğası değişmiş ve 20. yy. sonuna kadar yenilenebilir materyallerin yerini neredeyse tamamen yenilenemeyenler almıştır. Günümüzde dünyadaki kaynakların sınırsız olmadığı bilinci geç de olsa fark edilerek bunu az da olsa düzeltmeye yönelik çevreci çözümler birçok alanda ortaya koyulmaktadır (Şekil 1.7) (Ashby M. F., 2009).



Şekil 1.7. Yenilenebilir malzemelerden yenilenemeyen malzemelere olan bağımlılığı gösteren zaman çizelgesi (Ashby M. F., 2009)

1.3. SIKIŞTIRILMIŞ KİL DUVAR

1.3.1. Sıkıştırılmış Kil Duvarın Tarihçesi

İlkel toplumlarda sığınma amacıyla taş ve ağaç ile üretilen yapılarla başlayan ev kültürü, günümüze kadar birçok evrim geçirmiştir. İlerleyen dönemlerde taşla imal edilen yapılarda killerin bağlayıcı bir malzeme olarak kullanılması, duvarların kil ile sıvanması ve ileriki yüzyıllarda kalıplara konulan kil ve samanın karışımının güneşte kurutulmasıyla üretilen kerpiçten inşa edilen yapılar insanoğlu tarafından kullanılmıştır. Bu yapıları veya kalıntılarını günümüzde dahi görmek mümkündür (Başgelen, 1993). Bunun yanında kil gerek fırında pişirilerek üretilen tuğlalarda gerekse agrega ile sıkıştırılarak elde edilen, taşıyıcı/taşıyıcı olmayan elemanlar olarak eski yapılarda pek çok şekilde kullanılmıştır. Bu yapım tekniklerinde kullanılan temel malzemeler benzer olmasına rağmen, üretim teknikleri ve/veya kütleme koşulları farklılık göstermektedir. Bu yüzden her bir yapım tekniği ile üretilen elemanlar farklı fiziksel, mekanik, kimyasal özelliklere sahiptirler. Bu yapım tekniklerine ait literatürde mevcut olan minimum dayanım kriterleri Tablo 1.1'de gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Yığma yapı sistemlerinde taşıyıcı duvarların minimum basınç dayanımı

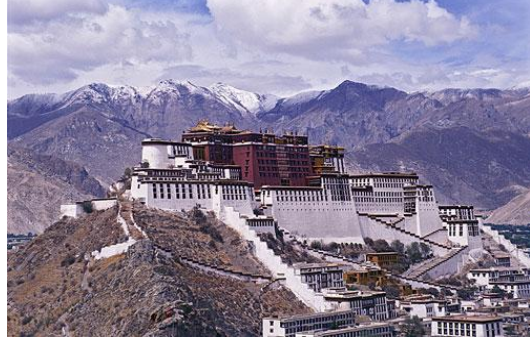
Duvar Sistemi	Taşıyıcı Duvarın Min. Taşıma Kapasitesi (MPa)	Boyutlar (cm)
Kerpiç	2 (TS537, 1985)	19
Taş Duvar	10 (Deprem Yönetmeliği, 2007)	50
Tuğla	5 (Deprem Yönetmeliği, 2007)	19
Gaz Beton G4	5 (Deprem Yönetmeliği, 2007)	60x25x20
Sıkıştırılmış Kil Duvar	2 (Ciancio vd. 2013) , 5 (Deprem Yönetmeliği, 2007)	20-60

Sıkıştırılmış kil duvar teknolojisi binlerce yıldır var olan ve o zamanlarda monolitik duvarlar yapmak için kullanılan antik bir yapı tekniğidir. Bu yapım tekniği günümüzde de varlığını sürdürmekte ve uzun ömürlülüğü sayesinde kullanımı devam etmektedir. Sıkıştırılmış kil elemanlar Çin ve Akdeniz çevresinde yaygın olarak kullanılmış ve buradan insanların göçü ve fikirleriyle farklı ülkelere, kültürlere yayılmıştır. Dünyanın dört bir yanına dağılmış tarihi sıkıştırılmış kil elemanlar, günümüzde modern teknikler kullanarak üretilen sıkıştırılmış kil elemanların gelişimi açısından üreticilere birçok bilgi sağlamaktadır. Çin Seddi'nin büyük bir bölümü, Granada'daki Alhambra ve Ltasha'daki Potala Sarayı gibi ünlü yapılar sıkıştırılmış kil duvarla üretilmiştir.

Avrupa'daki birçok kale ve Piramitlerin bir bölümü sıkıştırılmış kil duvar olarak yapıp sonradan taş ile birleştirilmiştir (Şekil 1.8). Bunların tamamı hem yüzyıllar öncesinden inşa edilip günümüze kadar ulaşmış eserler hem de sıkıştırılmış kil teknolojisinin uzun ömürlülüğünün gözle görünür kanıtlarıdır (Jaquin vd., 2008; URL-1).



a) Alhambra - Granada/İspanya (URL-2)



b) Potala Palace- Lhasa/Tibet (URL-3)



c) Çin Seddi/Çin (URL-4)



d) 1300 Yıllık Sıkıştırılmış Kil Duvar Horyuji Temple/Japonya (Hall ve Djerbib, 2004)

Şekil 1.8. Tarihi sıkıştırılmış kil duvar örnekleri

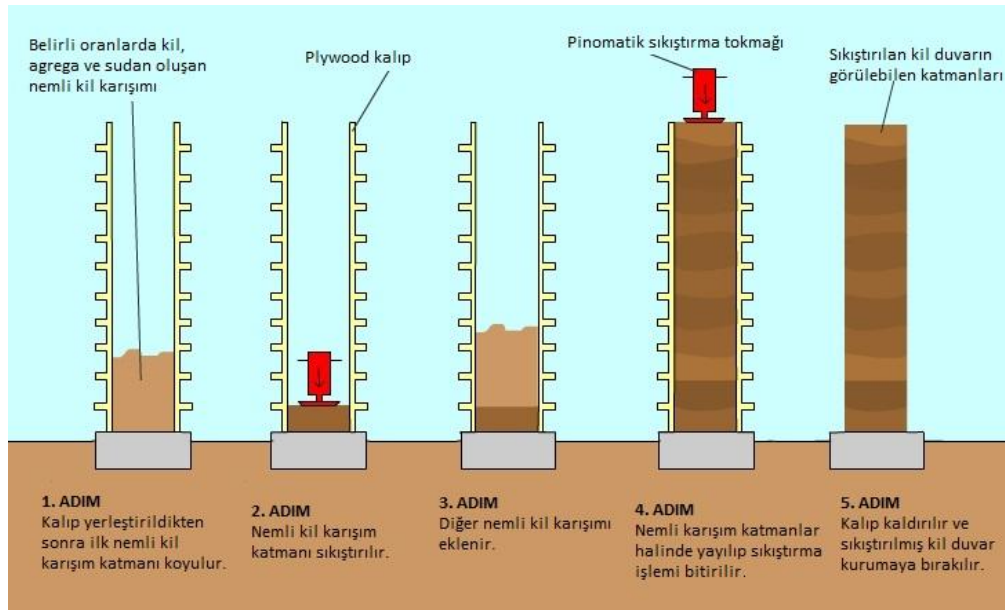
Dilimizde "dövme kil duvar" ya da "sıkıştırılmış kil duvar" olarak ifade edilebilecek "rammed earth wall" bu çalışmada sıkıştırılmış kil duvar olarak adlandırılacaktır.

1.3.2. Sıkıştırılmış Kil Duvarın Üretim Şekli

Sıkıştırılmış kil duvar, agrega, su ve kilin belirli miktarlarda karıştırılıp kalıp içerisinde homojen kütle oluşturacak biçimde katmanlar halinde yayılıp sıkıştırılmasıyla yapılan basit bir yapım tekniğidir (Şekil 1.9). Sıkıştırılmış kil duvarların stabilize edilen ve stabilize edilmeyen sıkıştırılmış kil duvar olmak üzere 2 türü vardır.

- a) Stabilize edilmeyen sıkıştırılmış kil duvarlar, agrega (çakıl ve kum), su ve temel bağlayıcı (kil ve silt) karışımıdır.
- b) Stabilize edilen (takviyeli) sıkıştırılmış kil duvarlarda ise ana malzemelere ek olarak kireç veya hayvan kanı gibi geleneksel stabilize malzemelerinin yanı sıra günümüzde çimento ve asfalt emülsiyonlarının da stabilizer malzeme seçenekleri arasında yer aldığı türdür. Stabilizasyon, kil duvarın suya dayanıklılığını arttırmak ve/veya basınç dayanımını yükseltmek gibi amaçlarla uygulanır (Yuan vd., 2011).

Sıkıştırma işlemi bittikten sonra kalıplar hemen sökülebilmekte ancak duvarın kuruyup dayanım kazanması için ılık ve kuru günler gerekmektedir. (URL-1).



Şekil 1.9. Kil duvarın sıkıştırılma adımları (URL-5)

2013 yılında kil yapı elemanları üzerine yapılan bir analizde sıkıştırılmış kil duvarlarda kalıplar kaldırılıp kür başladıktan sonra ufak rütuşlar dışında başka bir işleme gerek duyulmamasının bu yapı elemanının en büyük avantajlarından biri olduğu ve kerpiç tuğlaların aksine daha nemli iklimlerde yapı elemanı olarak kullanılabilceği bildirilmiştir. Üstelik kerpiç yapılarda çatlaklara neden olabilen ve bu yüzden az olması istenen kil miktarının sıkıştırılmış kil duvar elemanlarda başlangıç su içeriğinin çok düşük olması sebebiyle daha yüksek kil oranına (%15-18 oranlarında) sahip olmasının tercih sebebi olabileceği belirtilmiştir (Niroumand vd., 2013).

1.3.3. Sıkıştırılmış Kil Duvarın Özellikleri

Binaların çevreye olan etkileri salgıladıkları CO₂ gazıyla, su kullanımıyla, elektrik tüketimi ve atıklarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu yapıların çevreye olan etkilerinin azaltılması özellikle son dönemde insanların bilinçlenmesiyle üstünde durulan bir konu haline gelmiştir (URL-6). Binalarda kullanılan yapı malzemelerinin çevreci (yeşil) malzemeler olarak tanımlanabilmesi için bunların çevreye duyarlılık, yenilenebilirlik, enerji verimliliği gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir. Kil bilinen en eski ve tamamen doğal bağlayıcı malzemelerden olup, pişmemiş ya da düşük sıcaklıklarda pişirilmiş kil ile üretilen yapı elemanları da yukarıda bahsedilen özelliklere sahip yapı malzemelerindedir.

Buna göre sıkıştırılmış kil duvarların tercih edilebilirliğinin ana sebeplerini şöyle sıralayabiliriz:

- Düşük karbondioksit emisyonuna sahip ve çevre dostudur.
- Sıkıştırılmış kil duvar yıkıldıktan sonra tekrar geri dönüştürülebilir.
- Tasarımı ve yapımı hızlı olan sıkıştırılmış kil duvarın maliyeti oldukça düşüktür.
- Isı ve ses yalıtımı sağlar. İç mekan ısı dengesini düzenler.
- Bakım masrafı düşüktür.
- Dayanımı iyi, dayanıklı ve uzun ömürlüdür.
- Ateşe (ısıya) ve haşerelere karşı dirençlidir (URL-1; Yuan vd., 2011).

Bunların yanı sıra sıkıştırılmış kil duvarlar taşıyıcı/taşıyıcı olmama durumuna göre genel olarak 20-60 cm arasında değişen kalınlıkta sahiptirler. Basınç dayanımları yaklaşık olarak 20 kgf/cm² (2 MPa) civarındadır. Yüzeyleri alçı ile kaplanabilir, sıva yapılabilir veya yüzey çıplak bırakılabilir. Her yapı türünde ve her çatı çeşidiyle kullanılabilirler. Kışın güneş ışığını depolarken yazın bloke eder ve binanın enerji korunumuna katkı sağlar. Sıkıştırılmış kil duvar dayanım kazanmaya hemen başlar, bu işlem hava şartlarına ve nemlilik durumlarına bağlı olarak birkaç aydan birkaç yıla kadar sürebilir (URL-1).

Dış ülkelerin aksine ülkemizde sıkıştırılmış kil duvar tekniğinin kullanımı yok denecek kadar azdır. Aşağıda Avusturalya'da sıkıştırılmış kil duvar teknolojisiyle inşa edilen bir hayvan hastanesi görülmektedir. Hastane gibi sağlık koşullarının büyük önem arz ettiği

yapıların betonarme, kagir vb. yapı malzemelerinin yerine sıkıştırılmış kil elemanlar ile üretilmesi sağlığa verilen önemi göstermektedir (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. Sıkıştırılmış kil duvar ile üretilen yapı örnekleri (URL-7; URL-8; URL -9)

Tüm bunların yanında toprak sınıflarının ve özelliklerinin anlaşılması, materyallerin kimyasının incelenme olanağı bulunması, günümüz deney ve yöntemleri ile sonuçların daha net elde edilmesi sayesinde modern teknikler ile üretilen sıkıştırılmış kil duvarlı yapılar; betonarme, tuğla ve ahşap elemanlar ile inşa edilen yapılara alternatif olarak görünmektedirler.

1.3.4. Literatür Araştırması

Konu ile ilgili yapılan literatür özeti konu bütünlüğünü sağlayacak şekilde aşağıda verilmektedir.

Darling vd. (2012) kilin, iç mekan hava kalitesi üzerine etkisini belirlemeye çalışmışlardır. Paslanmaz çelik malzeme ile iki adet 30 m³ hacminde oda üretilmiş ve 3 değişken kullanarak iç hava kalitesi ölçülmüştür. Bunlar; insan sağlığına zararlı olan ozon gazı, naylon lifli halı ve son araştırmalarda pasif temizleyici malzemelerden olduğu ortaya çıkan kil olarak belirlenmiştir. Sadece naylon lifli halı ve belirli miktarda

ozon gazının bulunduğu odada zamanla ozon gazı miktarının arttığı; içerisi kil ile sıvanan odaya belirli miktar ozon gazı bırakıldığında ise zamanla ozon gazının azaldığı görülmüştür. Halı ve kil sıvanın bulunduğu odaya ozon gazı salındığında ise gazın zamanla azaldığı belirlenmiştir. Çalışma sonucunda kilin sağlık açısından üstün özelliklere sahip olduğu vurgulanmıştır.

Collet vd. (2006) güneye bakan yalıtımlı betonarme blok (20 cm) ile 50 cm kalınlığındaki geleneksel kerpiç duvarı karşılaştırmışlardır. Betonarme duvara 5 -15 cm aralığında yalıtım yapılmıştır. 50 cm kalınlığındaki kerpiç duvarın ısı geçirgenliğinin yaklaşık olarak 7.5 cm'lik yalıtımı olan betonarme duvara eş değer olduğunu belirtmiş ve kerpiç duvara 5 cm'lik yalıtım yapıldığında ise betonarme duvarın 15 cm'lik yalıtım değerine eşit olduğunu saptamışlardır.

Taylor ve Luther (2004) çalışmalarında sıkıştırılmış kil duvarın ısı konfora etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, yaz aylarında Avustralya'da New South Wales'teki bir ofis binasında 30 cm'lik sıkıştırılmış kilden imal edilmiş iç ve dış duvarların ısı davranışları taban, tavan ve pencere arasındaki ilişkiye dikkat edilerek analiz edilmiştir. Sonuç olarak, dış duvarların az da olsa ısıyı geçirdiğini ancak iç duvarların bunu emerek konforlu bir ortam oluşturduğunu saptamışlardır.

Maddison vd. (2009) kil-kum karışımına iki farklı lif ikamesiyle su (nem) emme ve kuma kapasitesindeki değişimleri incelemiştir. 10 mm kalınlığındaki kil-kum karışımı panellere ağırlıkça %0.5-2 arasında değişen doğal lif takviyeleri yapılmış ve karşılaştırma yapmak için boyanmış alçıpan paneller kullanılmıştır. Klimatik oda içerisindeki nem aniden %50'den 80'e çıkarılmış (emme) ve aniden %80'den %50'ye düşürülmüştür (kuma). Lif takviyesi kil-kum panellerin ağırlığını azaltması, su emmeyi hızlandırıp arttırması şeklinde pozitif etkilere sebep olmuştur. Üretilen tüm kil numunelerinin 12 saat sonunda emdiği su oranıyla aynı ölçüde suyu serbest bıraktığını, su emmenin su kusmasına göre daha yavaş gerçekleştiğini ve alçıpan panellerin ise emdikleri suyu kusmada önemli ölçüde yavaş olduğunu bildirmişlerdir.

Hall ve Djerbib (2004) sıkıştırılmış kil duvar örnekleri hazırlayarak optimum çakıl, kum, silt ve kil miktarını belirlemeye çalışmışlardır. Sıkıştırma (Proktor) deneyi ile uygun nem içeriği ve kuru birim hacim ağırlığı ilişkisi elde edilmiştir. Belirli bir sıkıştırma enerjisi için sıkıştırılmış kil duvar örneklerinde toprak sınıfına bağlı kuru

birim hacim ağırlıktaki değişimin basınç dayanımını direkt olarak etkilemediğini vurgulamışlardır.

Ciancio vd. (2013) sıkıştırılmış kil duvarda kullanılan malzemelerin günümüze kadar kullanılan karışım oranlarının güvenilirliğini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Karşılaştırmaları yayınlanan standart, bülten ve makalelerdeki öngörülen veya elde edilen performans değerlerine göre yapmıştır. Beşi çimento ve/veya kireç ile stabilize edilmiş on karışım üzerinde; basınç dayanımı, rötre ve erozyon özellikleri baz alınarak testler yapılmıştır. Uygulanan hızlandırılmış erozyon testini stabilize edilmeyen hiçbir numune geçememiştir. Ancak bu test yönteminin sıkıştırılmış kil duvarların erozyon parametresini belirlemek için uygun olmadığını; bunun nedenini ise servis ömrü boyunca bu tür bir etki ile karşılaşmayacağına bağlamıştır. Kuruma büzülmesi deneyinde ise 28 günlük numunelerde çıplak gözle hiç çatlak görülmemiştir. Yapılan çalışma sonucunda, tane dağılımı kriterinin sıkıştırılmış kil duvar karışımlarının kullanılabilirliğinde tek başına etken olmadığını bildirmişlerdir. Bülten, el kitabı ve Yeni Zelanda standartlarının doğrusal büzülme değerlerinin gerçekçi olmadığını ve Walker vd., (2005)'in yaptıkları çalışmanın daha uygun bir kritere (<%5) sahip olduğunu bildirmiştir.

Bui vd. (2009) farklı tiplerdeki stabilize edilen/edilmeyen 40 cm kalınlığındaki sıkıştırılmış kil duvarları nemli iklime sahip bir ülkede (Fransa) 20 yıl boyunca hava şartlarına maruz bırakarak dayanıklılığını incelemiştir. Duvarlardaki erozyonu ölçmek için stereo-photogrammetry yöntemini geliştirmişlerdir. 20 yılın ardından duvarların hiçbirinde parçalanma gözlenmemiştir. Ortalama erozyon derinliği %5 hidrolik kireçle stabilize edilen sıkıştırılmış kil duvarlarda 2 mm (duvar kalınlığının %0.5'i) ve stabilize edilmeyen duvarlarda ise 6.4 mm (duvar kalınlığının %1.6'sı) olarak belirlenmiştir. Özellikle takviyeli sıkıştırılmış kil duvarlarda duvarı dış etkilerden korumak için sıva yapmaya gerek olmadığını bildirmişlerdir.

Hall ve Allinson (2009a) çimento ikameli kil duvarın kuru hali ve nem içeriğine bağlı ısı iletkenliği üzerinde zemin sınıfının etkisini değerlendirmişlerdir. Karışım miktarları CRATerre (International Centre for Earthen Architecture) dikkate alınarak belirlenmiştir. Kil suyla karıştırılmadan önce kütlece %6 oranında CEM II A eklenmiş, sıkıştırma (Proktor) deneyi ile optimum nem içeriği ve kuru birim ağırlık ilişkisi belirlenmiştir. İyi sıkıştırılan çimento ikameli kil duvarların ısı iletkenliği ile kuru birim

hacim ağırlıkları veya boşluk oranları arasında bir korelasyon bulunmadığını; iletkenliğin karışımın gradasyonu ile etkilenebildiğini ortaya koymuşlardır. Çimento ikameli kil duvar malzemelerinin ısı iletkenliğinin, doyunluk derecesi (S_r) ile doğrusal olarak arttığını bildirmişlerdir.

Hall ve Allison (2009b) çalışmalarında takviyeli kil duvarın higrotermal özelliklerinin (nem depolama fonksiyonu, buhar geçirgenliği, sıvı geçirgenliği, ısı iletkenliği, ısı kapasitesi gibi) deneysel olarak nasıl ölçüleceği ve bu özelliklerin değişen kil duvar karışım oranlarından nasıl etkilendiğine değinmişlerdir. Çalışmalar sonucunda daha yüksek porozitenin hacimsel ısı kapasitesini azalttığını; ancak su emme ve buhar geçirgenliğinin artmasına neden olduğu ortaya koyulmuştur. Karışımın toplam porozitesi ile boşluk boyut dağılımı birbiriyle bağımlı değişkenler olduğundan, dane dağılımı (gradasyonu) ve sıkıştırma enerjisi sabit tutulduğunda porozitedeki artışın gözenek çaplarında da artışa sebep olacağını ortaya koymuşlardır.

Reddy ve Kumar (2010) çimento takviyeli sıkıştırılmış kil duvarların yaşam döngüsü boyunca barındırdığı enerji analizinde; toprak türünün, yoğunluğun ve çimento oranının sıkıştırılma enerjisine etkisini incelemişlerdir. Sıkıştırma enerjisi belirleme 155x600x700 mm boyutlarında sıkıştırılmış kil duvar paneller üzerinde yapılmıştır. Sıkıştırma enerjisinin toprak karışımındaki kil miktarının artmasıyla arttığı ve duvarın yoğunluğuna (sıklığına) duyarlı olduğu görülmüş, çimento ikameli sıkıştırılmış kil duvarın sıkıştırma enerjisinin çimentonun üretim enerjisine oranı ile karşılaştırıldığında ihmal edilebileceği, çimento ikameli sıkıştırılmış kil duvarların toplam barındığı enerjinin çimento oranının artması ile doğrusal olarak arttığı ve çimento içeriği %6-8 iken barındırılan enerji 0.4–0.5 GJ/m³ (ortalama 139 kW.h-60 gün boyunca açık tutulan 100 watt ampule eşdeğer) aralığında olduğu saptamışlardır.

Reddy ve Kumar (2011a) çimento katılmış toprak karışımı ve çimento takviyeli sıkıştırılmış kil duvar karışımlarının sıkıştırma karakteristikleri ve fiziksel özellikleri üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, toprak (kil+silt)/kum oranı, çimento oranı, sıkıştırma karakteristikleri, sıkıştırma için beklenen süre ve su içeriğinin etkisi incelenmiştir. Çimento takviyeli sıkıştırılmış kil duvarın karışımı hazırlandıktan sonra duvar üretimi yapılana kadar 10 saatlik gecikmede duvarın dayanımında %50 düşüş olduğu saptanmıştır. Çimento katkılı toprak karışımının basınç dayanımı, yoğunluğun artmasıyla artmıştır. Ayrıca çimento takviyeli kil karışımının basınç dayanımının,

optimum nem miktarı (ya da bir miktar fazlası) ile sıkıştırılması sayesinde artış gösterdiği bildirilmiştir.

Reddy ve Kumar (2011b) yaptıkları diğer çalışmalarında topraktaki kil oranının çimento takviyeli sıkıştırılmış kilin dayanımındaki rolünü ve toprak karışımındaki kilin optimum oranını, nem, çimento oranını ve sıklığını, gerilme-uzama ilişkisini ve elastik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, çimento takviyeli sıkıştırılmış kilin karakteristiklerinin toprak kompozisyonundan, sıklığından, çimento ve su (nem) oranından etkilendiği ortaya konmuştur. Kil oranı %9 ile %31.6 arasında değişen 5 toprak karışımı, çimento oranları %5-8-12 olan 3 farklı durum, 1600-1800-2000 kg/m³ olan 3 kuru yoğunluk ve prizmalar için 2 farklı nem durumu belirlenmiştir. Basınç dayanımında kuru ya da ıslak numuneler arasında fark olduğunu, kuru ve ıslak dayanımların toprak karışımındaki kil oranına ve çimento oranına bağlı olduğunu, çimento takviyeli sıkıştırılmış kilde maksimum basınç dayanımı için optimum kil oranının %16 olduğunu, bu dayanımın ise numunenin sıklığına duyarlı olduğunu ve %20'lik sıklık artışının dayanımı %300-500 arasında arttırdığını belirlemiştir.

Walker ve Dobson (2001) 15 cm çapında boyları 11-20,5 cm aralığında değişen silindir kalıplara çeşitli oranlarda çimento takviyeli sıkıştırılmış kil duvar karışımları dökmüş ve farklı tip donatılar (düz, galvanizli, deforme olan, nervürlü gibi) kullanarak pull out testi ile aderans dayanımlarındaki değişimi incelemiştir. Aderansın, sıkıştırılmış kil duvarın basınç dayanımı ile doğru orantılı olduğunu, donatı tipi, donatının gömme derinliği ve numunelerin hazırlanma yöntemiyle etkilendiğini bildirmiştir.

Bui ve Morel (2009) çalışmalarında sıkıştırılmış taşıyıcı kil duvar kullanılarak imal edilmiş mevcut bir binada duvarın mekanik davranışlarına boyutların etkisini belirlemiştir. Üç aşamalı olarak yapılan çalışmanın ilk aşaması mevcut sıkıştırılmış kil duvar üzerinde elastisite modülü belirleme, ikinci aşaması bu duvarın daha küçük ölçekli kısmını laboratuvar ortamında üretip test etme ve son aşama olarak (mikro-mekanik aşama) laboratuvar testlerini kolaylaştırmak adına daha küçük sıkıştırılmış kil bloklar üretmedir. Sıkıştırılmış taşıyıcı kil duvarın laboratuvar ortamında üretilen iki farklı boyuttaki numunelerin davranışları sonlu elemanlar metodu ile modellenmiş ve elastisite modülü bulunmuştur. Sonuç olarak laboratuvardaki deneysel çalışmalar ve yapılan model değerleri arasında farklılıklar ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni modeldeki sıkıştırılmış taşıyıcı kil duvarın katmanları arasındaki aderansın mükemmel olduğu,

halbuki bunun uygulamada mümkün olmayacağı; ayrıca duvardaki nem oranının da mekanik özellikleri değiştirmede önemli rol oynayacağı şeklinde yorumlanmıştır.

Hall ve Allinson (2010) çimento takviyeli sıkıştırılmış kil duvarlarda (üç farklı karışım tipi) sıcaklık profilindeki değişimin sayısal modellemesini WUFI Pro programı üzerinde yapmışlardır. Klimatik oda içerisinde ürettiği 30 cm kalınlığındaki sıkıştırılmış kil duvarlardan aldığı verilerle simülasyon verilerinin uygun olduğunu, sıkıştırılmış kil duvarların yüzeylerinde su olmadığı sürece termal profil değişiminin karışım tipine bağlı olmadığını tespit etmişler ve tanelerin yoğunluk/boşluk oranına bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Díaz vd. (2010) boşluklu kil, beton ve hafif beton blokların sonlu elemanlar yöntemiyle doğrusal olmayan ısı iletkenliğinin karşılaştırmalı olarak ölçülmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada 3 farklı materyal ve 6 farklı tuğla tipiyle toplam 18 durum değerlendirilmesi yapılmıştır. Ne kadar büyük termal verimi varsa o kadar iyi yatılım ve o kadar düşük tabaka ağırlığı olacağını ortaya koymuşlardır. Kilin ısı iletkenliğinin hafif betona oranla daha yüksek ancak normal betona oranla daha düşük olduğu bildirmişlerdir.

Horpibulsuk vd. (2011) tam donanımlı bir test duvarının performansını yanal basınç bakımından analiz etmişlerdir. Dayanımı güçlendirilen kil duvarın performansı grafiksel olarak belirlenmiştir. L tipi ve U tipi dayanım güçlendirmeleri yapılmıştır. Tasarım sert zemin üzerine 6 m yüksekliğinde olan ikizkenar yamuk şeklindedir. Duvar 75 cm'lik katmanlar halinde üretilmiş ve 1500x1500x140 mm boyutlarında beton blok panellerle desteklenmiştir. Sonuç olarak güçlendirilmiş kil duvarın eğimi rijit davranış gösterdiğini doğrulamıştır. Toprak basıncının katsayıları duvarın alt seviyelerine yaklaştıkça azalmıştır. Rijitlik faktöründen yararlanarak güçlendirilmiş kil duvarın derinlik ve yanal basınç fonksiyonu $K/K_a=1.7$ olarak çelik ızgara ve metal çubuklarınkinden çok daha düşük olduğunu saptamışlardır. Yanal basınç katsayısı boylamsal elemanların kesit alanını düşürmesi sayesinde maliyet azalmış olduğundan sonuç olarak istenilen özellikte güçlendirilmiş duvar tasarımının elde edilebileceğini bildirmişlerdir.

Yapılan bazı çalışmalarda, sıkıştırılmış kil duvarlara bazı takviyeler ya da ikameler yaparak (çimento, uçucu kül, çeşitli lifler vb.) elemanın fiziksel, mekanik, termal vb. özellikleri ve aderans gücündeki değişimler incelenmiştir. Ancak yapılan araştırmalarda

sıkıştırılmış kil duvar karışımlarında tek başına bile iyi bağlayıcılık özelliği bulunan yüksek fırın cürufu kullanılmadığı, dolomit gibi farklı mineral malzemelerin denenmediği görülmüştür. Bunlara ek olarak, literatürde sıkıştırılmış kil duvara doğal lif takviyeleri yapılmış ancak cam lifi gibi yapay lif takviyesinin yapılmadığı ve lif katkısının sıkıştırılmış kil duvarın mekanik özelliklerine etkisine pek değinilmediği görülmüştür.

Tezin konusu, uygun kil/kum oranına sahip karışımlara belirli oranlarda çimento, yüksek fırın cürufu, dolomit ve cam lifi takviye ederek elde edilen harçlarla hazırlanan sıkıştırılmış kil duvar numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemek, eksiklerini iyileştirmektir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. MALZEMELER

2.1.1 Kil

Sıkıştırılmış kil duvar karışımlarında kullanılacak olan killi zemin Düzce Bölgesinden temin edilmiştir. Çalışmada, 2.67 özgül ağırlığında kırmızımsı renge sahip killi zemin kullanılmıştır (Şekil 2.1).

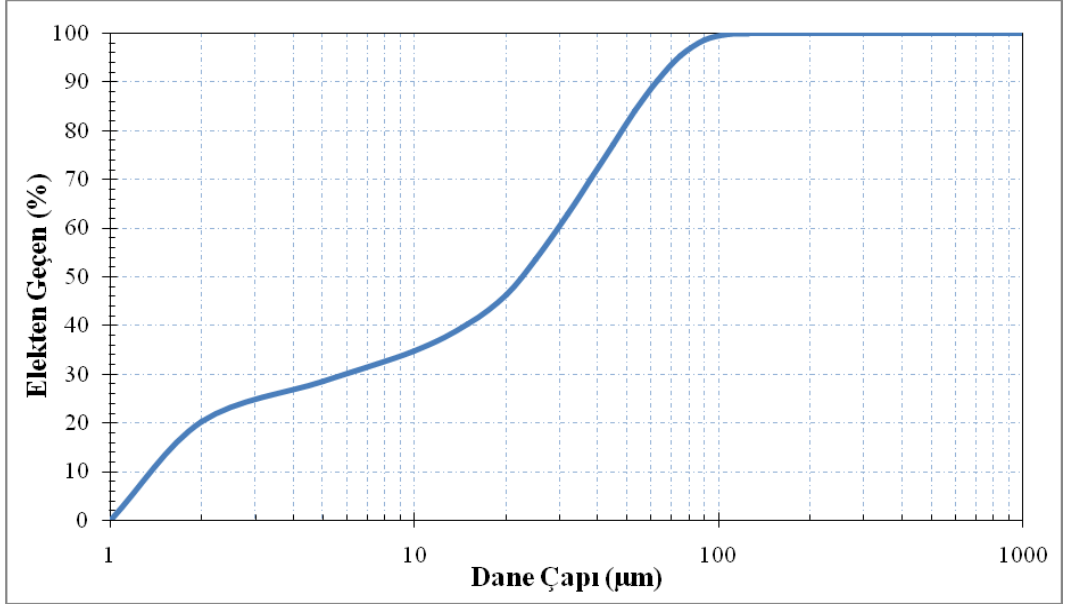


Şekil 2.1. Çalışmada kullanılan kil örneği

Karışımlarda kullanılmadan önce, killi zemin öğütücü ile ufalanarak topaklaşma durumu ortadan kaldırılmıştır. Öğütülmüş killi zemin üzerinde yapılan ıslak analiz sonucunda %87'den daha büyük bir bölümünün 0.075 mm elek altına (kil+silt karışımı) geçtiği ve tane boyut analizi ile yaklaşık %20 kil miktarına sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.2). Kil üzerinde yapılan X-ışınları kırınımı (XRD) mineralojik analizi sonucunda %78 illit ve %22 kaolinit tipi kil içerdiği görülmüştür. Buna ek olarak, X-ışını floresansı (XRF) kimyasal analizi sonuçları Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Kilin XRF analizi

Kimyasal Analiz Sonucu			
Bileşenler	% Değer	Bileşenler	% Değer
SiO ₂	55.898	Na ₂ O	0.322
Al ₂ O ₃	21.507	CaO	0.224
Fe ₂ O ₃	8.97	F	0.115
K ₂ O	2.922	MnO	0.082
TiO ₂	1.233	Kızdırma Kaybı (800 °C)	8.05
MgO	0.676		



Şekil 2.2. Kil tane boyut analizi sonucu

2.1.2. Agregta

Karışımın %45-70'lik kısmını oluşturan mineral kökenli, daneli malzemedir. Sıkıştırılmış kil duvar üzerinde yapılan çalışmalarda genel olarak en büyük tane boyutu 20 mm'nin altındaki agregalar kullanılabilir. Bu çalışmada kullanılan agregta, sıva malzemesi olarak kullanılan 0-4 mm elek aralığındaki kumdan oluşmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Çalışmada kullanılan agregta

2.1.3. Su

Çalışmada Düzce İli Şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.1.4 Çimento

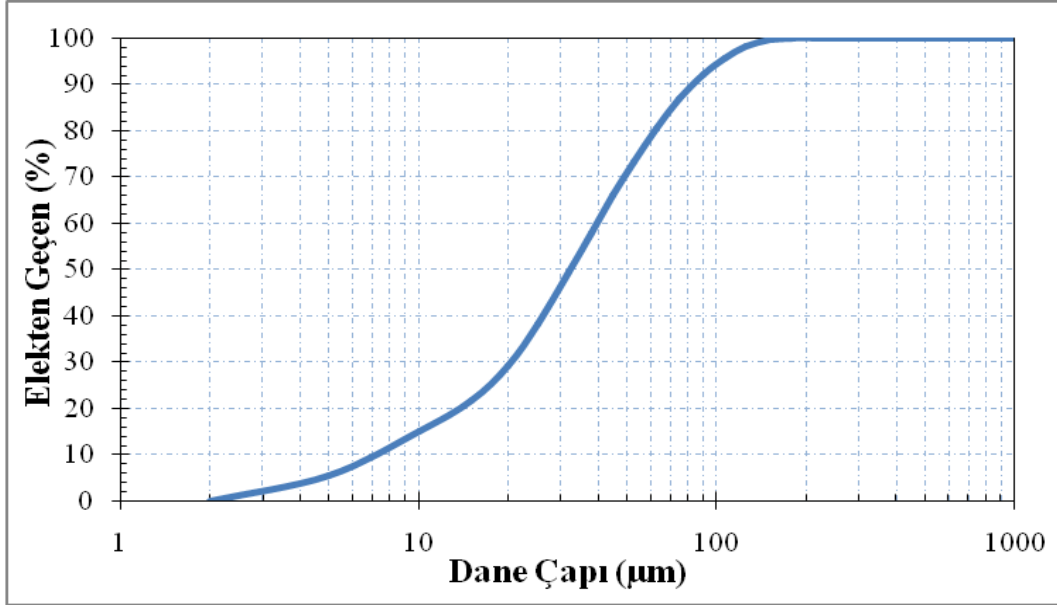
Çimento olarak CEMI 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır (Şekil 2.4). Temin edilen çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri ile kimyasal kompozisyonu Tablo 2.2'de; tane boyut analizi ise Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Çalışmada kullanılan çimento

Tablo 2.2. Çimentonun kimyasal kompozisyonu ile fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal kompozisyon (%)		Fiziksel özellikler	
SiO ₂	18.95	Priz başı (dk)	140
Al ₂ O ₃	5.32	Priz sonu (dk)	160
Fe ₂ O ₃	4.07	Hacim genişmesi (mm)	1
CaO	64.72	Yoğunluk (gr/cm ³)	3.18
MgO	1.35	Özgül yüzey (Blaine) (cm ² /g)	4663
SO ₃	2.9	Mekanik özellikler	
Na ₂ O	0.16		
K ₂ O	0.51	Basınç dayanımı (Mpa)	
Kızdırma Kaybı	3.83	7 gün	44.6
Çözünmeyen Kalıntı	0.63	28 gün	55.3
Serbest CaO	1.52	90 gün	62.4



Şekil 2.5. Çimentoya ait tane boyut analizi sonucu

2.1.5 Yüksek Fırın Cürufu

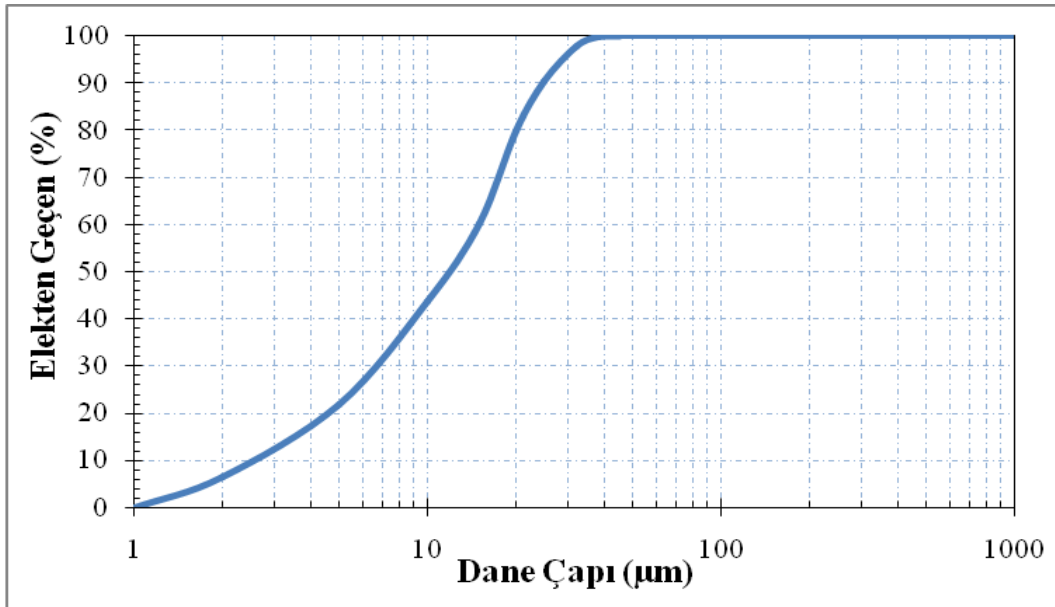
Cüruf olarak öğütme tesidinden elde edilen ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır (Şekil 2.6). YFC'ye ait fiziksel özellikler ve kimyasal kompozisyon Tablo 2.3'te tane boyut analizi sonucu ise Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.6. Çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu

Tablo 2.3. Yüksek fırın cürufuna ait kimyasal kompozisyon ve fiziksel özellikler

Kimyasal kompozisyon (%)	YFC	Fiziksel özellikler
SiO ₂	38.56	Yoğunluk (gr/cm ³) 2.8
Fe ₂ O ₃	1.07	Özgül yüzey (cm ² /gr) 5283
TiO ₂	1.01	
Al ₂ O ₃	16.64	
CaO	34.2	
MgO	7.29	
Na ₂ O	0.58	
K ₂ O	1.1	
SO ₃	0.35	
P ₂ O ₅	0	
Kızdırma kaybı	0	



Şekil 2.7. Yüksek fırın cürufuna ait tane boyut analizi sonucu

2.1.6 Dolomit

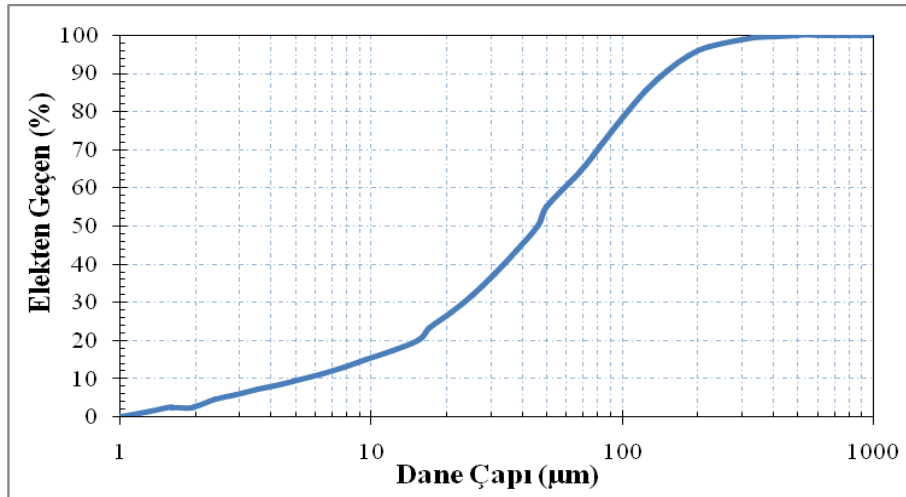
Dolomit malzemesi, 1 mm maksimum dane çapına sahip olup Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Tablo 2.4'te dolomite ait kimyasal analizi sonucu ve Şekil 2.9'de tane boyut analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 2.8. Çalışmada kullanılan dolomit

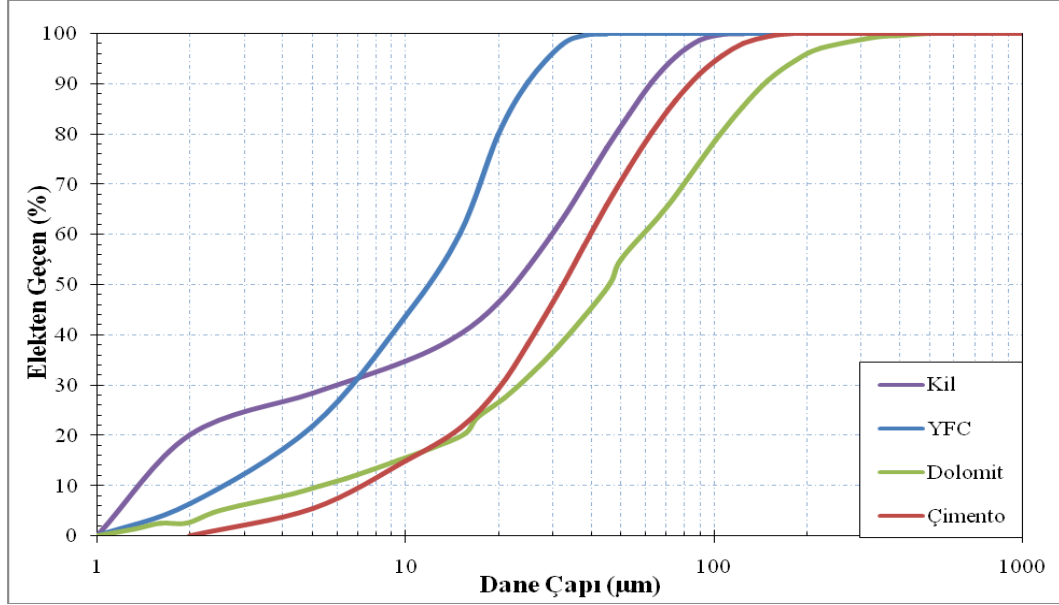
Tablo 2.4. Çalışmada kullanılan dolomit ait kimyasal analiz sonucu

Bileşenler	Birim	Dolomit
CaCO ₃	(%)	86.52
CO ₃	(%)	63.02
Ca	(%)	23.50
Mg	(%)	12.07
Fe	(ppm)	0.98
SiO ₂	(%)	0.15
PO ₄	(ppm)	10
SO ₄	(ppm)	10
Alkalinite	(ppm)	30(CaO-MgO Olarak)
Nem	(%)	0.0302
Asitte Çözülmeyen	(%)	1
Yağ Absorplama	(%)	22.90



Şekil 2.9. Dolomite ait tane boyut analizi sonucu

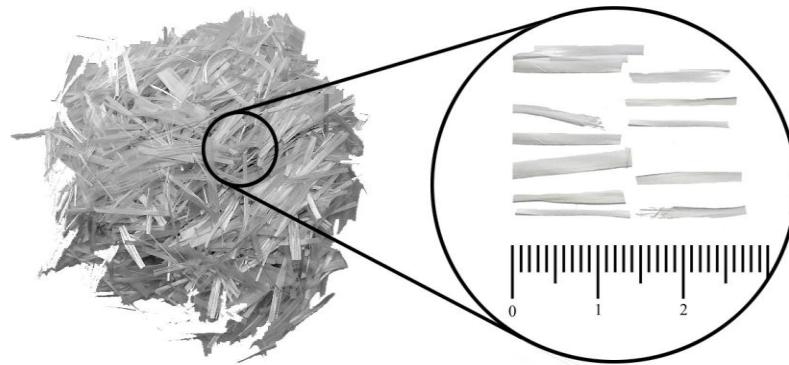
Çalışmada kullanılan kil, yüksek fırın cürufu, çimento ve dolomite ait karşılaştırmalı tane boyut analizi grafiği Şekil 2.10'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde kil, yüksek fırın cürufu, dolomit ve çimento malzemelerinin 10 µm dane çapının altına sırasıyla %35, %44, %15, %15; 45 µm dane çapının altına sırasıyla %77, %100, %50, %66; 90 µm dane çapının altına sırasıyla %99, %100, %72, %92'lik miktarlarının geçtiği görülmüştür.



Şekil 2.10. Kil, YFC, dolomit ve çimentoya ait karşılaştırmalı tane boyut analizi

2.1.7 Cam Lifi

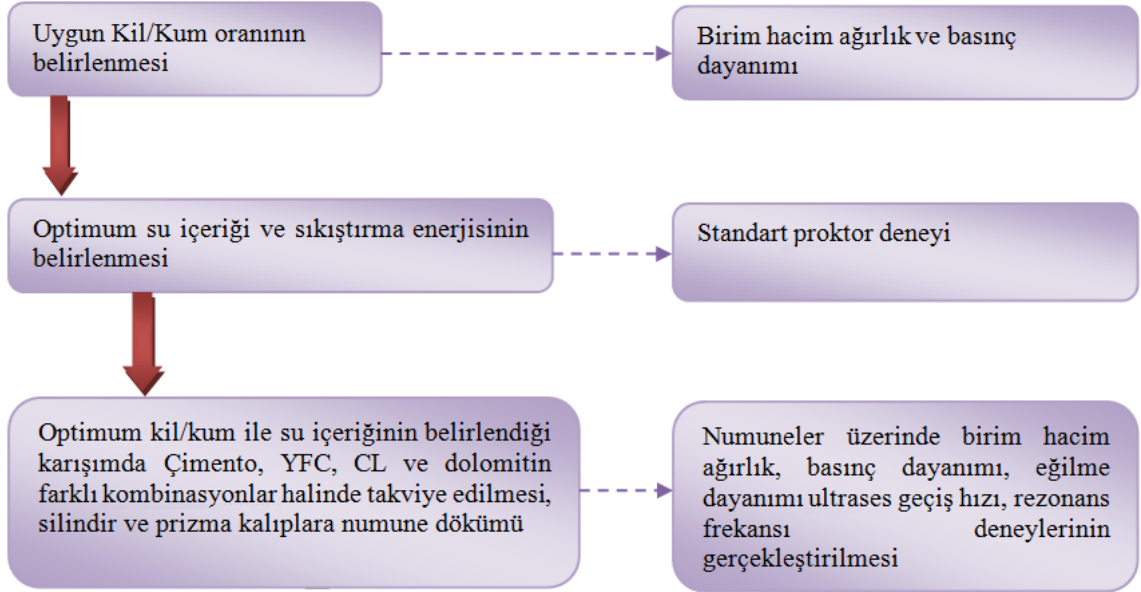
Çalışmada 12 mm kırılmış incelikleri 10-13 mikron arasında değişen cam lifleri kullanılmıştır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Çalışmada kullanılan cam lifi

2.2. YÖNTEM

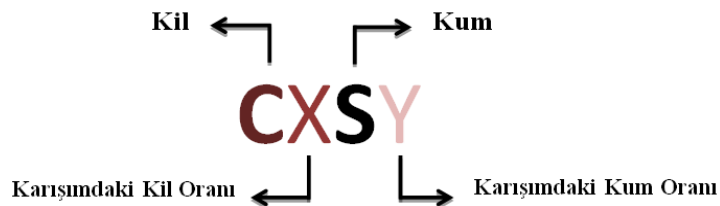
3 aşamadan oluşan bu tez çalışmasında izlenen temel adımlara ait şematik gösterim Şekil 2.12’de verilmektedir.



Şekil 2.12. Çalışmada izlenen adımlar

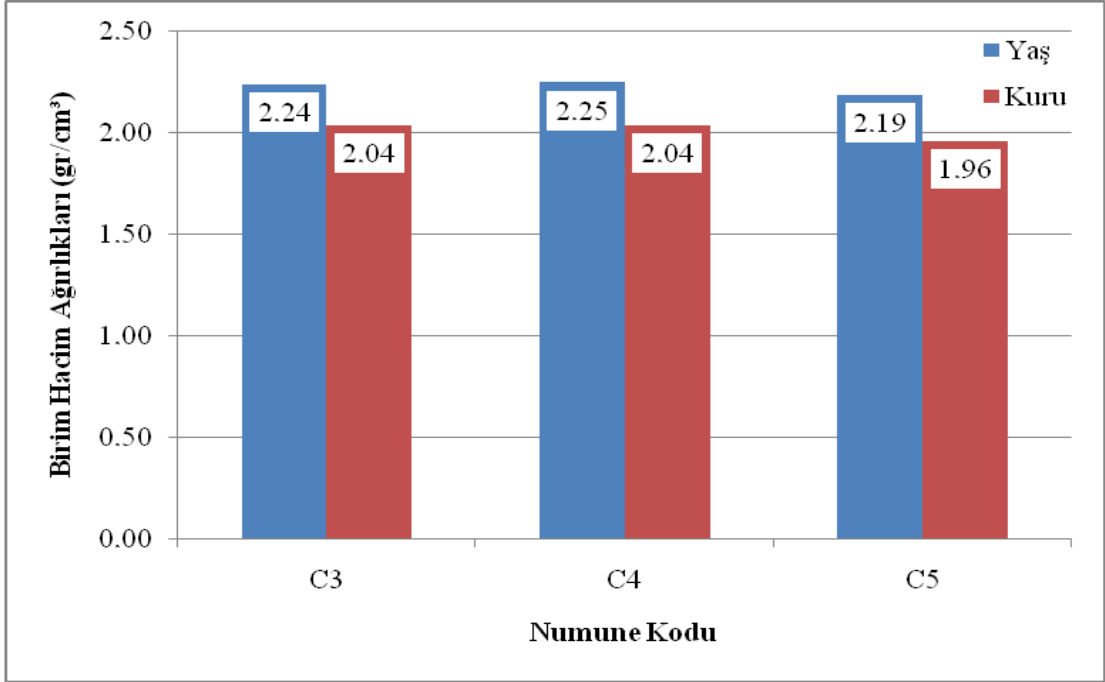
2.2.1. Karışım oranlarının belirlenmesi

Başlangıç karışım oranlarının belirlenmesine birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı testleri temel teşkil etmektedir. Bu aşamada C3, C4 ve C5 karışımları kullanılmıştır. Karışım kodlamaları ile ilgili bilgi Şekil 2.13’de verilmiştir. Örneğin, C4S6 karışımı 4 birim kil, 6 birim kum içerdiği anlamına gelmektedir ve sadece C4 olarak da kullanılabilir. Karışım hazırlanırken kil, doymuş yüzey kuru durumundaki kuma dökülüp su eklenerek yaklaşık 15 dakika homojen kıvam elde edilene kadar karıştırılmıştır. 5 cm tabakalar halinde 15x30 cm silindir kalıplara sıkıştırılan karışımlar 7 gün laboratuvar ortamında bekletilmiş ve bu süre sonunda etüvde (105 °C) kurutulup deneylere hazır hale getirilmiştir.

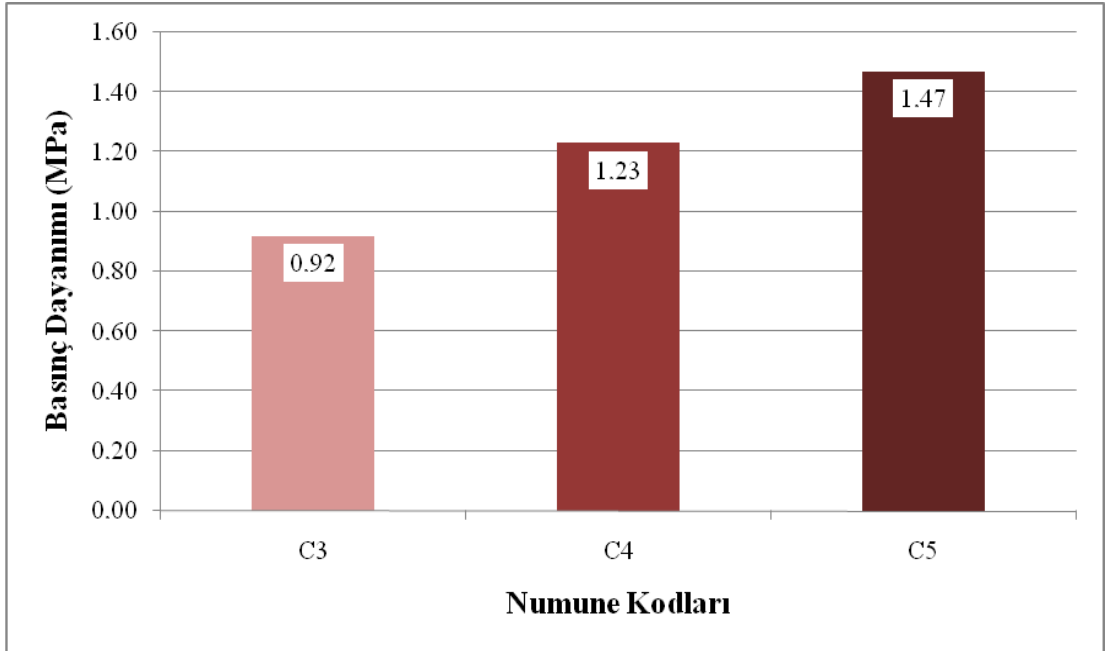


Şekil 2.13. Karışım kodlama biçimi

Yapılan ön çalışmada C3, C4 ve C5 karışımları 15x30 cm silindir kalıplara dökülerek birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları Şekil 2.14 ve Şekil 2.15’de verilmiştir.



Şekil 2.14. Ön karışımlara ait birim hacim ağırlık değerleri

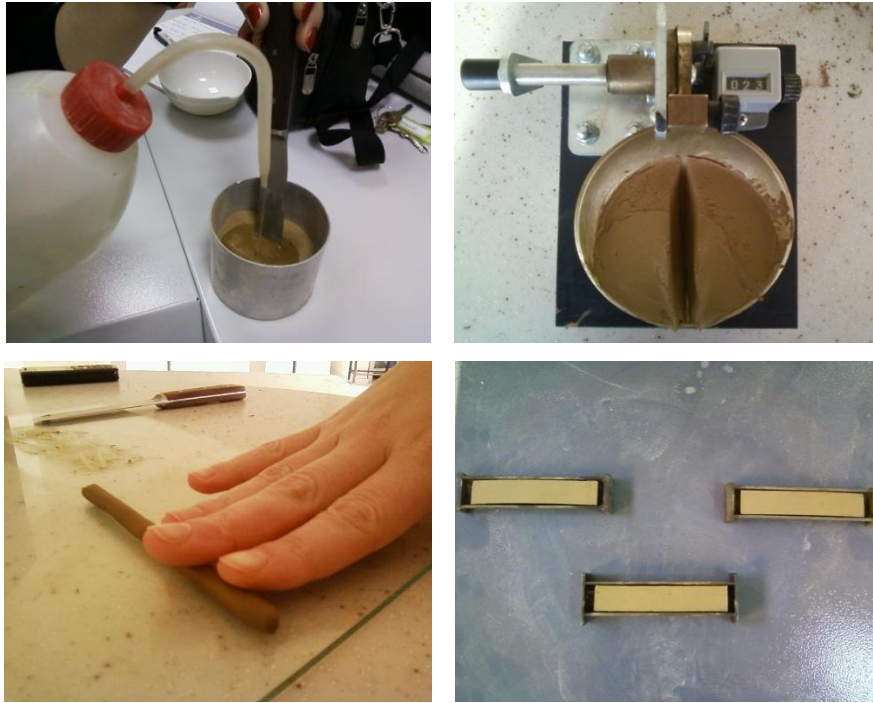


Şekil 2.15. Ön karışımlara karışımlara ait basınç dayanımı değerleri

Herhangi bir mineral ya da lif ile takviye edilmemiş, yalnızca kil ve kumdan oluşan sıkıştırılmış kil duvarların birim hacim ağırlık değerleri kil/kum oranına bağlı olarak nemli durumda 2.19-2.25 gr/cm³ civarında ve kuru halde ise 1.96-2.04 gr/cm³ arasında değişmektedir. Elde edilen verilere göre en yüksek kuru birim hacim ağırlık değerlerine 2.04 gr/cm³ ile C3 ve C4 karışımları sahiptir. C5 karışımının birim hacim ağırlığı C3 ve C4'e göre daha düşüktür. Buna ek olarak, C5 karışımının 1.47 MPa ile C3 ve C4'ten daha yüksek dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Düşük birim hacim ağırlık ve yüksek basınç dayanımı, takviyeli karışım deneylerinde kullanılacak karışım seçimindeki parametreler olduğundan, C5 takviyeli karışım deneyleri için referans olarak uygun görülmüştür.

2.2.1.1 Kıvam (Atterberg) Limitleri

Kıvam (Atterberg) limitleri (Likit Limit, Plastik Limit, Rötire Limiti) TS 1900-1 standardına göre sadece 40 nolu eleğin altına geçen malzeme üzerinde yapılmıştır. Şekil 2.16'te bu limit deneyleri gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Kıvam (Atterberg) limit deneyleri

2.2.1.2 Birim Hacim Ağırlık

Hazırlanan karışımların yaş ve kuru ağırlıkları tartılarak hacimlerine oranlanmasıyla birim hacim ağırlıkları elde edilmiştir. Doğru karışımın seçiminde basınç dayanımı değerleriyle birlikte göz önünde bulundurduğumuz parametredir. Şekil 2.17’de yaş ve kuru haldeki numune örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Yaş ve kuru haldeki numune örnekleri

2.2.2. Optimum Su İçeriği ve Sıkıştırma Enerjisinin Belirlenmesi

Ön çalışmalarda kullanılan su içeriği (%16) sadece uygun kil/kum oranını belirlemek için Atterberg limitleri göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Ancak yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde sıkıştırılmış kil duvarda başlangıç su içeriğinin dayanım ve dayanıklılık açısından oldukça önemli olduğu ve daha düşük değerlerde olması gerektiği tespit edilmiştir. Buna göre seçilen karışım üzerinde sıkıştırma (Proktor) deneyi yapılmıştır.

2.2.2.1 Sıkıştırma (Proktor) Deneyi

Bir önceki aşamada seçilen kil/kum oranında (C2, C3, C4 ve C5’den biri), karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlıktaki optimum su muhtevasını belirlemek amacıyla TS 1900-1’e göre Standart Proktor deneyi yapılmıştır. Bu deney sayesinde optimum su içeriği ile maksimum sıkıştırma enerjisi tespit edilmiştir. Şekil 2.18’de Proktor deneyi gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Sıkıştırma (Proktor) deneyinden görüntüler

2.2.3. Takviyeli (Stabilize) Karışımların Belirlenmesi

Referans numuneyi teşkil edecek ve önceki aşamalarda kil/kum oranı ile optimum su içeriği tespit edilmiş karışıma, yüksek fırın cürufu, dolomit ve cam lifi toplam karışımın ağırlığınıca takviye edilmiştir. Takviyeli karışım oranları Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5. Takviyeli karışım oranları

Numune No	Takviye Malzemesi (Kütlece, %)			
	Çimento	Yüksek Fırın Cürufu	Dolomit	Cam Lifi
REFERANS	-	-	-	-
CEM10	10	-	-	-
YFC10	-	10	-	
DOL10	-	-	10	
CEM5-YFC5	5	5	-	
CEM5-DOL5	5	-	5	0.5
CEM10-GF0.5	10	-	-	
YFC10-GF0.5	-	10	-	
DOL10-GF0.5	-	-	10	
CEM5-YFC5-GF0.5	5	5	-	
CEM5-DOL5-GF0.5	5	-	5	

Tablo 2.5. Takviyeli karışım oranları (Devamı)

Numune No	Takviye Malzemesi (Kütlece, %)			
	Çimento	Yüksek Fırın Cürufu	Dolomit	Cam Lifi
CEM10-GF1	10	-	-	1
YFC10-GF1	-	10	-	
DOL10-GF1	-	-	10	
CEM5-YFC5-GF1	5	5	-	
CEM5-DOL5-GF1	5	-	5	

Tablo 2.5'te belirtilen oranlarda karışımlar hazırlama aşamasında tüm stabilize malzemeleri (çimento, yüksek fırın cürufu, dolomit, cam lifi) önce kil ile yaklaşık 5 dakika karıştırılıp sonra doygun yüzey kuru haldeki kuma eklenmiştir. Su, bir fiskiye yardımıyla dağıtılarak karışıma eklenmiş ve 15 dakikalık bir sürede homojen bir kıvam elde edilene kadar karıştırılmıştır. Elde edilen karışım 15x30 cm'lik silindir ve 10x10x50 cm'lik prizma kalıplarda sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi havalı tokmak vasıtasıyla silindir numunelerde 5 cm'lik 6 tabaka, prizma numunelerinde ise 5 cm'lik 2 tabaka halinde gerçekleştirilmiştir. Üretilen 15x30 cm boyutlarındaki silindir numuneler 7 gün laboratuvar ortamında bekletilmiştir. 7. günün ardından bir gün süreyle 105 °C etüvde kurutulan numuneler üzerinde, birim hacim ağırlık, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı, rezonans frekansı deneyleri, 10x10x50 cm'lik prizma numuneler üzerinde ise eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır.

2.2.3.1 Rezonans Frekansı

Sıkıştırılmış kil numuneler üzerinde basınç dayanımı öncesi etüv kurusu halde boyuna rezonans frekansı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen rezonans frekansı değerlerinden faydalanarak sıkıştırılmış kil numunelerin dinamik elastisite modülü değerleri tespit edilmiştir.

2.2.3.2 Ultrases Geçiş Hızı

Ultrasonik ses cihazı ses üstü dalgaların dalga gönderici ve dalga alıcı başlıklar arasındaki bir mesafeyi ne kadar zamanda geçtiğini belirleyen bir tahribatsız bir cihazdır. Basınç dayanımı, yoğunluk, elastisite modülü ve çatlakların varlığı hakkında fikir verir. Bu çalışmada, 15x30 cm boyutlarındaki silindir numuneler üzerinden geçiş hızı süreleri tayin edilmiştir. Sıkıştırılmış kil duvar üzerinde yapılan çalışmalar

incelenmiş Poisson oranı 0.22 olarak ultrases geçiş hızı tayini deneyinde kullanılmıştır (Bui T. vd., 2014; Bui Q. vd.,2014).

2.2.3.3 Basınç Dayanımı

Performans analizi yapılan sıkıştırılmış kil duvarlar karışımlarının seçiminde anahtar rolü oynayan bu test TS EN 12390-3 standardına uygun olarak yapılmıştır. 15x30 cm silindir numuneler üzerinde yapılan basınç dayanımı Şekil 2.19'da verilmiştir.



Şekil 2.19. Silindir numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyi

2.2.3.4 Eğilme Dayanımı

Sıkıştırılmış kil örneklerin eğilme dayanımını belirlemek için 10x10x50 cm kalıplara çeşitli karışımlar dökülmüştür. Bu test TS EN 12390-5 standardına uygun olarak yapılmış olup ilgili görsel Şekil 2.20'de verilmiştir.



Şekil 2.20. Eğilme dayanımı deneyi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Kıvam (Atterberg) Limitleri

Kilin karakterizasyonu hakkında bilgi sahibi olmak için yapılan Atterberg limit deneylerinin sonuçları Tablo 3.1'de verilmiştir.

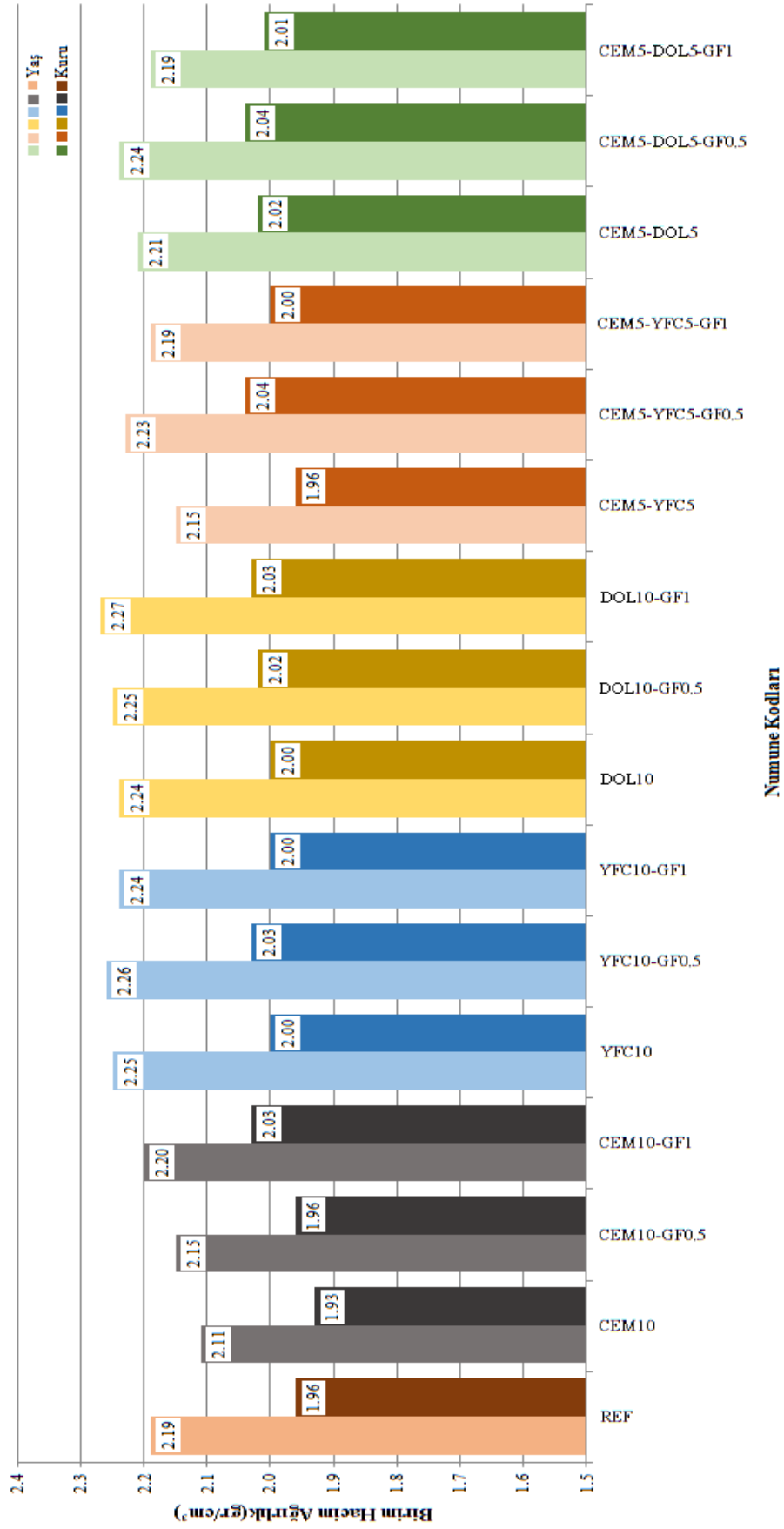
Tablo 3.1. Kilin kıvam (Atterberg) limitleri

Malzeme Adı	Likit Limit	Plastik Limit	Rötre Limiti	Plastisite İndisi
Kil	48	24	15	24

Yapılan Atterberg limit deneylerine göre kilin plastisite indisi (PI) 24 olarak hesaplanmıştır. Bu verilere bağlı olarak, plastisite kartı üzerinde yapılan analizde kullanılan kilin TS 1500'e göre orta plastisiteli killi zemin (CI) bölümünde yer aldığı görülmüştür.

3.2. Birim Hacim Ağırlık

C5 kodlu karışım kullanılarak üretilen takviyeli sıkıştırılmış kil duvar numunelerin birim hacim ağırlık değerleri ise Şekil 3.1'de verilmektedir.



Şekil 3.1. Takviyeli karışımlara ait birim hacim ağırlık değerleri

Şekil 3.1 incelendiğinde kuru haldeki tüm karışımların yoğunluk değerlerinin 2.05 gr/cm^3 değerinden düşük olduğu görülmektedir. Sıkıştırılmış kil duvarların mevcut haliyle tuğla duvardan daha yoğun bir malzeme olduğu açıktır. Ancak beton birim hacim ağırlığı dikkate alındığında ($2.4-2.6 \text{ gr/cm}^3$) daha hafif olduğu söylenebilir. En düşük yaş ve kuru birim hacim ağırlığı sırasıyla 2.11 gr/cm^3 ve 1.93 gr/cm^3 değerleri ile CEM10 karışımına ait olduğu; en yüksek yaş ve kuru birim hacim ağırlık değerleri ise YFC10-GF0.5 ve DOL10-GF1 karışımlarına ait olduğu görülmüştür.

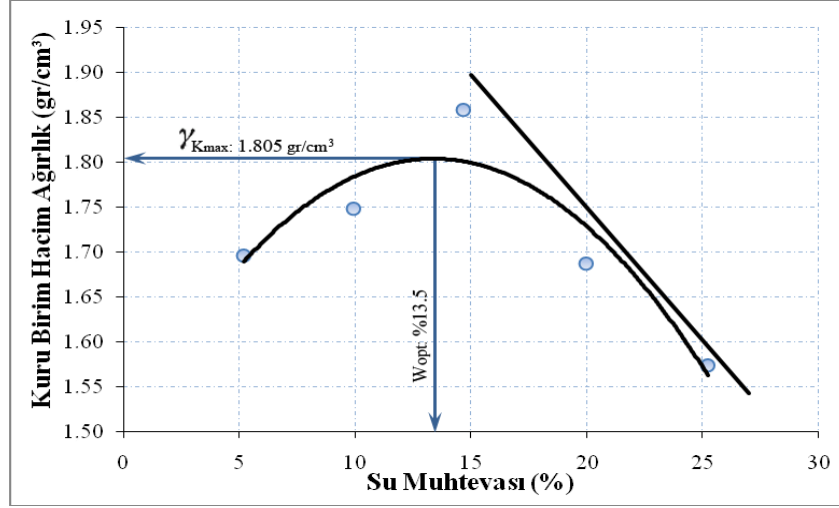
3.3. Sıkıştırma (Proktor) Deneyi

Seçilen kil/kum karışımı (C5S5) ile yapılan proktor deney işlemlerinden bazılarını ait görüntüler Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Sıkıştırma (Proktor) deney işlemleri

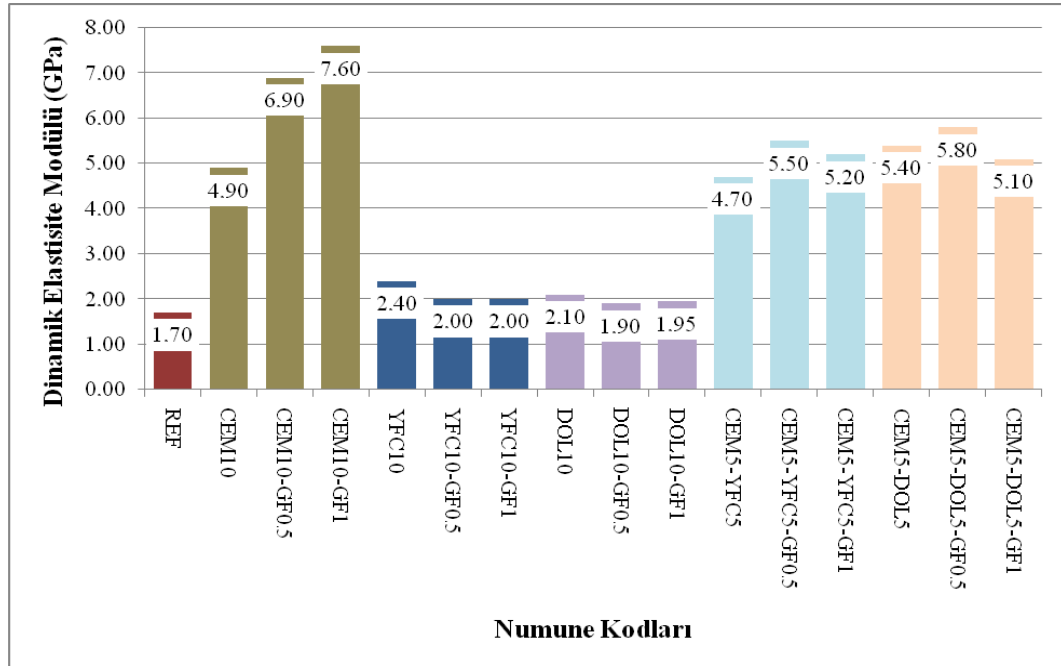
Seçilen karışıma (C5S5) ait proktor deney grafiği Şekil 3.3'te verilmiştir. Deney sonucunda, maksimum sıklık için optimum su içeriği %13.5 olarak elde edilmiştir. Bu değer kilin rötre limiti altında olduğundan dökülen duvarlarda büzülme çatlaklarının oluşma ihtimali azalacağı düşünülmektedir.



Şekil 3.3. C5S5 karışımına ait sıkıştırma deney grafiği

3.4. Rezonans Frekansı

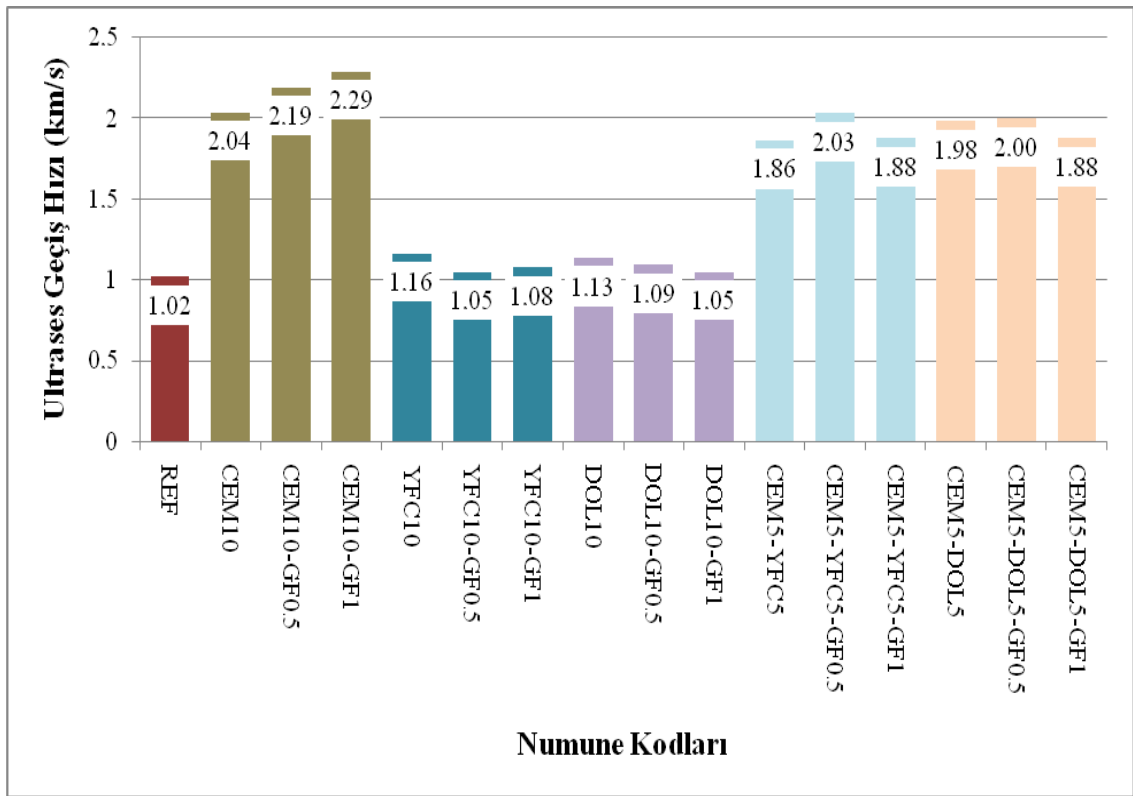
Numuneler üzerinden rezonans frekansı deneyi sonucu elde edilen dinamik elastisite modülü değerleri Şekil 3.4'te verilmiştir. 15x30 cm'lik silindir numuneler üzerinde boyuna rezonans frekansı ölçümleri ardından elde edilen dinamik elastisite modülü sonuçları incelendiğinde, çimento takviyeli tüm karışımların daha yüksek dinamik elastisite modülü değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Lif katkısının da bir sonucu olarak, CEM10-GF1 karışımının dinamik elastisite modülü en yüksek değere ulaşmıştır.



Şekil 3.4. Dinamik elastisite modülü deney sonuçları

3.5. Ultrases Geçiş Hızı Tayini

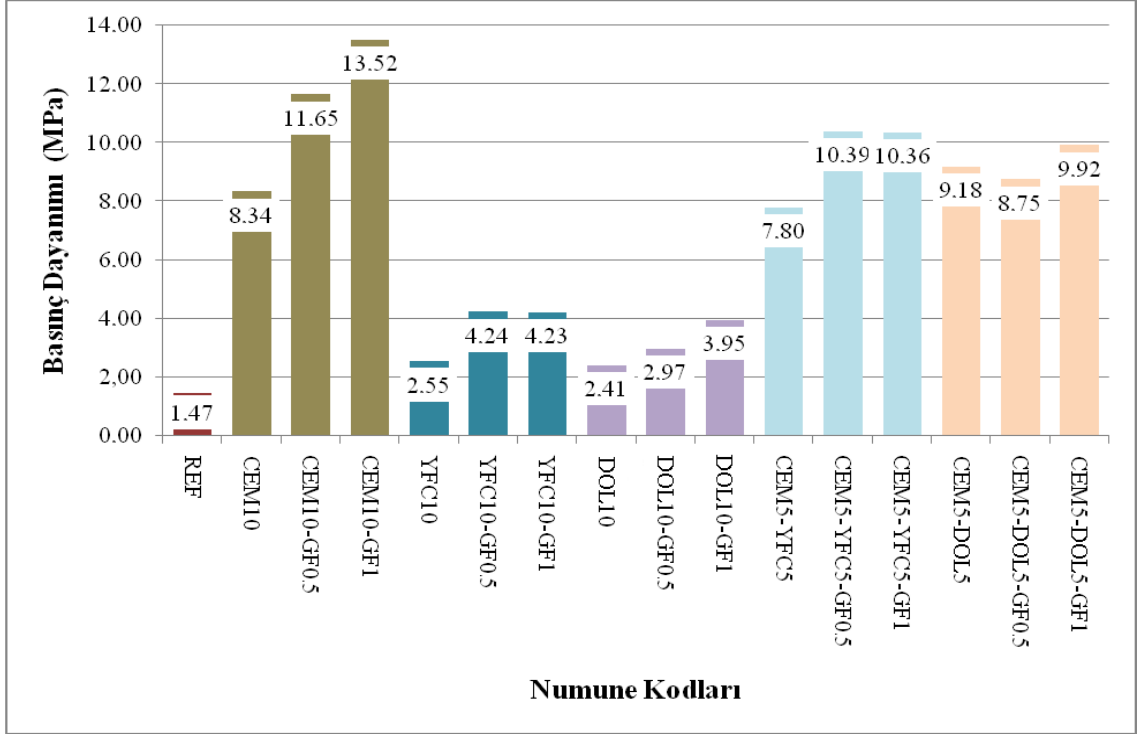
Numunelere ait ultrases geçiş hızı deney sonuçları Şekil 3.5'te verilmiştir. 15x30 cm boyutlarındaki silindir numuneler üzerinden elde edilen ultrases geçiş hızı sonuçları incelendiğinde, rezonans frekansı deney sonuçlarına uyumlu olarak çimento katkılı numunelerin diğer karışımlara oranla daha yüksek geçiş hızı değerlerine sahip olduğu, böylece çimento takviyesinin beklendiği üzere daha kompakt bir karışım elde etmede önemli rol oynadığı söylenebilir. Lif katkısının da bir sonucu olarak, CEM10-GF1 karışımının ultrases geçiş hızı en yüksek değere ulaşmıştır.



Şekil 3.5. Karışımlara ait ultrases geçiş hızı deney sonuçları

3.6. Basınç Dayanımı

Tüm takviyeli sıkıştırılmış kil duvar karışımlarının 15x30 cm silindir numuneleri üzerinde yapılan basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 3.6'da grafik olarak gösterilmiştir.



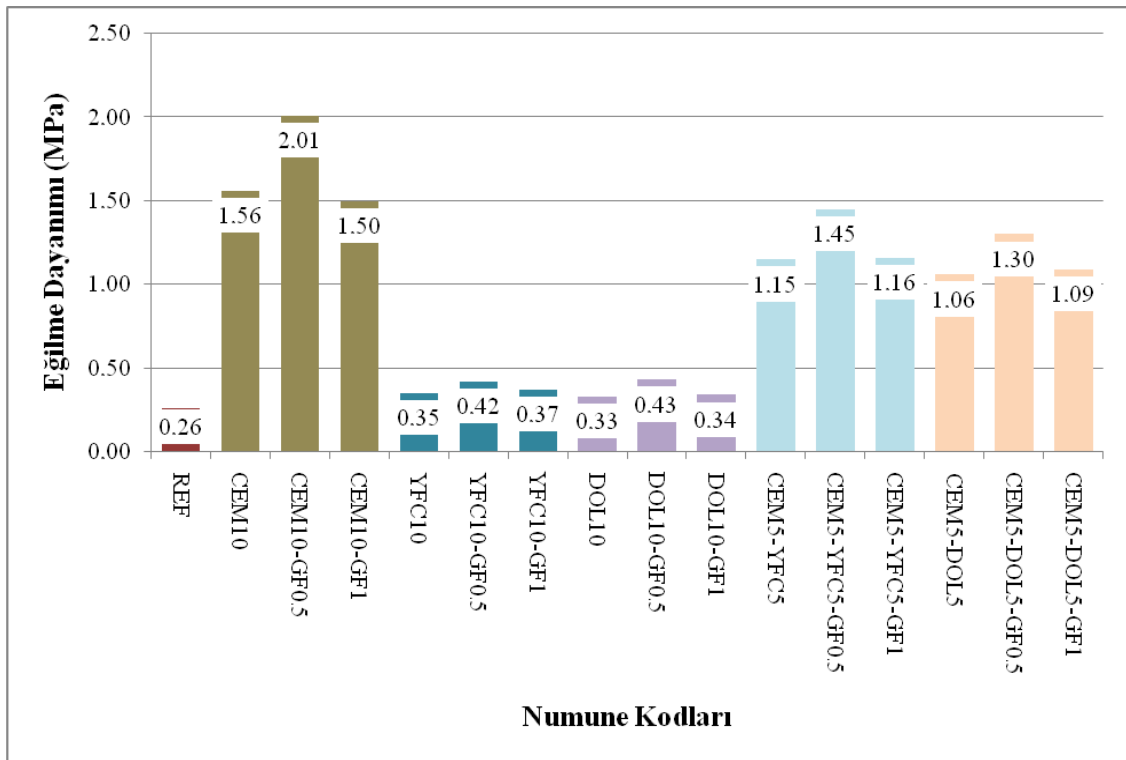
Şekil 3.6. Karışımlara ait basınç dayanımı deney sonuçları

Basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde, referans (yalnızca kil ve kumdan imal edilmiş) sıkıştırılmış kil duvar dayanımlarının en düşük değerde olduğu görülmektedir. Kil bağlayıcı bir malzeme olmakla birlikte bu düşük dayanım değerleri beklenen bir sonuçtur. Takviyeli karışımlar incelendiğinde, yüksek fırın cürufu ve dolomitin tek başlarına kullanımı ile sıkıştırılmış kil duvarların basınç dayanımı değerlerinde referans numuneye nazaran bir artış gözlenmiştir. Bu basınç dayanımı değerleri Ciacino vd. (2013) çalışmasında sıkıştırılmış kil duvardan beklenen minimum 2 MPa dayanımı sağlamaktadır. Ancak, bu numuneler 2007'de yayınlanan deprem yönetmeliğinde belirtilen deprem bölgelerinde taşıyıcı duvarlardan talep edilen minimum 5 MPa basınç dayanımı değerini karşılayamamaktadırlar. Çimento takviyeli numunelerin dayanım değerleri incelendiğinde ise CEM10, CEM5-YFC5, CEM5-DOL5 kodlu çimentolu karışımların sırasıyla 8.34 MPa, 7.80 MPa, 9.18 MPa gibi yüksek dayanım değerlerine ulaştıkları görülmüştür. Buna göre, sadece çimento takviyeli karışımlar değil; çimento-yüksek fırın cürufu ve çimento-dolomit ikili karışımlarının da basınç dayanımı değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Lif katkılı numuneler incelendiğinde lif katkısının dayanım değerine olumlu etki ettiği gözlenmektedir. CEM5-YFC5-GF0.5 karışımı 10.39 MPa basınç dayanımı ile kendi grubu arasında en yüksek; CEM5-DOL5-GF1 karışımı ise 9.92 MPa dayanım ile kendi grubunda en yüksek değere ulaşmışlardır.

Tüm sonuçlar içerisinde en yüksek basınç dayanımı değeri de çimento ve lifin birlikte kullanıldığı CEM10-GF1 numunesinden 13.52 MPa olarak elde edilmiştir. Görüldüğü üzere sıkıştırılmış kil duvarları yığma yapılarda taşıyıcı eleman olarak kullanılabilir potansiyele sahiptir.

3.7. Eğilme Dayanımı

10x10x50 cm boyutlarındaki prizmatik numuneler üzerinden elde edilen eğilme dayanımı deney sonuçları Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Eğilme dayanımı deney sonuçları

Şekil 3.7 incelendiğinde, en yüksek eğilme dayanımı değerlerine çimento ve cam lifi takviyeli karışımlarda ulaşılmıştır. Eğilme dayanımında en yüksek değer CEM10-GF0.5 karışımında 2.01 MPa olarak görülmüştür. Lif katkısındaki artışa bağlı olarak eğilme dayanımlarında önce bir artma; yüksek katkı oranında ise genel bir azalma olduğu açıktır. CEM10 karışımının eğilme dayanımı 1.56 MPa iken, %0.5 ve %1 cam lifi takviyeleri sonucunda dayanımları sırasıyla 2.01 MPa değerine yükselmiş sonrasında 1.50 MPa değerine düştüğü görülmüştür. Bu durum diğer karışımlar için de benzer olmaktadır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ülkemizde ve dünyada oldukça yaygın rezervleri bulunan kil, birçok alanda kullanılabilirdiği gibi yapı alanında da bağlayıcı bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeyi kalıp içerisinde sıkıştırıp yapılar için taşıyıcı/taşıyıcı olmayan duvar elemanları olarak kullanmak hem yapım maliyetlerini düşürmekte hem de doğallık ve nem dengesini düzenleme gibi özellikleri sayesinde sağlıklı ortamlar oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, yığma yapılarda kullanılmaya müsait sıkıştırılmış kil duvar karışımları denenmiş ve aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Çalışmada ön karışım olarak sadece kil ve kum içeren karışımlar hazırlanmış ve %50 kum-%50 kil oranının en uygun kil/kum oranını verdiği tespit edilmiştir.
- Kil kum karışımlarında en uygun sıkışma oranı için Proktor deneyi sonucunda ağırlıkça %13.5 su oranının maksimum sıklıktaki optimum su oranı olduğu belirlenmiştir. Böylece referans karışımlarında C5S5 kil/kum oranı ile %13.5 su muhtevası tercih edilmiştir.
- Ultrases geçiş hızı ve rezonans frekansı deney sonuçları ile basınç dayanım değer sonuçları birbiriyle paralellik göstermiştir. Bunun yanında çimento katkısı ile sıkıştırılmış kil duvarların ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerinde artış gözlenmiştir.
- Stabilize edilen karışımların tümü, referans numuneden daha yüksek basınç dayanımı değerlerine ulaşmıştır.
- 12 mm kırılmış cam lifi katkısının sıkıştırılmış kil numunelerin basınç dayanımı değerlerine olumlu etkisi gözlenmiştir. Üretilen karışımlarda cam lifi miktarındaki artışa bağlı olarak basınç dayanımı değerleri artmıştır.
- Çimento-yüksek fırın cürufu ile çimento-dolomit ikili karışımlarının deprem yönetmeliğinde taşıyıcı duvarlardan istenen minimum 5 MPa dayanım değerini sağlamaları nedeniyle taşıyıcı duvar olarak değerlendirilebilecekleri düşünülmektedir.
- Çimento-yüksek fırın cürufu katkılı karışımlarda, yüksek fırın cürufunun ileriki yaşlarda dayanım kazandırdığı göz önünde bulundurulduğunda, test öncesi daha uzun bir bekleme süresinin bu karışım ile üretilen numunelerin dayanımını arttıracığı düşünülmektedir.

- Tüm sıkıştırılmış kil duvar karışımlarda %0.5 cam lifi kullanımı ile dayanımda bir artış gözlenmiş, lif oranının artması ile karışımların eğilme dayanımı değerleri düşmüştür.
- En yüksek eğilme dayanımı değeri, çimento ve %0.5 cam lifi takviyeli sıkıştırılmış kil duvar karışımından elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, uygun kil/kum oranına sahip karışımlara belirli oranlarda çimento, yüksek fırın cürufu, dolomit ve cam lifi takviye edilmiş ve bu takviyelerin sıkıştırılmış kil duvar numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerine olumlu etkisi olduğu gözlenmiştir. Tüm sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, özellikle stabilize edilen karışımlarla hazırlanmış sıkıştırılmış kil duvarların yığma yapılarda kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir.

Tez kapsamında hazırlanan numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiş; ancak, ülkemizin iklim koşulları da dikkate alınarak kil duvarların termal özellikleri ve çevresel koşullara karşı dirençlerinin detaylı olarak incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca, kil duvar karışımlarına uçucu kül ve silis dumanı gibi farklı puzolanların; bazalt lif gibi farklı lif çeşitlerinin takviyesi sonucu fiziksel, mekanik, kimyasal ve termal özelliklerindeki değişimler üzerine yeni çalışmalar yapılabileceği önerilmektedir.

5. KAYNAKLAR

- Ashby, M. F. *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*, Oxford: Butterworth-Heinemann, (2009).
- Başgelen, N., *Çağlar Boyunca Anadolu'da Duvar*. Grafbas Matbaacılık, (1993).
- Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, (TS EN 12390-5) (2010).
- Beton- Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, (TS EN 12390-3) (2010).
- Bui, Q. B. Morel, J. C. Venkatarama, R. B. V. Ghayad, W. "Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering", *Build Environment*, 44 (2009) 912-919.
- Bui, Q. Morel, J. Hans, S. Meunier, N. "Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: the case of rammed earth", *Materials and Structures*, 42 (2009) 1101–1116.
- Bui, Q.B. Morel, J.C. Hans, S. Walker, P. " Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth", *Construction and Building Materials*, 54 (2014) 163-169.
- Bui, T.T. Bui, Q.B. Limam, A. Maximillien, S. " Failure of rammed earth walls: From observations to quantifications", *Construction and Building Materials*, 51 (2014) 295-302.
- Ciancio, D. Jaquin, P. Walker, P. "Advances on the assessment of soil suitability for rammed earth", *Construction and Building Materials*, 42 (2013) 40-47.
- Civa taşıma yöntemi ile zeminin büzülme limiti tayini, (ASTM D427) (1998).
- Collet, F. Serres, L. Miriel, J. Bart, M. "Study of thermal behaviour of clay wall facing South", *Building and Environment*, 41 (2006) 307–315.
- Çimentolu kerpiç bloklar, (TS 537) (1985).
- Darling, E. K. Cros, C. J. Wargocki, P. Kolarik, J. Morrison, G.C. Corsi, R. L. "Impacts of a clay plaster on indoor air quality assessed using chemical and sensory measurements", *Building and Environment*, 57 (2012) 370-376.
- Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, (2007).

- Díaz, J. J. C. Nieto, P. J. G. Hernández, J. D. Rabanal, F.P. Á. "A FEM comparative analysis of the thermal efficiency among floors made up of clay, concrete and lightweight concrete hollow blocks", *Applied Thermal Engineering*, 30 (2010) 2822-2826.
- Elek analizi ile tane boyut dağılım analizi, (*ASTM C136*) (2014).
- Erdoğan, S. T. Erdoğan, T. Y. *Bağlayıcı Malzemelerin ve Betonun Onbin Yıllık Tarihi*. ODTU Yayıncılık. (2007).
- Hall, M. Djerbib, Y. "Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency", *Construction and Building Materials*, 18 (2004) 281–286.
- Hall, M.R. Allinson, D. "Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials", *Building and Environment*, 44 (2009) 1935–1942.
- Hall, M.R. Allinson, D. "Transient numerical and physical modelling of temperature profile evolution in stabilised rammed earth walls", *Applied Thermal Engineering*, 30, (2010) 433–441.
- Hall, M.R. Allinson, D. A. "Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials", *Applied Thermal Engineering*, 29 (2009) 740–747.
- Horpibulsuk, S. Suksiripattanapong, C. Niramitkornburee, A. Chinkulkijniwat, A. Tangsutthinon, T. "Performance of an earth wall stabilized with bearing reinforcements", *Geotextiles and Geomembranes*, 29 (2011) 514-524.
- İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, (*TS 1900-1*) (2006).
- İnşaat mühendisliğinde zeminlerin sınıflandırılması, (*TS 1500*) (2000).
- Jaquin, P., Augarde, C. and Gerrard, C. "A chronological description of the spatial development of rammed earth techniques", *International Journal of Architectural Heritage*, 2, (2008) 377-400.
- Maddison, M. Mairing, T. Kirsima, K. Mander, Ü. "The humidity buffer capacity of clay–sand plaster filled with phytomass from treatment wetlands", *Building and Environment*, 44 (2009) 1864–1868.

- Niroumand, H. Zain, M. F. M. Jamil, M. "The Role of Nanotechnology in Rammed Earth Walls and Earth Buildings", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 89 (2013) 226-230.
- Reddy, B. V. V. Kumar, P. P. "Embodied energy in cement stabilised rammed earth walls", *Energy and Buildings*, 42 (2010) 380–385.
- Reddy, B. V. V. Kumar, P. P. A. "Cement stabilised rammed earth. Part A: compaction characteristics and physical properties of compacted cement stabilised soils", *Materials and Structures*, 44 (2011) 681–693.
- Reddy, B. V. V. Kumar, P. P. B. "Cement stabilised rammed earth. Part B: compressive strength and stress–strain characteristics", *Materials and Structures*, 44 (2011) 695–707.
- Taylor, P. Luther, M.B.. "*Evaluating rammed earth walls: a case study*", *Solar Energy*, 76 (2004) 79–84.
- URL – 1, Rammed Earth Construction. Research Programs. University Of Southern California School Of Architecture Los Angeles
<http://arch.usc.edu/Programs/Research/RammedEarthConstruction>, (**Erişim tarihi 19 řubat 2012**)
- URL – 10, "15 katlı Betonarme yapı".
<http://local.cincinnati.com/community/pages/cincybdays/images/getcontent-3.jpg>, (**Erişim tarihi 21 Mayıs 2015**)
- URL – 11, "Betonarme yapılar".
http://emlakansiklopedisi.com/images/wiki/gazbeton_%20969909.jpg, (**Erişim tarihi 21 Mayıs 2015**)
- URL – 2, "Alhambra, Granada". <http://www.trekexchange.com/tours/110>, (**Erişim tarihi 10 Mart 2014**)
- URL – 3, "Potala Palace". http://keirasoleore.blogspot.com/2010/03/picture-day-friday_12.html, (**Erişim tarihi 10 Mart 2014**)
- URL – 4, "Çin Seddi".
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6c/JiayuguanWall.jpg>, (**Erişim tarihi 10 Mart 2014**)

- URL – 5, "Sıkıştırılmış Kil Duvar Yapım aşamaları".
http://3.bp.blogspot.com/_bR4zgSwTygA/TGgaFjMy5gI/AAAAAAAAAMo/7X291sliK5U/s1600/rammedearth-1.jpg, (**Erişim tarihi 10 Mart 2014**)
- URL – 7, "Wild Life Warriors Animal Hospital".
<http://www.strawtec.com.au/page.php?id=48>, (**Erişim tarihi 10 Mart 2014**)
- URL – 8, Stephen Dobson. "Example of a modern rammed earth house in Western Australia". <http://www.australasianscience.com.au/article/issue-januaryfebruary-2012/remote-housing-need-not-cost-earth.html>, (**Erişim tarihi 10 Mart 2014**)
- URL – 9, "Sıkıştırılmış Kil Duvar".
<http://nkmip.com/image/w1000/app/webroot/files/Rappel-1.jpg>, (**Erişim tarihi 10 Mart 2014**)
- URL –6, Yeşil Bina Nedir. Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği. <http://www.cedbik.org/>, (**Erişim tarihi 10 Mart 2014**)
- Uzuner, B. A. *Temel Zemin Mekaniği*. Derya Kitabevi. (2007).
- Walker, J. P. Dobson, S. "Pullout Tests On Deformed And Plain Rebars In Cement-Stabilized Rammed Earth", *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 13 (2001) 291-297.
- Walker, P, Keable, R, Martin, J, Maniatidis, V. "Rammed earth: design and construction guidelines", United Kingdom: BRE Bookshop. (2005).
- Yuan, B. Xia, X. Liu, J. Chen, W. Chen, K. "A review of Contemporary Research on Ancient Rammed Earth Technique", *Design, Construction, Rehabilitation, and Maintenance of Bridges*, 219 (2011) 151-159.
- Zeminin özgül ağırlığı tayini, (*ASTM D854*) (2000).
- Zeminin tane boyut dağılım analizi, (*ASTM D422*) (2007).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YALAMA Ahmet
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 21.05.1990 Orhangazi
Telefon : 05385635711
E-posta : ahmet.yalama@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	DÜ İnşaat Mühendisliği EABD	2012-Devam
Lisans	DÜ Yapı Öğretmenliği	2008-2012
Lise	Öğretmen Eyüp Topçu Anadolu Lisesi	2004-2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-2013	Hame Mühendislik Ltd. Şti.	Ar-Ge Personeli
2014-2015	TÜBİTAK Projesi	Araştırmacı
2015-	Entim Yapı Denetim Şti.	Yrd. Yapı Denetmeni

Yabancı Dil

İngilizce (KPDS: 57)

Yayımlar

1. Emiroğlu M., Yalama A., Çomak B., Erdoğan Y., The Effects of High Temperature on Lightweight Self-Compacting Mortars, 7th RILEM Conference on Self-Compacting Concrete, 2013.
2. Emiroğlu M., Erdoğan Y., Çomak B., Yalama A., Freeze-Thaw Effect on the Self-Compacting Pumice Aggregate Concrete, 7th RILEM Conference on Self-Compacting Concrete, 2013.
3. Emiroğlu M., Erdoğan Y., Yalama A., Investigation of the Effects of Clay/Sand Ratio on the Performance of Earth Plasters via Simple Field Tests, Kerpik'13 – New Generation Earth Architecture: Learning from Heritage, İstanbul, 2013.

4. Emiroğlu M., Yalama A., Arslan M. E., Farklı Stabilizasyon Malzemelerinin Sıkıştırılmış Kil Duvarın Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, 5. Ulusal Yapı Mekaniği Laboratuvarları Toplantısı, Kayseri, 2015.
5. Emiroğlu M., Yalama A., Erdođdu Y., Performance of ready-mixed clay plasters produced with different clay/sand ratios, Applied Clay Science, Vol. 115, pp. 221-229, 2015.