

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



**HARÇ VE ÖRGÜ TİPİNİN YIĞMA DUVARLARIN MEKANİK
PARAMETRELERİNE ETKİSİ VE NÜMERİK OLARAK
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Musa YETKİN

Doktora Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mekanik Bilim Dalı

OCAK 2022

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

**HARÇ VE ÖRGÜ TİPİNİN YIĞMA DUVARLARIN MEKANİK
PARAMETRELERİNE ETKİSİ VE NÜMERİK OLARAK
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Tez Yazarı
Musa YETKİN

Danışman
Prof. Dr. Yusuf CALAYIR

OCAK 2022
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Başlığı:	Harç ve Örgü Tipinin Yığma Duvarların Mekanik Parametrelerine Etkisi ve Nümerik Olarak Değerlendirilmesi
Yazarı:	Musa YETKİN
İlk Teslim Tarihi:	17.12.2021
Savunma Tarihi:	21.01.2022

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Yusuf CALAYIR Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Doç. Dr. Burak YÖN Munzur Üniversitesi Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Mehmet Emin ÖNCÜ Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Erkut SAYIN Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza
Prof. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Harç ve Örgü Tipinin Yığma Duvarların Mekanik Parametrelerine Etkisi ve Nümerik Olarak Değerlendirilmesi” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

21.01.2022

Musa YETKİN



ÖNSÖZ

Bu doktora tez çalışması kapsamında, geleneksel donatısız yığma yapı inşa kurallarını değiştirmeden, farklı duvar örgü tiplerinin, harç içerisinde çelik lif kullanımının ve farklı derz kalınlıklarının yığma duvarların mekanik parametrelerine olan etkisi araştırılmıştır. Elde edilecek bulgular ile yığma yapılara entegre edilebilecek çözümler üretilebilecek olma ihtimali nedeniyle bu çalışma öncelikle şahsım için oldukça önemlidir. Söz konusu çalışmayı yapabilmek için Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nın sağladığı imkânlar bu çalışmayı yapabilme şevkimi oldukça artırmıştır. Çalışmalar esnasında maddi ve manevi birtakım zorluklar elbette mevcuttu. Burada da maddi zorlukları aşmamı sağlayan FÜBAP birimine, manevi zorlukları aşmamı sağlayan başta danışman hocam Prof. Dr. Yusuf Calayır'a ve ailemin çok kıymetli tüm fertlerine en derin teşekkürlerimi sunuyorum.

Doktora tez çalışmasına başlamamda ve çalışmamın tüm aşamalarında bana rehberlik eden, yapıcı önerileri ve eleştirileri ile beni yönlendiren, kendisiyle çalışmaktan onur duyduğum ve sadece hocalığıyla değil insani yönüyle de her zaman örnek alacağım kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Yusuf Calayır'a minnet ve şükranlarımı sunuyorum.

Çalışmamın bu noktaya gelmesinde büyük bir katkıya sahip olan ve danıştığım her konu için kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle fikir ve tecrübelerini paylaşan Prof. Dr. Kürşat Esat Alyamaç'a teşekkürü bir borç bilirim.

Lisans ve lisansüstü eğitimlerim süresince aldığım dersler ve ders dışında da mesleki tecrübelerinden faydalandığım, ayrıca tez çalışmalarım esnasında bilgi ve deneyimlerine başvurduğum kıymetli hocam Prof. Dr. Ragıp İnce'ye teşekkür ediyorum.

Tez çalışmamın her aşamasında fikir alışverişinde bulunduğum ve manevi olarak birçok konuda desteğini gördüğüm Öğr. Gör. Dr. Hakan Erkek'e, deneysel çalışmalarım esnasında yapmış oldukları yardımlarından ötürü Dr. Öğr. Üyesi Merve Açıkgenç Ulaş'a, Öğr. Gör. A. Tevfik Bildik'e, Sn. Fethi Yetik'e ve Sn. Muhammet Kartal'a teşekkür ediyorum. Ayrıca öğrenim hayatım boyunca bana emeği geçen tüm hocalarımı saygıyla anar, kendilerine minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Öğrenim hayatım boyunca bana her türlü desteği veren annem, babam ve kardeşlerime şükranlarımı sunuyorum. Çalışmalarım esnasında manevi olarak yanımda olan ve tüm zorlukları benimle göğüsleyen eşime müteşekkir olduğumu belirtmek isterim. Bu çalışmanın, yeni çalışmalara ışık tutmasını ve cennet vatanı Ülkemize ve bilim dünyasına faydalı olmasını dilerim.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından **MF.19.20** protokol numaralı proje ile desteklenmiştir.

Musa YETKİN
ELAZIĞ, 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
EKLER LİSTESİ	xii
SİMGELER	xiii
KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. YIĞMA YAPILAR VE DEPREM DAVRANIŞI.....	3
2.1. Yığma Yapı Malzemeleri	5
2.1.1. Yığma Birimler	5
2.1.2. Harç.....	8
2.1.3. Beton Dolgu	10
2.1.4. Donatı Çeliği	10
2.1.5. Öngerilme Çeliği	10
2.2. Yığma Yapıların Deprem Davranışı.....	11
3. LİFLER HAKKINDA GENEL BİLGİ VE ÇELİK LİFLER.....	13
3.1. Çelik Lifli Beton	13
3.1.1. Çelik Lif Tipleri	13
3.1.2. Çelik Lifli Betonun Kullanım Alanları.....	14
3.1.3. Çelik Lifli Betonların Özellikleri	14
3.1.4. Çelik Liflerle İlgili Literatür Araştırması	17
4. DİYAGONAL BASINÇ TESTİ.....	21
4.1. Diyagonal Basınç Testi ile İlgili Literatür Araştırması.....	23
5. PLASTİSİTE VE KIRILMA VARSAYIMLARI.....	27
5.1. Mohr-Coulomb Kriteri	28
5.2. Drucker Prager Kriteri	30
5.2.1. Drucker Prager Kriteri ile İlgili Literatür Araştırması.....	33
6. MATERYAL VE METOT	37
6.1. Deneysel Çalışmalar	37
6.1.1. Tuğla	37
6.1.2. Kum.....	43
6.1.3. Çimento	45
6.1.4. Çelik Lif	45
6.1.5. Harç.....	45
6.1.6. Yığma Duvar Elemanları.....	48
6.2. Sonlu Eleman Model Çalışmaları	52
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	54

7.1. Deneyisel Analizlerden Elde Edilen Bulgular	54
7.2. Sonlu Eleman Model Analizlerinden Elde Edilen Bulgular	67
8. SONUÇLAR.....	71
ÖNERİLER	74
KAYNAKLAR	75
EKLER	84
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Harç ve Örgü Tipinin Yığma Duvarların Mekanik Parametrelerine Etkisi ve Nümerik Olarak Değerlendirilmesi

Musa YETKİN

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2022, Sayfa: xiv + 123

Bu tez çalışmasında, harç ve örgü tipinin yığma duvarların mekanik parametrelerine etkisini araştırmak amacıyla, içeriğinde farklı karışım oranlarında çelik lif bulunan harçlar ile farklı derz kalınlıklarına ve örgü tiplerine sahip olan duvar elemanları oluşturulmuştur. Bu duvar elemanları diyagonal basınç testine tabi tutularak mekanik parametreler bakımından en iyi davranışı gösteren (optimum) duvar elemanı belirlenmiştir. Daha sonra, optimum duvar elemanının sonlu eleman model çözümleri gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalar kapsamında öncelikle kum, yığma birimi (dolu harman tuğlası) ve harç birimi için birtakım fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu birimler kullanılarak, dört farklı harç tipi, üç farklı derz kalınlığı ve üç farklı örgü tipi için toplamda 108 adet duvar elemanı oluşturulmuş ve ilgili duvar elemanları diyagonal basınç testine tabi tutulmuştur. Testler sonucunda, her bir duvar elemanının göçme biçimleri ve süneklik kapasitesi, maksimum kayma mukavemeti, maksimum yer değiştirme miktarı ve göçme yükü gibi mekanik parametreleri elde edilmiştir. Bu mekanik parametreler bakımından en iyi davranışı gösteren duvar elemanı (optimum duvar elemanı) belirlenmiştir.

Sonlu eleman model çalışmaları kapsamında, deneysel çalışmalar ile belirlenen optimum duvar elemanının mikro ve makro modelleme teknikleri ile sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Duvar elemanının doğrusal olmayan davranışı için Drucker Prager kriteri kullanılmıştır. Sonlu eleman modellerine ait çözümler deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak, bu çözümlerin etkinlikleri irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yığma duvarlar, Çelik lifli harç, Diyagonal basınç testi, Doğrusal olmayan analiz, Drucker Prager kriteri.

ABSTRACT

Effect of Mortar and Bond Types on Mechanical Parameters of Masonry Walls and Numerical Assessment

Musa YETKİN

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

January 2022, Pages: xiv + 123

In the thesis, the wall elements with different joint thicknesses and bond types were produced using mortars containing steel fiber in different mixing ratios in order to investigate the effect of mortar and bond types on the mechanical parameters of masonry walls. These wall elements were subjected to the diagonal compression test to determine the best (optimal) wall element in terms of the mechanical parameters. Then, the finite element model solutions of the optimal wall element were performed.

Within the scope of the experimental study, firstly some physical and mechanical experiments were carried out for the sand, masonry (solid clay brick) and mortar units. Then, a total of 108 wall elements were created for four different mortar types, three different joint thicknesses and three different bond types using these units. The wall elements were subjected to the diagonal compression test. As a result of the tests, the failure patterns and the mechanical parameters such as ductility capacity, maximum shear strength, maximum displacement and failure load were obtained for each wall element. The wall element (optimal wall element) showing the best behavior in terms of these mechanical parameters was determined.

Within the scope of the finite element model study, finite element models were created for the optimal wall element by using micro and macro modeling techniques. The Drucker Prager criterion was used for the nonlinear behavior of the wall element. The effectiveness of the solutions of the finite element models was assessed by comparing them with the experimental results.

Keywords: Masonry walls, Steel fiber mortar, Diagonal compression test, Non-linear analysis, Drucker Prager criterion

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Tarihin bilinen en eski yapısı (Göbekli Tepe, Şanlıurfa, M.Ö 10000) [2].....	3
Şekil 2.2. Farklı sisteme sahip yığma yapı örnekleri	4
Şekil 2.3. Yığma duvarların sınıflandırılması.....	4
Şekil 2.4. Duvar örgü tipi örnekleri	5
Şekil 2.5. LD ve HD tuğla kâgir birimlere ait örnekler [7]	6
Şekil 2.6. Farklı şekillerdeki beton kâgir birimlere ait örnekler [13]	8
Şekil 2.7. Duvar elemanlarında görülen başlıca göçme modları [21,22].....	10
Şekil 2.8. Çeşitli depremlerde hasar gören bazı yığma yapılar.....	12
Şekil 3.1. Çeşitli tiplerdeki çelik lifler [53]	14
Şekil 4.1. Diyagonal basınç testleri için rijit çelik başlık ve yüksek mukavemetli çimento harcı kullanımı	22
Şekil 4.2. Duvar elemanlarında görülen çatlaklar [120]	23
Şekil 4.3. Duvar elemanlarında görülen göçme biçimleri [124].....	25
Şekil 4.4. Duvar elemanlarının idealleştirilmiş kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirmesi grafiği [131] ...	26
Şekil 5.1. Mohr-Coulomb kriterine ait kırılma zarfı [135]	29
Şekil 5.2. Drucker Prager kriteri için akma yüzeyi	30
Şekil 5.3. von Mises ve Tresca kriterlerinin üç eksenli asal gerilme uzayındaki akma yüzeyleri	31
Şekil 5.4. DP, Mohr-Coulomb ve von Mises kriterlerinin akma yüzeylerinin asal gerilme uzayında görünümü	32
Şekil 6.1. Deneylerde kullanılan kil bazlı dolu harman tuğlası	37
Şekil 6.2. Ölçme yerleri [167]	38
Şekil 6.3. TS EN 771-1 standardının belirttiği şekilde 15 adet numunenin alınması	38
Şekil 6.4. Numunelerin 105±5 °C sıcaklıktaki etüvde kurutulması	40
Şekil 6.5. Tuğlaların yükleme yönüne dik yüzeylerinin çimento harcı ile başlıklanması	41
Şekil 6.6. Tuğlaların basınç dayanımlarının belirlenmesi süreci	42
Şekil 6.7. Tuğlaların elastisite modüllerinin belirlenmesi süreci.....	42
Şekil 6.8. Deneylerde kullanılan kalker esaslı kırmataş kum	43
Şekil 6.9. Deneylerde kullanılan kuma ait granülometri eğrisi ve elek analizi sonuçları	44
Şekil 6.10. Deneylerde kullanılan mikro çelik lifler ve özellikleri	45
Şekil 6.11. 40×40×160 mm boyutlarında oluşturulan harç numuneleri	46
Şekil 6.12. Harç numuneleri için a)basınç ve b)eğilme çekme deneyleri	46
Şekil 6.13. Harç numunelerinin elastisite modüllerinin belirlenmesi	48

Şekil 6.14. Duvar örüm işlemlerinde kullanılan örgü tipleri	49
Şekil 6.15. Yığma duvar elemanlarının hazırlanması.....	50
Şekil 6.16. Yığma duvar elemanları	50
Şekil 6.17. Yığma duvar elemanlarına kür işleminin yapılması	50
Şekil 6.18. Diyagonal basınç testlerinde kullanılan çelik başlıklar	51
Şekil 6.19. Diyagonal basınç testlerinin gerçekleştirildiği basınç test presi	52
Şekil 6.20. Yığma yapıların (a)mikro, (b)basitleştirilmiş mikro ve (c)makro tekniğiyle modellenmesi.....	52
Şekil 7.1. Yükleme doğrultusu boyunca oluşan diyagonal çatlaklar ve tuğla ile harç arasındaki ayrılmalar	55
Şekil 7.2. Üst çelik başlık altında meydana gelen ezilmelere ve tuğla-harç kırılmasına örnekler	56
Şekil 7.3. Ayrılarak göçmeye uğrayan duvarlara örnekler	56
Şekil 7.4. Toptan göçmenin meydana gelmediği duvarlara örnekler	57
Şekil 7.5. a)Süneklik kapasitesi b)Maksimum kayma mukavemeti c)Maksimum yer değiştirme miktarı d)Göçme yükü bakımından duvar elemanlarının karşılaştırılması	62
Şekil 7.6. Duvar elemanına ait mikro model	67
Şekil 7.7. Duvar elemanına ait makro model	68
Şekil 7.8. a)Mikro ve b)makro model çözümleri için yer değiştirmenin vektöriyel toplamının konturları..	69
Şekil 7.9. Mikro model çözümlerinden elde edilen a)maksimum ve b)minimum asal gerilme konturları ..	69
Şekil 7.10. Makro model çözümlerinden elde edilen a)maksimum ve b)minimum asal gerilme konturları	70
Şekil 7.11. Deneyssel ölçüm sonuçları ve sonlu eleman model çözümlerine ait yük-yer değiştirme eğrileri	70

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Basınç dayanımı ve biçimine harman tuğlası sınıfları [10].....	7
Tablo 2.2. Harçların karışım oranına ve minimum basınç dayanımına göre sınıflandırılması [14,20]	9
Tablo 6.1. TS EN 772-1 standardı tarafından tavsiye edilen yükleme hızı değerleri [170]	42
Tablo 6.2. Harman tuğlası için deneysel olarak belirlenen fiziksel ve mekanik özellikler	43
Tablo 6.3. 40×40×160 mm harç numuneleri için basınç ve eğilme çekme dayanımı değerleri	47
Tablo 6.4. Yığma duvar elemanlarına ait isim kodlamaları	49
Tablo 7.1. Lifsiz harç (NH) kullanılarak oluşturulan duvar elemanları için elde edilen mekanik parametreler	58
Tablo 7.2. Ağırlıkça %1 oranında mikro çelik lif içeren harç (L1) kullanılarak oluşturulan duvar elemanları için elde edilen mekanik parametreler	59
Tablo 7.3. Ağırlıkça %2 oranında mikro çelik lif içeren harç (L2) kullanılarak oluşturulan duvar elemanları için elde edilen mekanik parametreler	60
Tablo 7.4. Ağırlıkça %3 oranında mikro çelik lif içeren harç (L3) kullanılarak oluşturulan duvar elemanları için elde edilen mekanik parametreler	61
Tablo 7.5. Mikro ve makro model için analizlerde kullanılan malzeme parametreleri.....	68

EKLER LİSTESİ

	Sayfa
Ek- 1: Diyagonal Basınç Testleri İçin Duvarlarda Oluşan Hasarlar	84
Ek- 2: Duvar Elemanları İçin Yük-Yer Değiştirme Eğrileri.....	120



SİMGELER

c	: Kohezyon
A_n	: Numuneye uygulanan yüklemenin alanı
E_h	: Harç elastisite modülü
E_t	: Tuğla elastisite modülü
E_y	: Eşdeğer yığma malzemesi elastisite modülü
f_c	: Basınç dayanımı
f_t	: Çekme dayanımı
h_u, h	: Yükseklik
I_1	: Gerilme tansörünün birinci invaryantı
J_2	: Deviatorik gerilme tansörünün ikinci invaryantı
l_u, l	: Uzunluk
k	: Malzeme sabiti
m_d	: Etüvde tamamen kurutulmuş ağırlık
$m_{dry,u}$	: Değişmez kütleyle kadar kurutulan etüv kuru ağırlık
m_w	: Suyu doymuş ağırlık
M_{au}	: Numunenin havada tartımıyla bulunan kütle
M_{wu}	: Numunenin su içerisindeki tartımıyla bulunan kütle
n	: Yığma birimin brüt alanını ondalık cinsinden ifade eden bir katsayı
P	: Uygulanan yük
P_{max}	: Göçme yükü
$P_{ortalama}$	: Göçme yükü değerlerinin ortalaması
t_h	: Harç malzemesinin derz kalınlığı
t_t	: Tuğla malzemesinin yüksekliği
$V_{g,u}$	: Numunenin brüt hacmi
$V_{n,u}$	: Numunenin net hacmi
V_{vu}	: Boşlukların hacmi
w_u, t	: Genişlik
W_m	: Su emme miktarı
α	: Malzeme sabiti
δ_{max}	: Maksimum yer değiştirme miktarı
$\delta_{ortalama}$	: Maksimum yer değiştirme miktarı değerlerinin ortalaması
ρ	: Yığma malzemesine ait bir katsayı
$\rho_{g,u}$	: Brüt kuru yoğunluk
$\rho_{n,u}$	: Net kuru yoğunluk
ρ_w	: Su yoğunluğu
σ	: Normal gerilme
σ_M	: Malzemenin kırılacağı veya plastik hale geçeceği sınır gerilme değeri
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	: Asal gerilmeler
τ_0, τ	: Kayma gerilmesi
τ_{max}	: Maksimum kayma mukavemeti
$\tau_{ortalama}$	: Maksimum kayma mukavemeti değerlerinin ortalaması
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
ψ	: Dilatasyon açısı

KISALTMALAR

ACI	: American Concrete Institute
ASTM	: American Society for Testing and Materials
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
DP	: Drucker Prager
D1	: Derz kalınlığı 1 cm
D2	: Derz kalınlığı 2 cm
D3	: Derz kalınlığı 3 cm
EN	: European Norm (Avrupa Standartları)
FRP	: Fiber Reinforced Polymer
L1	: Ağırlıkça %1 oranında mikro çelik lif içeren harç
L2	: Ağırlıkça %2 oranında mikro çelik lif içeren harç
L3	: Ağırlıkça %3 oranında mikro çelik lif içeren harç
NH	: Lifsiz harç
O1	: Düz örgü
O2	: 1/2 şaşırtmalı örgü
O3	: 1/3 şaşırtmalı örgü
RILEM	: Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TS	: Türk Standartları

1. GİRİŞ

İnsanoğlu barınma ihtiyacını giderebilmek için asırlardır farklı farklı çözümler denemiştir. Önceleri ağaç dalları ve ağaç kütükleri ile bu ihtiyaç giderilirken, sonraları çevre koşullarına karşı güçlü olma isteği insanoğlunu yeni çözümler bulmaya mecbur kılmıştır. Buna bağlı olarak taş ve tuğla gibi yığma birimlerin birbirine harçlı/harçsız olarak kenetlenmesi ile oluşturulan ve yığma yapı olarak adlandırdığımız yapı sistemi ortaya çıkmıştır.

Yığma yapılar; tüm duvarlarının taşıyıcı olduğu ve yatay/düşey yüklerin genelde basınç gerilmeleri ile yapının temeline aktarıldığı yapı sistemleridir [1]. Bu yapıların inşasında işçiliğin önemi büyüktür ve bu yapılar gevrek malzemelerle inşa edildikleri için süneklikleri genel olarak düşüktür. Bu yapılar, düşük süneklikleri nedeniyle deprem vb. yükler karşısında aniden göçebilmektedirler. Nitekim şiddetli depremlerde birçok yığma yapı yıkılmış ve ciddi ölçüde can ve mal kayıpları yaşanmıştır. Meydana gelen bu kayıplar nedeniyle yığma yapıya olan güven azalmış ve yığma yapı inşası pek tercih edilmez hale gelmiştir. Yığma yapının yerini ise, yığma yapıya göre daha sünek bir davranış sergileyen betonarme sistemler almıştır. Yığma yapılar ise daha çok kırsal bölgelerde az katlı yapılar için tercih edilir olmuştur. Ancak günümüze kadar ulaşabilen ve herhangi bir hasara uğramadan ayakta kalmayı başarabilen cami, medrese, han, kale, kilise, köprü, minare, çan kulesi gibi birçok yığma yapı mevcuttur. Bu durum, yığma yapıların deprem vb. kuvvetler karşısında tamamen kötü bir davranışa sahip olduğu fikrinin yanlış olduğunu, uygun projelendirme ve yapım teknikleri ile yığma yapıların bu gibi kuvvetler karşısında iyi bir davranış sergileyebileceğini göstermektedir. Gerek bu tarihi yapıları ve yeni yapılacak olan yığma yapıları daha sünek bir davranış sergileyecek hale getirebilmek için gerekse tarihi yığma yapılardan hasar görmüş olanlarının güçlendirilmesi için birtakım çözümler üretmeyi amaçlayan çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmaların odak noktaları; genel olarak sünekliği ve çekme dayanımı düşük olan yığma yapıların bu özelliklerini iyileştirerek süneklik kapasitelerini, çekme mukavemetlerini ve şekil değiştirme özelliklerini artırabilmektir.

Yığma yapıların güçlendirilmesi/iyileştirilmesi işlemlerinde farklı farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en çok bilinenleri; hasır donatı ağı üzerine püskürtme beton uygulaması, yığma birimler arasındaki bağlantıyı artırabilmek için çelik elemanlar (kenet ve zivana elemanları gibi) veya ankrajlar kullanılması, lifli polimer malzemeler ile güçlendirme olarak sayılabilir. Bu yöntemler hem tarihi yığma yapılarda hem de yeni inşa edilecek olan yığma yapılarda uygulanmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında; yeni yapılacak yığma yapıların daha sünek bir davranış sergilemesini sağlayabilmek için bir çözüm üretmek amaçlanmıştır. Bu nedenle, beton içerisine eklenen çelik lifin betonun basınç dayanımı, çekme dayanımı, sünekliği, elastisite modülü gibi birçok mekanik parametresine olan olumlu etkileri göz önünde bulundurularak, yığma yapılarda da derz harcının içerisinde çelik lif kullanılabileceği düşünülmüştür. Çelik lifin harç

fazında kullanıldığı birtakım çalışmalar yapılmıştır/yapılmaktadır. Ancak yapılan çalışmaların birçoğunun sıva harcı için olduğu ve derz harcı için ilgili çalışmaların daha az olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak, harç içerisinde belirli oranlarda çelik lif kullanılarak laboratuvar ortamında oluşturulan yığma duvar elemanları için diyagonal basınç testleri yapılmış ve çelik lifin yığma duvar elemanlarının davranışına etkisi incelenmiştir. Tez çalışmasının en önemli özgünlüklerinden biri derz harcı içerisinde çelik lif kullanımının yığma duvarların davranışına etkisinin incelenmesidir.

Yığma yapıların gerek çeşitli yüklemeler altındaki merak edilen davranışlarını belirleyebilmek için gerekse mevcut durumlarının değerlendirilmesi ve uygun görülenlerinin güçlendirme işlemlerinin gerçekleştirilmesi için ilgili yapıların sonlu eleman model çözümleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çözümlerin gerçekleştirilebileceği birçok paket program mevcuttur. Ancak bu programlara veri girişi esnasında, yapıya ait sınır şartlarının ve malzeme özelliklerinin gerçek yapıyı temsil edebilecek şekilde tanımlanması oldukça önemlidir. Yapıyı temsil edecek en uygun modelin oluşturulması halinde istenilen yüklemeler altında gerçekçi çözümler elde edilebilecektir.

Bu tez çalışması, deneysel çalışmalar ve sonlu eleman model çalışmaları olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Deneysel çalışmalar kapsamında öncelikle, harç oluşturmada kullanılacak olan kum için birtakım fiziksel deneyler gerçekleştirilmiş, daha sonra harcın karışım oranları belirlenerek bu karışım oranlarına sahip harçlara ve yığma birimi olarak kullanılacak olan dolu harman tuğlasına ait fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır. Tüm bu deneyler Türk Standartları Enstitüsü tarafından tavsiye edilen standartlar esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra tuğla ve harç numuneleri kullanılarak, üç farklı örgü (düz örgü, 1/2 şaşırtmalı örgü ve 1/3 şaşırtmalı örgü), dört farklı harç (ağırlıkça %0, %1, %2 ve %3 oranında çelik lif içeren harçlar) ve üç farklı derz kalınlığı (1 cm, 2 cm ve 3 cm) için gerekli olan 36 farklı seri ve her bir seriden 3 tekrar numunesi olmak üzere toplamda 108 adet duvar elemanı üretilmiştir. İlgili duvar elemanları gerekli kür koşulları sağlandıktan sonra rijit çelik başlıklar yardımıyla diyagonal basınç testine tabi tutulmuştur. Her bir duvar elemanının göçme biçimleri ve süneklik kapasitesi, maksimum kayma mukavemeti, maksimum deplasman miktarı ve göçme yükü gibi mekanik parametreler bakımından en iyi davranışı gösteren duvar elemanı (optimum duvar elemanı) belirlenmiştir.

Sonlu eleman model çalışmaları kapsamında ise, deneysel çalışmalar ile belirlenen optimum duvar elemanının mikro ve makro modelleme tekniklerine göre sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Duvar elemanının doğrusal olmayan davranışı için Drucker Prager kriteri kullanılmıştır. Oluşturulan sonlu eleman modelleri, deneysel yükleme ile benzer şekilde yüklemeye tabi tutularak sonlu eleman çözümleri elde edilmiş ve bu çözümler deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak sonlu eleman modellerinin etkinliği araştırılmıştır. Sonlu eleman çözümlerinde ANSYS paket programı kullanılmıştır.

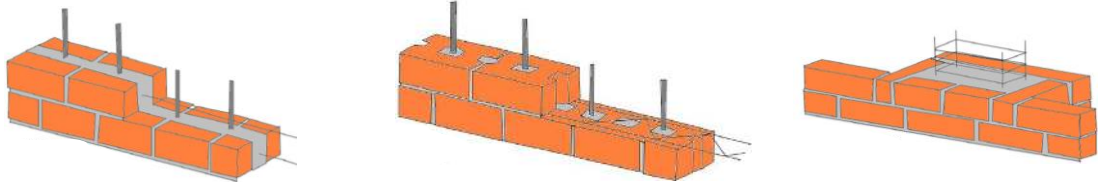
2. YIĞMA YAPILAR VE DEPREM DAVRANIŞI

Yığma yapılar, geçmişten günümüze insanoğlunun barınma ihtiyacını karşıladığı en eski yapı türüdür. Binlerce yıllık yapı kültürünün bir sonucu olarak ortaya çıkmış olan ve duvarlarının taşıyıcı malzeme olarak kullanıldığı bu tür yapılar günümüze kadar ayakta kalabilmiş ve teknolojileri hakkında bilgi edinmemizi sağlamıştır (Şekil 2.1). Yığma yapı sistemleri günümüze kadar yaygın biçimde uygulanmış, fakat modern çağda iskelet taşıyıcılar daha çok kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 2.1. Tarihin bilinen en eski yapısı (Göbekli Tepe, Şanlıurfa, M.Ö 10000) [2]

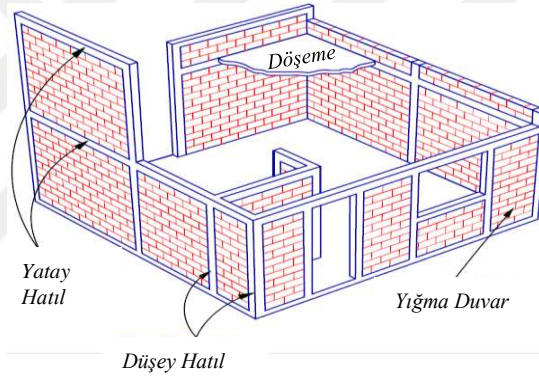
Yığma yapı sistemleri, gerek taşıyıcı sistemin getirdiği zorunluluk gerekse estetik bir mimari görünüm maksadıyla birçok yapı elemanının bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu yapı elemanları duvar, döşeme, ayak, sütun, kubbe ve tonoz olarak sayılabilir. Yığma yapı sistemleri bu yapı elemanları yardımıyla donatısız, donatılı ve kuşatılmış yığma yapı olmak üzere üç farklı şekilde inşa edilebilirler (Şekil 2.2). Donatılı yığma yapılar, kalifiye işçilik gerektirmesi ve donatı yerleştirmeye uygun yığma birimi temin etmedeki zorluklar nedeniyle Türkiye’de pek fazla tercih edilmemektedir. Donatısız yığma yapılar ise hem daha az kalifiye işçilik gerektirmesi hem de kolay malzeme temini noktasında donatılı yığma yapıya nazaran daha avantajlıdır ve Türkiye’de çoğunlukla tercih edilen yığma yapı tipidir.



a) Donatılı yığma yapı [3]



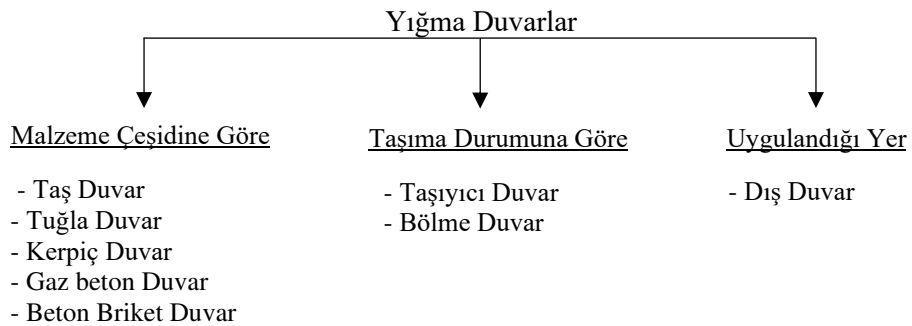
b) Donatısız yığma yapı [4]



c) Kuşatılmış yığma yapı [5]

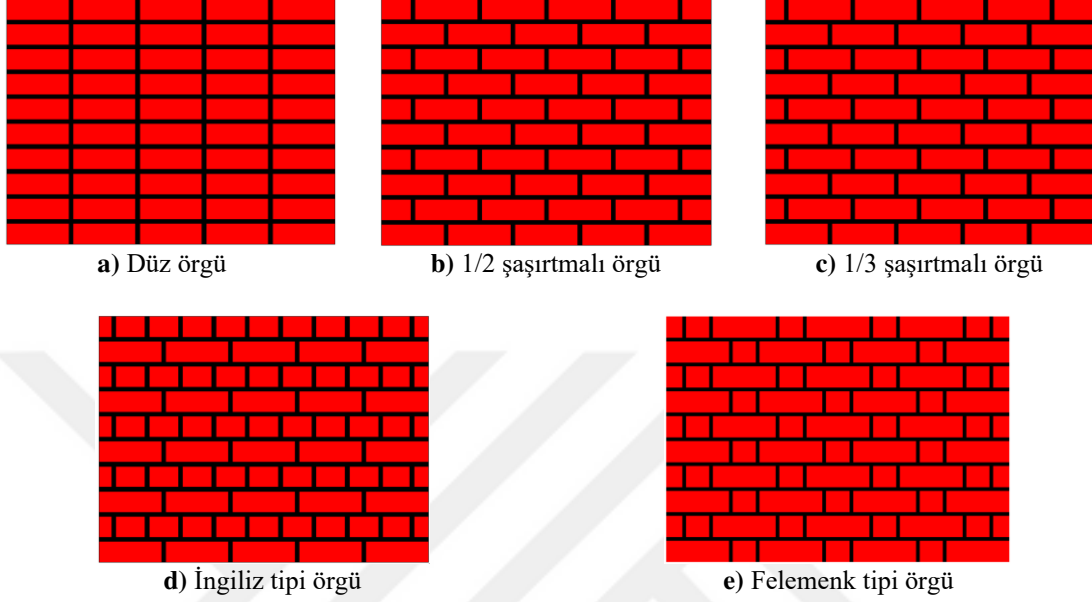
Şekil 2.2. Farklı sisteme sahip yığma yapı örnekleri

Yığma yapılar için en önemli yapı elemanı duvarlardır. Yığma duvarlar, kullanıldıkları malzemeye, taşıma durumuna ve yapıldıkları yere göre sınıflandırılırlar (Şekil 2.3) [6].



Şekil 2.3. Yığma duvarların sınıflandırılması

Yığma duvarlar oluşturulurken belirli bir örgü biçimi kullanılmaktadır. Bu örgü biçimi, kullanılan yığma birimin geometrisine göre değişiklik göstermekte olup, bu örgü tiplerinden bazıları Şekil 2.4’te verilmiştir.



Şekil 2.4. Duvar örgü tipi örnekleri

2.1. Yığma Yapı Malzemeleri

Yığma yapıları oluşturan malzemeler başlıca yığma birim ve harç olarak söylenebilir. Ancak uygulanacak sisteme göre beton dolgu, donatı çeliği ve öngerilme çeliği gibi malzemeler de kullanılmaktadır.

2.1.1. Yığma Birimler

Yığma birimler, yığma yapıyı oluşturan en temel yapı malzemesi olup, yapı davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Malzeme teminindeki kolaylık ve birtakım ekonomik nedenlere bağlı olarak farklı yığma birimler tercih edilmektedir.

Tuğla

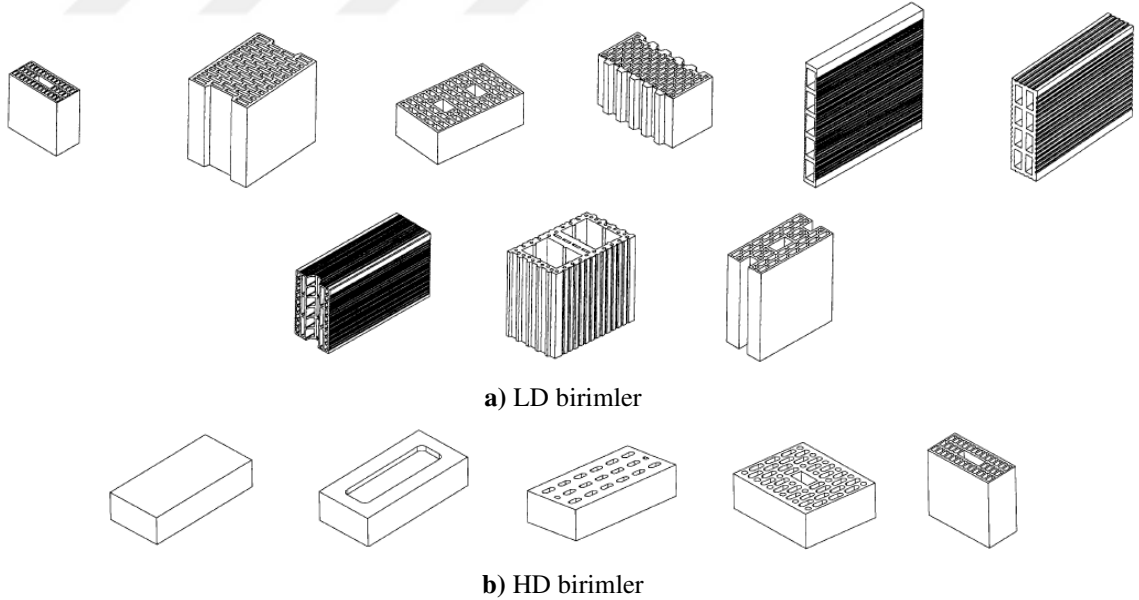
Kil veya diğer killi topraktan, kum veya diğer toz katkı maddesi ilâve edilerek veya edilmeden seramik bağ elde etmeye yeterli yüksek sıcaklıkta (800-1000 °C sıcaklıktaki fırınlarda) pişirilmek suretiyle elde edilen kâgir birimlere tuğla denilmektedir [7]. Çok eski çağlardan beri yapı sektöründe sıklıkla kullanılan tuğlalar, ucuz ve kolay üretilmesi, ses yalıtımı, ısı yalıtımı gibi üstün özelliklerinin olması nedeniyle oldukça kullanışlıdır. Tuğlalar, ölçüsü ve oluşturduğu düzenlerle, duvarın görünüşüne de ayrı bir özellik kazandırır. Örneğin Geleneksel İslam Mimarisinde tuğla,

zengin geometrik düzenlerde kullanılmış ve etkileyici dekoratif değerler elde edilmiştir [8]. Günümüzde tuğlaya alternatif olarak yeni malzemeler üretilmiş olsa da, tuğlalar sahip olduğu özellikler ve üstünlükler nedeniyle en çok tercih edilen duvar örgü malzemelerinden biri olmaya devam etmektedir.

Tuğlaların sahip olması gereken özelliklerden bazıları şunlardır:

- ❖ Homojen olmalı
- ❖ Porozitesi düşük ve ince taneli olmalı
- ❖ İyi pişmiş olmalı
- ❖ Kenar ve yüzeyleri düzgün olacak şekilde kalıplanmış olmalı
- ❖ Çatlak, yarık ve boşluklar olmamalı
- ❖ Yanık olmamalı
- ❖ 1.5 m yükseklikten sert bir zemine bırakıldığında ikiden fazla parçaya ayrılmamalı
- ❖ Su içerisinde 12 saat bekletildiğinde %20’den fazla su emmemiş olmalı [9].

Tuğlalar delikli, boşluklu ve dolu olmak üzere farklı geometrilerde üretilmekte olup, TS EN 771-1:2011+A1 standardı tarafından birim hacim kütlelerine göre ikiye ayrılmıştır [7]. Düşük birim hacim kütlelerine sahip tuğlalara LD, yüksek birim hacim kütlelerine sahip tuğlalara HD kâgir adı verilmektedir. Bu tuğla kâgir birimlere ait örnekler Şekil 2.5’te verilmiştir.



Şekil 2.5. LD ve HD tuğla kâgir birimlere ait örnekler [7]

Yığma yapılarda en çok kullanılan yığma birimlerinden birisi yüksek yoğunluğa sahip olan harman tuğlalarıdır. Harman tuğlaları, basınç dayanımına ve biçimine göre Tablo 2.1’deki gibi

sınıflandırılmaktadır [10]. Tez çalışması kapsamında yığma birimi olarak dolu harman tuğlası kullanılmıştır.

Tablo 2.1. Basınç dayanımı ve biçimine harman tuğlası sınıfları [10]

Sınıflar	Ortalama Hacim Kütlesi (kg/dm ³) (maksimum)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa) (minimum)	Basınç Dayanımı (MPa) (minimum)
Dolu Harman Tuğlası	Orta Dayanımlı	5.0	4.0
	Az Dayanımlı	3.0	2.5
Delikli Harman Tuğlası	Orta Dayanımlı	1.4	5.0
	Az Dayanımlı	1.4	3.0
			2.5

Doğal Yapı Taşları

Doğada mevcut taş ocaklarından çıkarılan, atmosferik etkilere karşı dayanıklı, yapı işlerinde kullanılmaya elverişli olan homojen malzemelere doğal yapı taşları denilmektedir. TS 771-6 [11] standardı tarafından, volkanik, sedimanterik ve metamorfik oluşumlu kayalardan elde edilen malzemeler doğal yapı taşları olarak kabul edilmektedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY)-2018'e göre [12], TS 771-6 [11] tarafından doğal yapı taşı olarak kabul edilen malzemelerin taşıyıcı duvarların yapımında kullanılabileceği belirtilmiştir. Yığma yapılarda kullanılacak olan doğal yapı taşlarının işlenebilirliğinin iyi olmasına, harç ile aderansının iyi olmasına, içerisinde çatlak, hava etkisi ile ayrılmış veya ayrılmaya başlamış kısımlar bulunmamasına, taş ocağının yüzeye açık yerlerinden çıkarılan taşların hava etkisi ile ayrılmış, bozulmuş veya rengi değişmiş kısımlarının temizlenerek kullanılmasına dikkat edilmelidir.

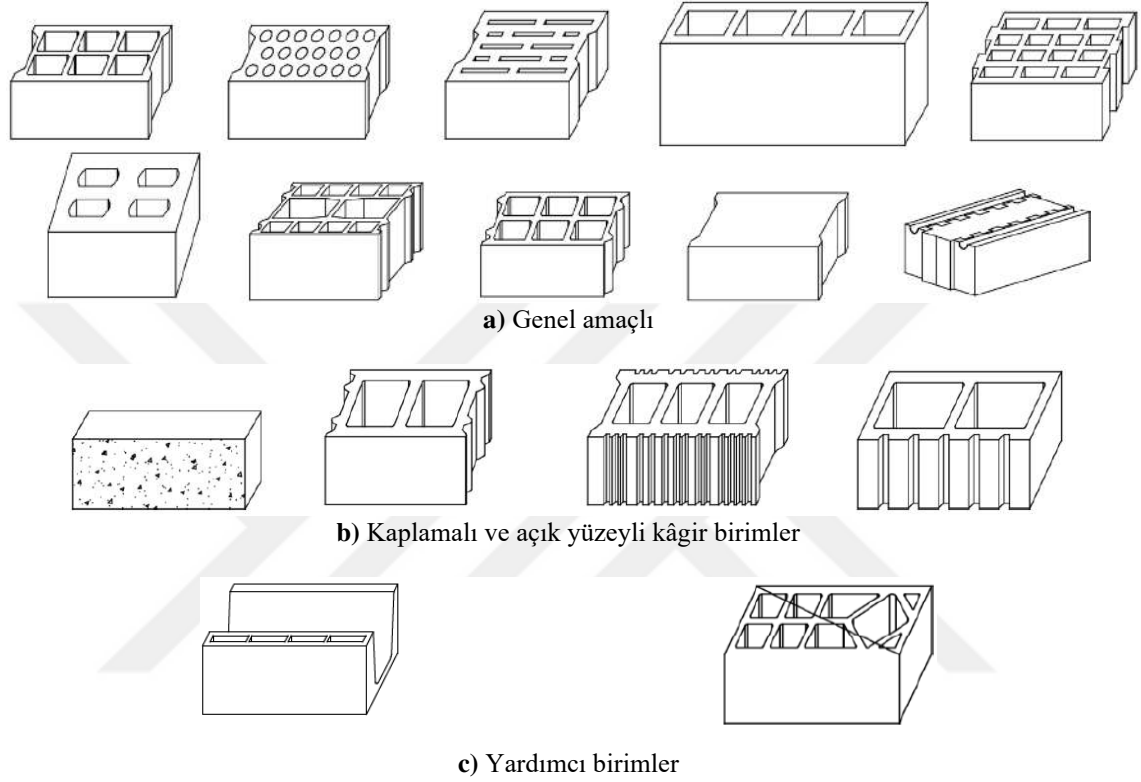
Kerpiç

Killi ve uygun nitelikli toprak içerisine saman veya diğer katkı maddeleri (ot, kenevir lifleri, çam iğneleri, ağaç dalları, rende talaşları vb.) katılarak su ile yoğrulup kalıplara dökülerek şekillendirilmesi ve normal hava koşullarında kurutulması ile elde edilen yapı malzemesidir. Kerpiç bloklar boyutlarına göre ana ve kuzu olarak adlandırılırlar. TBDY-2018 tarafından kerpiç blokların taşıyıcı duvar malzemesi olarak kullanımı yasaklanmıştır [12].

Beton Briket

Çimento, agrega, su, kimyasal ve mineral katkıları, renk verici pigmentler ve hazırlanma esnasında veya hazırlandıktan sonra uygulanan veya karışıma ilave edilen diğer malzemelerin karıştırılmasıyla imal edilen yapı malzemesidir [13]. Yapımında doğal agregalar kullanılabildiği gibi elenmiş kazan cürufu, tuf cürufu, kömür tozu, sünger taşı gibi hafif agregalar, perlit gibi mineral agregalar, öğütülmüş tuğla ve kiremit malzemesi, fırınlanmış kil gibi malzemeler de kullanılmaktadır. Genellikle delikli olarak üretilen beton briketler, yüksek ısı ve ses yalıtımı

sağlaması, hafif olması, donma-çözülme direncinin yüksek olması, yangın dayanımının iyi olması sebebiyle günümüzde bölme duvar, çatı ve baca yapımında sıklıkla kullanılmakta olup, taşıyıcı duvar malzemesi olarak kullanılması TBDY-2018 [12] tarafından yasaklanmıştır. Uygulamada kullanılan farklı şekillerdeki beton briketler Şekil 2.6’da verilmiştir [13].



Şekil 2.6. Farklı şekillerdeki beton kâgir birimlere ait örnekler [13]

2.1.2. Harç

Yığma birimleri birbirine bağlayan malzemeye genel olarak harç denir. TS 2510 [14] standardında harç için yapılan tanım şöyledir; duvar harcı, TS 2717’ye [15] uygun harç kumu ile bağlayıcı olarak çimento, kireç hamuru, söndürülmüş toz kireç, harç çimentosunun ayrı ayrı veya bir kaç bir arada kullanılarak ve yeteri kadar su ve gerektiğinde katkı maddeleri ile karıştırılarak elde edilen ve duvarların örülmesinde kullanılan yapı malzemesidir.

Harcın geçmişte ilk kullanımı, kerpiç malzemenin arasına çamur sürülmesi olarak bilinmektedir. Çamurdan sonra Roma döneminde kireç harcının kullanıldığı görülmektedir. Çamur harcı zaman içerisinde gelişerek horasan harcı haline gelmiştir. Horasan harcında ise öğütülmüş ve fırınlanmış kil, kireç ve su bulunmaktadır. Bazı horasan harçlarında ince çakıl, taş tozu, mermer tozu, keçi kılı ve yumurta akı gibi malzemelere de rastlanmıştır [16–18].

Günümüzde duvarların inşasında takviyeli harç kullanımı oldukça yaygındır. Kireç, harcın sertleşmesini ve su kaybını yavaşlatmakta iken çimento ise dayanımı artırmaktadır. Duvarların

örülmesi sırasında harcın hızlı bir şekilde sertleşmemesi gerekir. Harcın içerisine katılan su miktarının, iyi pişmemiş tuğlanın emeceği su miktarı da göz önüne alınarak belirlenmesi gerekir. İyi pişmemiş tuğlalar, yeterli harç dayanımının sağlanmamasına neden olmaktadır [19].

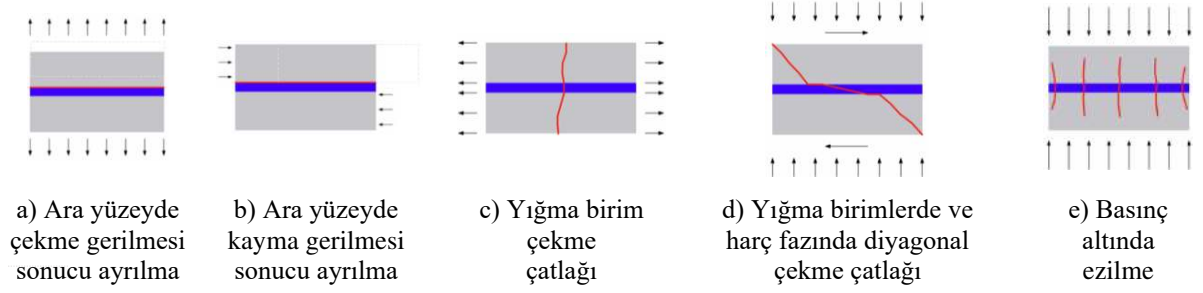
Harçlar karışım oranlarına göre A, B, C, D ve E sınıfı olmak üzere beş sınıfa ayrılır. Harçların sarsma tablası deneyinde 110 ± 5 oranında bir yayılma oluşturacak kıvamı için basınç dayanımı deneyi uygulandığında bulunacak sonuç, harç sınıfları için aşağıda verilen değerlere uygun olmalıdır (Tablo 2.2) [14,20].

Tablo 2.2. Harçların karışım oranına ve minimum basınç dayanımına göre sınıflandırılması [14,20]

Harç Sınıfı	Tip No	Kum 1.3 t/m ³ *	Çimento 1.2 t/m ³ *	Harç Çimentosu 1.0 t/m ³ *	Kireç Hamuru 1.3 t/m ³ *	Toz Kireç 0.6 t/m ³ *	Minimum Basınç Dayanımı (MPa)
A	-	3	1	-	-	-	15
B	1	4	1	-	-	-	11
	2	4	1	1/2	-	-	
	3	4	1	-	-	1/2	
	4	4	1	-	-	1	
C	1	7-9	1	2	-	-	5
	2	5	1	-	-	-	
	3	5	1	-	1	-	
D	1	6-8	1	-	2	-	2
	2	6-8	1	-	-	3	
	3	2-3	-	1	-	-	
E	-	3	-	-	1	-	0.5

* t/m³ cinsinden verilen değerler, malzemelerin birim hacim ağırlıklarıdır.

Harç, duvar elemanına gelen yatay ve düşey kuvvetleri kolayca aktarabilmelidir. Bunun sağlanabilmesinde bağlayıcı malzemesinin tipi, miktarı, kalitesi, karışımdaki su oranı, taş ve tuğla gibi yığma birimlerin yüzey dokusu oldukça önemlidir. Fakat duvar elemanlarında çatlaklar oluşuyorsa bunun sebebi tam olarak bilinemez. Çatlağın oluşumunu etkileyen en önemli etkenler yığma birimi (boyutları, malzeme cinsi ve mekanik özellikleri) ve derz (kullanılan bağlayıcı malzemeler, derz kalınlığı, işlenebilme yeteneği, mukavemet ve aderans) kaynaklıdır [8]. Duvar elemanlarında görülen başlıca göçme modları şöyledir (Şekil 2.7):



Şekil 2.7. Duvar elemanlarında görülen başlıca göçme modları [21,22]

Yığma duvarlardaki göçme modları incelendiğinde, hasarların bazılarının harç kaynaklı olduğu görülecektir. Harç fazında meydana gelen hasarları etkileyen en önemli faktörler ise kullanılan harcın içeriği, karışım oranları ve işçiliğidir. Kullanılacak harcın içerisindeki malzemeler çimento, kum, kireç, su ve uygulamaya göre katkı malzemeleri olarak düşünülürse, her bir malzemenin harç fazına etkisi bilinerek uygun bir karışım oranı sağlanmalıdır. Örneğin; çimento kullanılmayan harçlarda, harç mukavemetinin düşük olacağı, kireç kullanılmadığında, harcın işlenebilirliğinin düşeceği ve daha erken sertleşeceği bilinmelidir. Bunun için öncelikle, araştırmacıların deneysel çalışmalarda kullanmış olduğu harç karışım oranları detaylıca incelenmelidir. Daha sonra harcın işlenebilirliği de göz önünde bulundurularak laboratuvar ortamında harç deneyleri (basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, slump vs.) yapılmalıdır. Harç için su/çimento oranı, yapılacak bu deneyler ile araştırmacı tarafından belirlenmelidir. Çünkü deneylerde yığma birimi olarak iyi pişmemiş tuğla kullanılıyorsa, tuğla tarafından emilecek su miktarı göz önünde bulundurularak harca su ilave edilmelidir [23].

2.1.3. Beton Dolgu

Donatılı yığma yapılarda donatıların yerleştirildiği delikleri veya yığma birimdeki boşlukları doldurmak amacıyla kullanılmaktadır. Yapılacak beton dolgunun minimum basınç dayanımının 12 MPa olması istenmektedir [24].

2.1.4. Donatı Çeliği

Taşıyıcı duvarlar için yığma birimlerin delikleri boyunca veya derz harcı ile birlikte kullanılmaktadır. Donatı çeliği sayesinde yığma duvarın sünekliğinin artırılması amaçlanmaktadır [24].

2.1.5. Öngerilme Çeliği

Yurdumuzda uygulaması pek görülmeyen öngerilmeli yığma yapılarda kullanılmaktadır. Bu çeliğin özellikleri TS EN 1996-1’de belirtilmiştir [24].

2.2. Yığma Yapıların Deprem Davranışı

İnsanoğlunun yerleşik hayata geçmesi ile yapılmaya başlanan yığma yapılar, kullanılan malzeme ve yapım tekniğine göre çeşitlenmişlerdir. Günümüze kadar gelen anıt niteliğindeki yığma yapıların çoğu, dönemin en yetkin mimarları/mühendisleri tarafından, nesilden nesile aktarılan tasarım bilgileri kullanılarak, inşa edildikleri bölgenin inşaat kültürünü ve sosyo-ekonomik durumunu yansıtacak şekilde özenle inşa edilmişlerdir. Yurdumuzda da anıt niteliğinde pek çok yığma yapı mevcuttur. Bu yapılar geçmişten günümüze kırsal bölgelerde moloz taş veya kerpiçten, ilçe ve kent merkezlerinde ise tuğla veya briketten imal edilerek günümüze kadar ulaşmıştır.

Günümüzde çoğunlukla kırsal bölgede inşa edilen yığma yapıların önemli bir kısmı, mühendislik hizmeti almadan, denetimden uzak bir şekilde, yöredeki malzemeler kullanılarak ve ustalık yetkinliği olmayan kişiler tarafından çok kısa sürede özensizce inşa edilmektedir. Kent ve ilçe merkezlerinde inşa edilen, tasarım aşamasında kısmen mühendislik hizmeti görmüş, tuğla veya briketten yapılan yığma yapılar, kırsal bölgelerde inşa edilenlere oranla daha iyi bir deprem davranışı göstermişlerdir. Örneğin, Erzincan Depremi'nde (1992) şehir merkezinde bulunan yığma yapılar (Belediye Binası, Orman Bölge Şefliği Binası vd.), Kocaeli (İzmit) Depremi'nde (1999) ise Devlet Su İşleri Hizmet Binası, birçok çerçeve taşıyıcı sisteme sahip yapıların yıkıldığı depremi hasarsız veya çok az hasar görerek atlattırlardır [25,26]. Ancak yapım ve tasarım kusurlarından ve denetim eksikliğinden kaynaklanan nedenlerle, yığma binaların deprem performansı çeşitlilik göstermektedir [27–36]. Sünekliği zayıf olan bu binalara etki eden deprem kuvvetinin, binaları elastik ötesi şekil değiştirmelere zorladığı durumlarda, bu yapılarda zayıf bir performans gözlenmiş ve çeşitli hasarlar meydana gelmiştir. Çeşitli depremlerde hasar gören bazı binalar Şekil 2.8'de görülmektedir.

Yığma yapılarda deprem hasarlarına yol açan ana nedenler aşağıda sıralanmıştır:

- **Duvar elemanı kaynaklı hasarlar:** Yığma yapılarda görülen önemli hasar nedenlerinden biri, yığma birimi olarak kullanılan malzemelerin özellikleri ve duvarın örgü tipleridir. Standart dışı ve yetersiz işçilikle imal edilen duvarlar, üzerine etki eden yükü yeterli bir şekilde taşıyamayacaktır [25].
- **Duvar harcı kaynaklı hasarlar:** Deprem etkisi altında taşıyıcı duvarlarda meydana gelen kesme gerilmeleri; tuğla ile harç arasındaki aderans ve sürtünme gerilmeleri ile taşınır. Depremde hasar gören yığma yapılarda büyük oranda, dayanımı düşük harç kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle harcın özellikleri, yapının performansı üzerinde oldukça etkilidir.
- **Taşıyıcı sistem tasarımı kaynaklı hasarlar:** Yığma yapı hasarlarının en önemli nedenlerinden birisi de, yapının taşıyıcı sisteminin ilgili standart ve yönetmeliklere uygun olmamasıdır. Uygun olmayan bu hususlar; duvarlardaki boşluk oranının fazla olması,

yatay ve düşey hatılların uygun bir şekilde inşa edilmemesi ve depremin yapıya olan etkisini artıracak konsol elemanların bulunması şeklinde sıralanabilir.



Erzurum depreminde (2004) hasar gören Aşkale ilçesi Askeri Garnizon binası [37]



Erzurum depreminde (2004) hasar gören Aşkale ilçesi lise okul binası [38]



Dinar depreminde (1995) hasar gören, üst katı boşluklu tuğla ile imal edilmiş yığma yapı [25]



Bingöl depreminde (2003) hasar gören konsol çıkmalı yığma yapı [39]

Şekil 2.8. Çeşitli depremlerde hasar gören bazı yığma yapılar

3. LİFLER HAKKINDA GENEL BİLGİ VE ÇELİK LİFLER

Bir boyutu diğer boyutuna oranla çok büyük olan, doğal yollarla bulunabilen veya insan eliyle üretilen her çeşit malzemeye lif denilmektedir [40]. Günümüzde yapı malzemelerinde sıklıkla kullanılan liflerin geçmişi oldukça eskiye dayanmaktadır. Yaklaşık 4500 yıl önce kullanılan saman takviyeli kil harcı (kerpiç), bilinen en eski lifli yapı malzemesi olarak kabul edilebilir. Ayrıca kerpiç içerisinde de keten, kenevir, çeşitli hayvanların kuyruk ve yele kılı gibi lifler kullanılmıştır [41–44]. Yurdumuzda lif kullanımının ilk örnekleri ise, Mimar Sinan tarafından yapılan eserlerde, içerisinde saman ve hayvan kılının kullanıldığı horasan harcı olarak bilinmektedir [45]. Lifi tanımlayan en iyi parametre olarak, lif boyunun eşdeğer lif çapına bölünmesiyle elde edilen narinlik oranı kabul edilmektedir [46]. Beton malzemedeki kullanılan lifler için narinlik oranının, boyları 6-76.2 mm arasında değişen lifler için 30-150 arasında değişmesi gerektiği belirtilmektedir [47].

Günümüzde betonun değişik alanlarda kullanma ihtiyacının ortaya çıkması ve beton teknolojisindeki gelişmelerin neticesinde lif katkı betonlar üretilmeye başlanmıştır [48]. Betonun içerisine farklı miktarlarda, farklı narinlik oranlarında, farklı tiplerde (çelik, plastik, cam, naylon, polipropilen gibi çeşitli malzemelerden) lifler ilave edilerek beton özellikleri olumlu yönde iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bilinen ilk lifli beton 1900’lü yıllarda kullanılmaya başlasa da, betonun içerisine çeşitli metal parçalarının katılmasıyla beton özelliklerinin iyileştirilmesi çalışmaları oldukça eskiye dayanmaktadır.

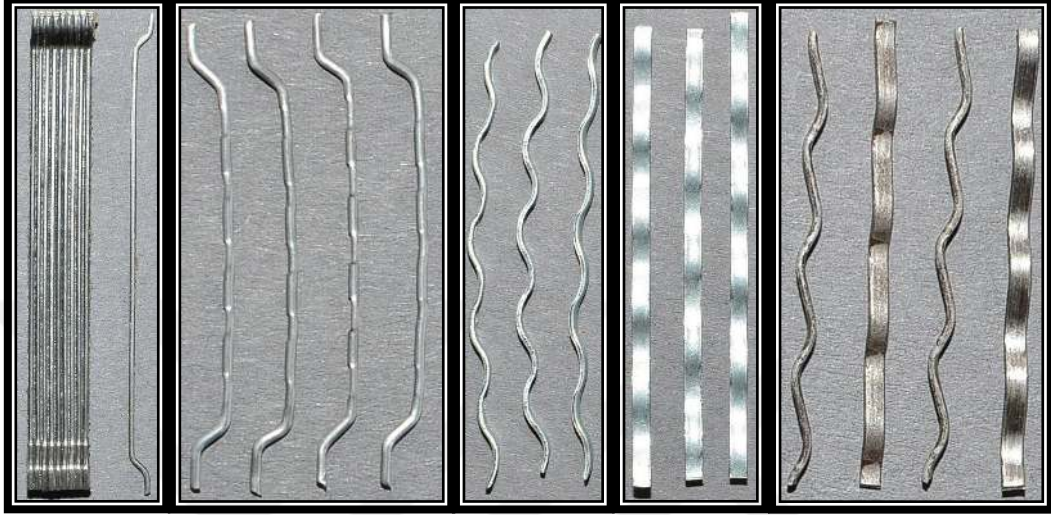
3.1. Çelik Lifli Beton

Çelik lif, yüksek çekme mukavemetine sahip olması ve plastik şekil değiştirme özelliğinin fazla olmasından dolayı birçok alanda kullanılmaktadır. Betonun sünekliğini artırmak için de çelik lif kullanılması çok tercih edilen bir yöntemdir. Çelik lif takviyesinde genellikle, soğuk çekilmiş düşük karbonlu çelik kullanılmaktadır. Kullanılan çelik lifin tipine ve üretim şekline bağlı olarak çekme mukavemeti 345-2100 MPa arasında, maksimum uzama oranı ise %0.5-35 arasında değişmektedir [49]. Karbon çeliğinden ya da paslanmaz çelikten yapılan çelik liflerin süreksiz dağılmış bir şekilde, çimento, agrega, su gerektiğinde puzolan veya katkı maddesi ilave edilmesiyle hazırlanan kompozit malzemeye çelik lif takviyeli beton denir [50].

3.1.1. Çelik Lif Tipleri

Çelik lifler mekanik özellikleri (çekme dayanımı, elastisite modülü vs.) ve geometrik özelliklerine (narinliği, şekil durumu vs.) göre tanımlanır. Beton içerisinde çoğunlukla dairesel en kesite sahip, düz (yüzeyi pürüzsüz), dalgalı, ay biçiminde dalgalı, kancalı (tek ucu veya her iki ucu kancalı), üzerinde çentik açılmış çelik lifler kullanılmaktadır (Şekil 3.1) [51]. Çelik lif üzerine

yapılan çalışmalar ve makine teknolojisindeki gelişmeler sayesinde, değişik üretim yöntemleri denenmiş, farklı en kesitlerde (dikdörtgen, üçgen, yarım daire, düzensiz geometri) ve çekme dayanımı yüksek (2500 MPa'yı bulan) lif tipleri üretilmiştir. Yüksek dayanıma sahip betonlar, yüksek dayanıma sahip bu liflerle kullanıldığında lifin aderansı daha yüksek olmuştur [52].



Şekil 3.1. Çeşitli tiplerdeki çelik lifler [53]

3.1.2. Çelik Lifli Betonun Kullanım Alanları

Normal beton içerisinde çelik lif kullanılması betonun pek çok katkısı vardır. Betonun dayanımının artması, enerji yutma kapasitesinin artması, sünekliğinin artması, statik ve dinamik yükler karşısında göstermiş olduğu iyi davranış, çatlak oluşumunun gecikmesi/önlenmesi çelik liflerin betona sağladığı katkılardan bazılarıdır. Sağlamış olduğu bu katkılardan dolayı çelik lifli beton çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Çelik lifli beton uygulamalarına tünellerde, havaalanı ve karayolu yol kaplamalarında, endüstri yapılarında, hidrolik yapılarında, istinat duvarı yapımında, kabuk yapılarda, stratejik öneme sahip yapılarda, prefabrik yapılarda, yüksek performanslı beton üretiminde, liman kaplamalarında, kanal kaplamalarında, sığınak kaplamalarında, sığınak kapılarında, güvenlik odalarının yapımında, köprü mesnetlerinin korunmasında, bozulan deniz yapılarının ve köprülerin onarımında, betonarme panel elemanlarında ve patlamaya karşı dayanıklı olması gereken yapılar gibi daha pek çok yerde rastlamak mümkündür.

3.1.3. Çelik Lifli Betonların Özellikleri

Lif takviyeli betonların içerisindeki liflerin tipi, geometrisi, boyutu, yüzey özellikleri, dayanımı, dağılımı, eğilme karakteristiği, üretildiği malzeme, karışım içerisindeki yüzdesi,

narınlığı gibi faktörler betonun davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin; kısa lifler uzun liflere göre betonun çekme dayanımını daha fazla artırmaktadır. Bu durum mikro çatlakların önlenmesinde kısa liflerin daha etkin olmasıyla açıklanabilir. Kısa lifler mikro çatlaklar arasında köprü görevi görerek çekme dayanımını artırır [54]. Narınlık oranının etkisi için de bir örnek verilecek olunursa; beton içerisindeki lifin narınlık oranı arttıkça işlenebilirlik azalmakta, karıştırma, yerleştirme ve lifin karışım içerisinde topaklanması gibi sorunlar oluşabilmektedir [55]. Beton içerisindeki lif miktarının artışı ise çatlakların engellenmesini sağlamaktadır [51]. Beton içerisindeki çelik lifin betonun işlenebilirliği, basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, yorulma dayanımı, darbe dayanımı, aşınma dayanımı, tokluk ve rötre gibi özelliklerine etkisi aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır:

- ❖ **İşlenebilirlik:** Beton içerisindeki lifin hacmi ve tipi (geometri ve narınlık) çelik lifli betonun işlenebilirliğini etkilemekte olup, lifin hacmi ve narınlığı arttıkça işlenebilirlik azalmaktadır [56]. Beton içerisinde hacimce çok lif kullanıldığı durumlarda, gerektiğinde akışkanlaştırıcı katkıları kullanılmalı ve liflerin beton içerisinde homojen dağılımı sağlanmalıdır [43,46,49,57–61].
- ❖ **Basınç Dayanımı:** Beton içerisinde çelik lif kullanılması betonun basınç dayanımına etkisinin belirlendiği birtakım çalışmalar mevcuttur. Gao ve Morino [62] yapmış oldukları çalışmada, hacimce %0, %0.6, %1.0, %1.5 ve %2.0 oranlarında lifler kullanarak ürettikleri lifli betonun basınç dayanımının, hacimce %2.0 oranında lif kullanıldığı durumda lifsiz betona göre en büyük artışı gösterdiğini belirtmişlerdir. Lee [63], çelik lif oranı arttıkça basınç dayanımının %16'ya kadar arttığını belirtmiştir. Wu vd. [64], yüksek performanslı betonların içerisine kancalı uçlu çelik liflerin %2 hacim oranında katılmasıyla beton basınç dayanımının lifsiz betona nazaran yaklaşık %50 arttığını bildirmişlerdir. Song ve Hwang [65] ise lif oranı arttıkça belirli bir seviyeye kadar beton basınç dayanımının arttığını ancak belirli bir seviyeden sonra basınç dayanımının değişmeyeceğini hatta lifsiz betona göre düşük basınç dayanımı elde edilebileceğini ifade etmişlerdir.
- ❖ **Çekme Dayanımı:** Beton içerisinde çelik lif kullanımının betonun çekme dayanımını artırdığı birçok araştırmacı tarafından belirtilmiştir [66–69]. Tokyay vd. [70] çelik lifli betonların lifsiz betona nazaran %35 daha fazla çekme dayanıma sahip olduğunu, Bentur ve Mindess [49] bu fazlalığın yaklaşık olarak %5 ile %133 arasında değiştiğini söylemişlerdir. Yarmada çekme dayanımı için ise lifli betonların lifsiz betona göre daha yüksek bir dayanıma sahip olduğu, bu artışın Gao ve Morino [62] %78, Sevil [71] %54, Kayalı vd. [72] %118 oranında olduğunu tespit etmişlerdir.
- ❖ **Eğilme Dayanımı:** Çelik lifli betonun lifsiz betona oranla daha fazla eğilme dayanımına sahip olduğu birçok araştırmacı tarafından vurgulanmıştır. Ünal vd. [73]

elik lifli betonların liffsiz betonlara göre eğilme dayanımının %21.2 daha fazla olduğunu belirlemiştir. Yazıcı vd. [74] lif hacmi ve narinliğe bağlı olarak eğilme dayanımındaki artışın %3 ile %81 arasında olduğunu ifade etmişlerdir. Wu vd. [64] ise yüksek dayanıma sahip betonlarda elik lifli betonların eğilme dayanımlarının liffsiz betonlara göre %44 daha fazla olduğunu söylemişlerdir. Aydın [75] ise yüksek dayanımlı betonlarda eğilme dayanımındaki artışın %104 kadar olduğunu belirtmiştir. Lok ve Xiao [76] eğilme dayanımını su/imento oranı, lif geometrisi, lif yüzeyi ve yükleme hızının etkilediğini belirtmişlerdir. Yüksek hacim oranlarında ve uzun elik liflerin kullanılması durumunda eğilme dayanımının %150'ye kadar artabileceği, aksi durumlarda (lif hacmi, $V_f < \%0.5$ ve narinlik < 50) elik lifin eğilme dayanımı üzerinde etkisinin olmayacağı söylenmiştir [43,77–79].

- ❖ **Yorulma Dayanımı:** elik lif kullanılan betonların yorulma dayanımı yükleme biçimine göre farklılık göstermektedir. Çekme veya eğilme yüklemeleri altında elik lifli betonlar liffsiz betonlara göre daha iyi bir yorulma dayanımı gösterirken, basınç yklemeesi altında elik lifin yorulma dayanımına etkisi yok denilecek kadar azdır. elik lifli betonun yorulma dayanımını etkileyen en önemli parametreler lif miktarı ve liflerin beton içerisindeki dağılımıdır. Ayrıca, ekme veya eğilme yüklemesine tabi tutulan betonlarda lif miktarı arttıkça yorulma dayanımı artmaktadır [43,80,81].
- ❖ **Darbe Dayanımı:** Deprem, darbe, patlama vb. dinamik yükler etkisiyle betonda oluşabilecek mikro ve makro düzeydeki çatlakları engelleyebilmek için elik lif kullanılmaktadır. elik lifli betonun liffsiz betona nazaran darbe yüklerine %100 ile %1200 arasında daha dayanıklı olduğu söylenmektedir [74,82–86].
- ❖ **Aşınma Dayanımı:** elik lifli betonların aşınma dayanımının liffsiz betonlara göre pek bir farklılık göstermediği belirtilmiştir [43,87,88].
- ❖ **Tokluk:** Beton içerisinde elik lif kullanılması, betonun enerji yutma kapasitesini yani tokluğu başka bir deyişle deformasyon yapabilme yeteneğini artırmaktadır [89,90]. Tokluğu etkileyen parametreler, lif hacmi, narinliği, boyu, tipi ve beton içerisindeki agreganın çapı olarak sayılabilir. elik lif kullanılan numunelerde beton atlasa bile numune yük taşımaya devam eder ve lifli numunenin tokluğu liffsiz numuneye göre %100 ile %1200 arasında artabilir [42]. Tokyay vd. [70] bu artışın %110 seviyesinde olduğunu söylemişlerdir.
- ❖ **Rtre:** Betonun prizini aldığı süreçte çekme gerilmelerini karşılayabilmesi için beton içerisinde elik lif kullanılmaktadır [91]. Rtre çatlaklarının engellenmesi için ACI 544.1R [43] tarafından beton içerisinde rastgele dağılmış kısa elik lifler tavsiye edilmiştir. Atış ve Karahan [92], beton içerisinde kullanılan lif miktarı arttıkça rötrenin giderek azaldığını belirlemişlerdir.

3.1.4. Çelik Liflerle İlgili Literatür Araştırması

Gao vd. [62], yüksek dayanıma sahip hafif betonlara, farklı narinlik oranlarına sahip çelik lifler eklenmesinin etkisini araştırdıkları çalışmalarında, çelik lifin betonun basınç dayanımını yaklaşık %20, çekme dayanımını yaklaşık %80 ve eğilme dayanımını ise yaklaşık %90 oranında artırdığını belirlemişlerdir.

Ding ve Kusterle [93], lifsiz ve çelik lifli olarak ürettikleri beton numunelerini 9 ve 81 saat sonra basınç testine tabi tuttıkları çalışmalarında, betona çelik lif ilave edilmesinin çok kısa bir süre zarfında dahi mukavemet üzerinde oldukça etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Luo vd. [94], çelik lifli betonların ve donatılı betonların (donatı çapı 6 mm) darbe yükleri altındaki davranışını araştırmışlardır. Donatılı betonların darbe etkisiyle parçalandığını ancak lifli betonların parçalanmadığını tespit etmişlerdir. Ayrıca narinlik oranı düşük olan çelik liflerin kullanıldığı betonlarda oluşan çatlakların genişliğinin, diğer çelik lifli betonlara göre daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Buna bağlı olarak, lif geometrisinin betonun darbe mukavemeti üzerinde etkili olduğu vurgusunu yapmışlardır.

Altun vd. [95], çelik lifli (30 kg/m^3 hacim oranında) ve lifsiz olarak ürettikleri betonarme kirişler için 4 noktalı eğilme deneyi yapmışlardır. Çelik lifli kirişlerin lifsiz kirişlere göre taşıma gücünün ve sünekliğinin daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Çivici [96], çelik lifli ve lifsiz olarak ürettiği kiriş numuneler için yaptığı deneylere bağlı olarak, çelik lif ilavesinin betonun enerji yutma kapasitesini önemli derecede artırdığını tespit etmiştir. Çelik lif kullanılan yapı elemanları için, optimum çelik lif içeriği belirlenerek üretildiğinde sünek bir davranış görüleceğini belirtmiştir.

Aktaş [97], farklı dozajlardaki silindirik hafif betonlara farklı oranlarda çelik lif ilave ederek çelik lifin betonun mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Çelik lifin betonun basınç dayanımını, birim ağırlığını ve tokluk değerlerini artırdığını, elastisite modülünü ise değiştirmedikini belirlemiştir.

Ünal vd. [98], çelik lif katkılı betonlarda farklı lif tipi ve farklı karışım oranlarının, basınç ve eğilme altındaki betonun mekanik özelliklerine etkisini araştırdıkları çalışmalarında, betona çelik lif ilave edilmesinin betondaki işlenebilirliği azalttığını, basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme yeteneğini ve eğilme dayanımını artırdığını gözlemlemişlerdir.

Salami [99], farklı geometride kancalı çelik lifler, farklı çelik lif karışım oranları ve farklı su/çimento oranları kullanarak ürettiği beton numunelerini tekrarlı yük etkisine tabi tutmuş ve numunelerin davranışlarını karşılaştırmıştır. Çelik lif katkısının, betonun basınç dayanımına pek fazla tesir etmediğini, çekme davranışını olumlu yönde etkilediğini belirtmiştir.

Nili ve Afroughsabet [100], çelik lifli betonlar için yaptıkları deneylere bağlı olarak, lifli betonların lifsiz betonlara göre darbe mukavemetinin daha iyi olduğunu ve daha sünek bir davranış sergilediğini belirtmişlerdir.

Çakıroğlu vd. [101], beton içerisinde farklı çelik lif tiplerinin (düz lif, kancalı uçlu lif, dalgalı lif, iki ucu kancalı lif, bir ucu düz diğer ucu kancalı lif) farklı karışım oranlarında kullanılmasının betonun basınç dayanımına etkisini belirlemeye çalışmışlardır. Deneyler sonucunda, beton içerisine belirli oranlarda çelik lif ilave edilmesi halinde betonun basınç dayanımının artacağını belirtmişlerdir.

Ramli ve Dawood [102], beton içerisinde farklı hacim oranlarında (%0, %0.25, %0.5, %0.75, %1.0, %1.25, %1.5, %1.75 ve %2.0) çelik lif kullanımının betonun basınç dayanımı, statik elastisite modülü ve eğilme dayanımı özelliklerine etkisini inceledikleri çalışmalarında, çelik lif kullanılan numunelerin lifsiz numunelere göre bu özelliklerinin tüm karışım oranları için daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. En yüksek değerlerin ise; basınç dayanımı için %1.25, statik elastisite modülü için %2, eğilme dayanımı için ise %1.75 hacim oranında çelik lif kullanıldığında oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Nguyen-Minh vd. [103], plakların zımbalama dayanımını artırmak amacıyla plak içerisinde farklı karışım oranlarında çelik lif kullanmışlardır. Plak içerisindeki çelik lif miktarı arttıkça zımbalama dayanımının ve enerji yutma kapasitesinin arttığını belirtmişlerdir.

Çakır [104], farklı su/çimento oranlarına sahip olan beton numunelerine, makro sentetik, naylon ve çelik lifler ilave ederek yaptığı deneylere bağlı olarak, çelik lifin betonun silindirik basınç dayanımına ve elastisite modülüne pek bir etkisinin olmadığını, yarmada çekme dayanımını, kırılma enerjisini ve eğilme dayanımını artırdığını tespit etmiştir.

Güngör [51], farklı geometri ve farklı karışım oranlarında mikro donatı, çelik lif, polipropilen lif ve karma lif (çelik lif + polipropilen lif) kullanarak ürettiği beton numuneler için yapmış olduğu çalışmada, liflerin beton basınç dayanımına ve elastisite modülüne büyük bir etkisinin olmadığını, ancak betonun eğilme dayanımında ve enerji yutma kapasitesinde büyük bir artış olduğunu belirlemiştir.

İpek [105], üç farklı narinlik oranına sahip kanca uçlu çelik lifleri beton içerisine dört 4 farklı hacimsel oranda katarak yapmış olduğu çalışmada, lif kullanımının betonun yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımlarını artırdığını, ancak basınç dayanımına pek bir etkisinin olmadığını belirlemiştir.

Sarı [41], dört farklı lif (bazalt lif, kopolimer, poliolefin lif, çelik lif) kullanarak ürettiği silindirik numuneler ve kırış numuneler için standart basınç, elastisite modülü, yarmada çekme ve üç noktalı eğilme deneyleri yapmıştır. Çelik lif kullanarak ürettiği betonların kırılma enerjisi ve eğilme dayanımlarının hacimce aynı oranda kullandığı iki farklı makro sentetik ve bazalt lifli betonlara nazaran daha yüksek değerler aldığını belirlemiştir. Çelik lif oranının artmasıyla betonun bütün mekanik özelliklerinin iyileştiğini belirtmiştir.

Kozak ve Ünal [106], bazalt agregası ile üretilen beton traverslerde çelik lifin kullanılabilirliğini araştırdıkları çalışmalarında, çelik lifin basınç dayanımına olumlu bir etki yapmadığını, ancak eğilme dayanımını artırdığını tespit etmişlerdir.

Abdussalam [107], çelik lifli ve lifsiz olarak ürettiği beton numunelerin çekme ve basınç yükleri altındaki davranışını incelediği çalışmasında, çelik lif kullanılan numunelerde lif kullanılmayan numunelere göre sünekliğin önemli ölçüde arttığını tespit etmiştir.

Açıkgenç [46], farklı granülometrilere, çimento dozajlarına, su/çimento oranlarına, çelik lif miktarlarına ve çelik lif tiplerine sahip olan beton ve kırıntı numuneleri üretmiştir. Beton numunelerin basınç dayanımlarını ve yarmada çekme dayanımlarını, kırıntı numunelerin ise eğilme dayanımlarını ve tokluk değerlerini tespit etmiştir. Çelik lif miktarının ve boyutunun artması halinde işlenebilirliğin azaldığını, basınç dayanımının pek fazla değişmediğini, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarının ve tokluğun arttığını belirlemiştir.

Arslan vd. [108], DBYBHY-2007'ye uygun olarak üç adet iki katlı tek açıklıklı betonarme çerçeveler üretmişlerdir. Çerçevelerden birini referans olarak kabul ederek içerisine çelik lif ilave etmemişlerdir. Diğer iki çerçevede ise betonun içerisinde hacimce 30 kg/m³ ve 60 kg/m³ karışım oranında kancalı uçlu çelik lif kullanmışlardır. Ürettikleri betonarme çerçeveleri tersinir yatay yüklere tabi tutmuş ve bu yükler altında yatay yük taşıma kapasitelerini ve rijitliklerini belirlemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, 30 kg/m³ çelik lif kullanılan çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi ve başlangıç rijitliği açısından deprem performansının çelik lif kullanılmayan referans çerçeve ve 60 kg/m³ çelik lif kullanılan çerçeveye göre daha iyi olduğunu belirlemişlerdir.

Hamzaçebi [109], atık araç lastiklerinden elde ettiği çelik lifleri farklı boy, geometri ve hacim karışım oranları için betonun içerisine ilave ederek, beton numuneler için üç noktalı eğilme, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri yapmıştır. Çelik liflerin boy ve hacim oranı artışının işlenebilirliği azalttığını belirlemiştir. Ayrıca basınç dayanımında belirgin bir artış olmayıp, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımının önemli düzeyde arttığını tespit etmiştir. Çelik lif kullanılan tüm numunelerin, lif kullanılmayan numunelere göre ilk çatlak yükü, tepe yükü ve tepe yüküne denk gelen deplasman değerinde artış olduğunu ve çelik lifli numunelerin daha sünek davrandığını gözlemlemiştir.

Lee vd. [110], farklı beton basınç dayanımına sahip numunelerin içerisine farklı narinlik oranına sahip kanca uçlu çelik lifleri farklı karışım oranlarında ilave ederek oluşturdukları numuneler için yapmış oldukları deneylere bağlı olarak, beton içerisindeki çelik lif oranı ve çelik life ait narinlik oranı arttıkça beton numunesinin şekil değiştirme yeteneğinin arttığını tespit etmişlerdir.

Bozkurt ve Karakurt [111], iki farklı su/çimento oranı ve üç farklı çelik lif hacim oranına sahip olarak ürettikleri altı farklı beton numunesi için yapmış oldukları deneylere bağlı olarak,

beton içerisinde çelik lif kullanımının işlenebilirliği ve ilk çatlak genişliğini azalttığını, sünekliğini, eğilme dayanımını ve basınç dayanımını artırdığını tespit etmişlerdir.

Türker vd. [112], lifsiz olarak ve farklı çelik lifler ile (düz mikro lif, iki adet tek kancalı makro lif ve bir adet çift kancalı lif) ürettikleri kirişler için eğilme deneyleri yaptıkları çalışmalarında, yük taşıma kapasitesi ve çatlakları sınırlandırma bakımından çift kancalı makro lifin, süneklik bakımından ise düz mikro lifin en etkin lif olduğunu belirlemişlerdir.

Kızılırmak [42], iki farklı uzunluk, dört farklı narinlik oranı ve üç farklı uç geometrisindeki çelik lifleri iki farklı hacim oranında kullanarak normal ve yüksek dayanımlı betonlar üretmiştir. Bu numuneler için yapmış olduğu deneylere bağlı olarak, beton içerisinde çelik lif kullanılması ile betonların eğilme dayanımının ve kırılma enerjisinin arttığını tespit etmiştir.

Korkut vd. [113], farklı boy ve karışım oranlarındaki çelik ve sentetik liflerin kendiliğinden yerleşen betonlara ilave edilmesinin, betonun taze ve sertleşmiş özelliklerine olan etkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Deneyler sonucunda, lif oranı arttıkça beton numunelerin işlenebilirliğinin azaldığını, basınç dayanımının sınırlı ölçüde arttığını, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarının ise önemli ölçüde arttığını tespit etmişlerdir.

Karagöz [114], çelik lif ve farklı agrega türleri (atık döküm kumu ve kireçtaşı) kullanarak ürettiği harçların eğilme ve basınç dayanımı değerlerini karşılaştırmıştır. Deneyler sonucunda, çelik lif ile atık döküm kumunu birlikte kullandığı numunelerde hem eğilme dayanımında hem de basınç dayanımında belirgin bir artış gözlemlenmiştir.

Araştırmacılar tarafından daha önce yapılan çalışmalar, çelik lifin betonun birçok mekanik özelliğini iyileştirdiğini göstermiştir. Bu durumun beton için böyle olduğu gibi harç için de böyle olacağı aşîkârdır. Alterman ve Page [115] harç fazında çelik lif kullanılabileceğini ve bu durumun bağ dayanımını artırarak duvara mukavemet kazandıracağını belirtmişlerdir. Tez çalışması kapsamında, harç fazında çelik lif kullanılması ve bu sayede yığma duvar elemanlarının davranışının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Yığma duvar elemanlarında harç fazında çelik lif kullanılacak oluşunun, tez konusunun özgünlüğünü artıracığı düşünülmektedir.

4. DİYAGONAL BASINÇ TESTİ

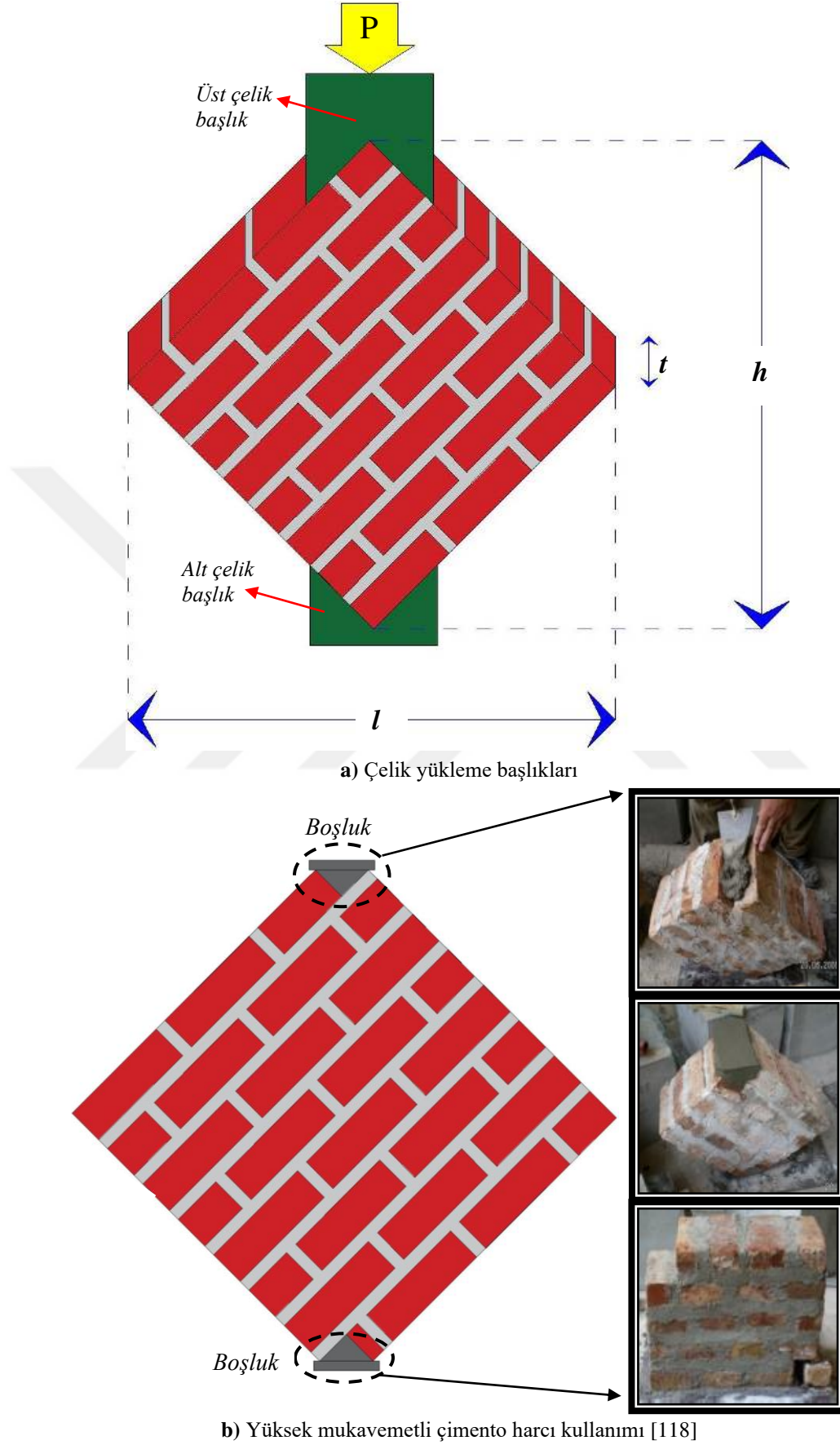
Yığma duvarların kayma dayanımları diyagonal basınç testi yardımıyla belirlenebilmektedir. Bu testin esası, yığma duvar elemanlarına diyagonal doğrultusu boyunca bir yükleme yaparak basınç ve kayma kuvvetlerinin duvar elemanına aynı anda etkimesi durumunda duvar elemanının davranışının belirlenmesine dayanmaktadır. İzotrop elastik kabul edilen ve uzunluk/yükseklik oranı 1 olan elemanlarda kayma gerilmeleri maksimum değerini almakta ve kayma gerilmeleri asal gerilmeleri oluşturmaktadır. Bu asal gerilmeler diyagonal doğrultuda olup 45° açı ile biri basınç diğeri ise çekme gerilmesi şeklindedir.

Diyagonal basınç testinin uygulama esasları ASTM E-519 [116] ve RILEM LUM-B6 [117] standartları tarafından belirlenmiştir. İlgili standartlar; 45° eğimli bir biçimde bulunan yığma duvar elemanına düzgün artan bir yük şeklinde duvar elemanı göçene kadar hidrolik pres yardımıyla duvar elemanının üst köşe noktasına yük uygulanması gerektiğini ve yükleme esnasında duvar elemanının göçene kadar taşıdığı yükün ve yapmış olduğu deformasyonların zamana bağlı olarak değişiminin kayıt altına alınması gerektiğini belirtmiştir. Bu kayıtlar sayesinde duvar elemanına ait kayma gerilmesi (τ_0), Denklem (4.1) yardımıyla hesaplanabilmektedir. Denklem (4.1) ve (4.2) için; P uygulanan yük, A_n numuneye uygulanan yüklemenin alanı, l ve h sırasıyla numunenin diyagonal doğrultudaki uzunluğu ve yüksekliği, t numunenin genişliği ve n ise yığma birimin brüt alanını ondalık cinsinden ifade eden bir katsayıdır.

$$\tau_0 = \frac{0.707P}{A_n} \quad (4.1)$$

$$A_n = \left(\frac{l + h}{2} \right) \times t \times n \quad (4.2)$$

Standartlar yığma duvarları 45° eğimli tutabilmek için çelik başlıklar yapılabileceğini veya birbirine diyagonal olarak bulunan köşe noktalarındaki tuğlaların yerine yüksek mukavemetli çimento harcı kullanılarak 45° eğimin verilebileceğini belirtmişlerdir (Şekil 4.1).



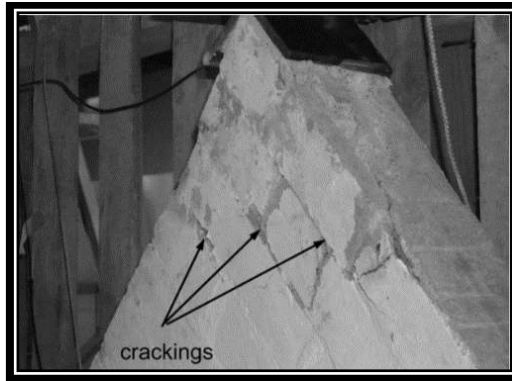
Şekil 4.1. Diyagonal basınç testleri için rijit çelik başlık ve yüksek mukavemetli çimento harcı kullanımı

ASTM E-519 [116] ve RILEM LUM-B6 [117] standartlarına göre; diyagonal basınç testi yapılacak duvar elemanı sayısı üçten az olmamalı, üretilen duvar elemanları en az yedi gün üretildiği yerden taşınmamalı, laboratuvar koşullarında (24 ± 8 °C) minimum 28 gün bekletilmeli, duvarlardaki harç fazının hidrasyon ısını düşürebilmek için bu süreçte nemlendirilmesi/sulanması ile kür işlemi yapılmalı, yükleme esnasında duvarların bir dakikadan az iki dakikadan çok olmayacak şekilde maksimum yük değerine ulaşması sağlanmalı, duvarlara ait gerilme-şekil değiştirme eğrisinin elde edilebilmesi için en az on deformasyon/şekil değiştirme değeri kayıt altına alınmalı ve bu değerlerin mümkün olduğunca maksimum yük değerine yakın olmasına özen gösterilmeli, yükleme altında duvar elemanlarının aniden göçmesi ihtimali olan durumlarda deformasyon/şekil değiştirme ölçer cihazlar duvar elemanından çıkarılmalı ve duvar elemanları yüklenmeye devam edilmeli ve maksimum yük değeri tespit edilmelidir.

4.1. Diyagonal Basınç Testi ile İlgili Literatür Araştırması

Erol [119], donatılı ve donatısız olarak ürettiği yığma duvar elemanlarına diyagonal basınç testi uygulamıştır. Duvar elemanları için yığma birimi olarak yüksek mukavemete sahip boşluklu blok tuğla, harç için ise çimento harcı ve çimento harcına özel katkı ilave ederek ürettiği harcı kullanmıştır. Harç dayanımının, duvarların taşıma kapasitesini etkileyen önemli bir parametre olduğunu tespit etmiştir. Donatısız ve donatılı olarak ürettiği duvarların taşıma kapasiteleri ile harç basınç dayanımları arasında bir ilişki kurmaya çalışarak bir α katsayısı belirlemiştir.

Gabor vd. [120], yığma birimi olarak $210\times 50\times 100$ mm boyutlarında delikli tuğla ve harç tipi olarak çimento harcı kullanarak, $430\times 100\times 400$ mm boyutlarında ürettikleri duvar elemanlarına diyagonal basınç testi yapmışlardır. Çatlakların genel olarak derzler boyunca ilerlediğini gözlemlemiş, bu nedenle yığma derz kalınlığının duvar dayanımına etkisi üzerine çalışmalar yapılması gerektiğini belirtmişlerdir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Duvar elemanlarında görülen çatlaklar [120]

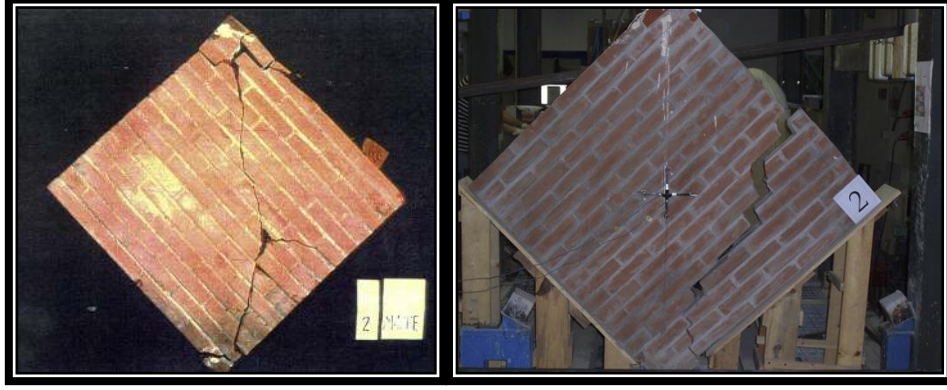
Döndüren [121], normal harç ve katkı (Sikalatex) kullanılarak oluşturduğu harç ile ürettiği kil bazlı dolu harman tuğlalı donatısız yığma duvar elemanlarının diyagonal basınç testlerini gerçekleştirmiştir. Testler sonucunda; katkı malzemesi kullanılarak harcın bağlayıcı özelliğinin artırılması sayesinde duvar elemanlarının taşıdığı maksimum yükün %25 arttığını belirlemiştir. Ancak, harç fazında katkı kullanarak ürettiği duvarların normal harç ile üretilen duvarlara göre sünekliğinin %41 ve enerji yutma kapasitesinin %25 azaldığını tespit etmiştir. Sonuç olarak, kullanmış olduğu katkının, duvarın deprem vb. yüklere karşı dayanımını olumlu yönde etkilediğini ancak duvarın gevrekliğini de artırdığını ifade etmiştir.

İlki vd. [122], tarihi bir binadan aldıkları tuğlaları kullanarak ürettikleri yığma duvar elemanlarının bir kısmını herhangi bir güçlendirmeye tabi tutmadan bir kısmını ise FRP (Fiber Reinforced Polymer) ile güçlendirerek diyagonal basınç testine tabi tutmuşlardır. Duvar elemanlarını kayma kapasitesi, deformasyon yeteneği ve göçme mekanizması bakımından birbiriyle karşılaştırmışlardır. Deneyler sonucunda güçlendirilmiş duvarların herhangi bir güçlendirme işlemi uygulanmayan duvarlara göre kayma kapasitesinin ve deformasyon yeteneğinin arttığını, ancak göçme mekanizması bakımından herhangi bir verim elde edemediklerini belirtmişlerdir.

Özsayın [1], yığma birimi olarak boşluklu tuğla, harç tipi olarak çimento harcı ve çimento-kireç harcı kullanarak 500×60×500 mm boyutlarında üretmiş olduğu yalın ve güçlendirilmiş duvar elemanlarına (21 adet) diyagonal basınç testi uygulamıştır. Duvar elemanlarını dayanım, yer değiştirme, şekil değiştirme, elastisite modülü, kayma modülü ve genel hasar durumları bakımlarından birbirleri ile karşılaştırmıştır. Kullanılan harç tipinin, oluşan hasarı önemli ölçüde etkilediğini belirtmiştir.

Yılmaz [123], Özsayın [1]'ın yapmış olduğu çalışmadaki duvar elemanlarını farklı boyutlarda üreterek benzer deneyleri uygulamıştır. Deney sonuçlarını birbiriyle karşılaştırarak boyut etkisini incelemiştir. Boyut artışına bağlı olarak duvar elemanlarının basınç ve kayma dayanımları ile deformasyon yeteneğinin azaldığını belirlemiştir.

Alecci vd. [124], yığma birimi olarak harman tuğlası, harç tipi olarak ise çimento harcı, kireç harcı ve takviyeli harç (çimento+kireç harcı) olmak üzere üç farklı harç kullanarak, 400×50×400 mm ve 1200×120×1200 mm boyutlarında duvar elemanları üretmişlerdir. Duvar elemanlarına diyagonal basınç testi uygulamışlardır. Deneyler esnasında duvar elemanlarının yükleme doğrultusunda diyagonal olarak göçtüğünü veya belirli bir bölgede diyagonal olarak ayrıldığını gözlemlemişlerdir (Şekil 4.3). Deneyler sonucunda, duvarın dayanımı ve sünekliği ile harç dayanımı arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu vurgulamışlardır.



Şekil 4.3. Duvar elemanlarında görülen göçme biçimleri [124]

Başaran vd. [125], 100×50×30 mm boyutlarında tuğla kullanarak, 400×100×400 mm boyutlarında 12 adet duvar elemanı üretmişlerdir. Duvar elemanlarını, normal, polipropilen lif ve çelik elyaf takviyesi ile sıvamış ve diyagonal basınç testine tabi tutmuşlardır. Testler sonrasında duvar elemanlarını maksimum yük, enerji yutma kapasitesi, rijitlik ve kayma dayanımı bakımından birbiriyle karşılaştırmışlardır. Takviye kullanılarak yapılan sıvanın, duvar elemanlarının süneklik kapasitesini, kayma direncini ve rijitliğini artırdığını tespit etmişlerdir.

Dündar [19], yığma birimi olarak harman tuğlası, yığma tuğla ve bimsblok, harç malzemesi olarak ise normal harç ve polipropilen lifli harç kullanarak üretmiş olduğu duvar elemanlarını diyagonal basınç testine tabi tutmuştur. Yığma tuğlalar ile üretilen duvar elemanlarının enerji yutma kapasitesi bakımından en iyi performansı gösterdiğini, ayrıca polipropilen lifin duvarların kayma dayanımını artırdığını belirlemiştir.

Çobanoğlu [126], on farklı binadan almış olduğu duvar elemanlarının diyagonal basınç testlerini gerçekleştirmiştir. Test sonuçlarına bağlı olarak diyagonal basınç kapasitesini etkileyen en önemli faktörün harcın kalitesi olduğunu belirtmiştir.

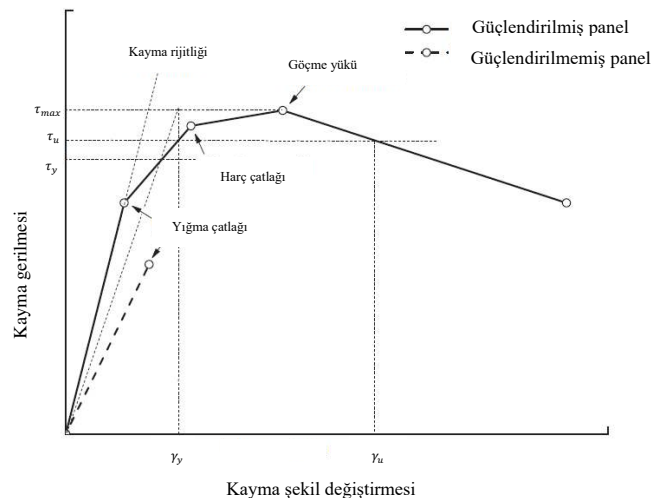
Atay [127], yığma birimi olarak yatay delikli tuğla, harç tipi olarak dört farklı harç (normal harç, PVC katkılı harç, polipropilen lif katkılı harç ve geogrid katkılı harç) kullanarak 820×820×90 mm boyutlarında ürettiği yığma duvar elemanların diyagonal basınç testi deneylerini gerçekleştirmiştir. Deneyler sonucunda, katkı kullanılan harçlar ile üretilen yığma duvar elemanların normal harç ile üretilen yığma duvar elemanlara göre kırılma yükünün, kayma dayanımının, kayma şekil değiştirmesinin ve enerji yutma kapasitesinin arttığını belirlemiştir.

Shermi ve Dubey [128], yığma duvar elemanlarına kaynaklı tel örgüsünün etkisini belirlemeye çalışmışlardır. İki farklı harç karışım oranı kullanarak ürettikleri yığma duvarlara üç farklı oranda kaynaklı tel örgüsü takviye ederek toplamda sekiz adet duvar elemanı üretmişlerdir. Kaynaklı tel örgüsünün yığma duvar elemanının kayma mukavemetine ve sünekliğine olumlu katkısının olduğunu tespit etmişlerdir.

Mezrea vd. [129], yığma duvarların davranışına sıva harcının, tekstil malzemesinin (bazalt ve karbon) ve ankraj uygulamasının etkisini belirleyebilmek için ürettikleri duvar elemanlarını diyagonal basınç testine tabi tutmuşlardır. Deneyler sonucunda, sıva harcı tipinin duvar elemanlarının mekanik özelliklerini ciddi ölçüde etkilediğini, tekstil malzemesinin ve ankraj uygulamasının duvar elemanlarının kayma mukavemetini ve enerji yutma kapasitesini artırdığını ifade etmişlerdir.

Büyükkaragöz ve Koprman [130], farklı derz kalınlıklarına (10 ve 25 mm) sahip olacak şekilde ürettikleri 900×200×900 mm boyutlarındaki yığma duvar elemanları, farklı karışım oranlarında çelik lif içeren sıva harcı ile dıştan güçlendirmiş, daha sonra bu duvar elemanlarını diyagonal basınç testine maruz bırakmışlardır. Deneyler sonucunda; derz kalınlığı arttıkça kayma mukavemetinin arttığını, çelik lifli sıva harcı ile güçlendirilmiş tüm duvar elemanları için süneklik kapasitesinin, deplasman yapabilme yeteneğinin ve enerji yutma kapasitesinin arttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca harç kalınlığının artırılmasının ve yüksek miktarda çelik lif kullanılmasının aderansı azalttığını belirtmişlerdir.

Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar, diyagonal basınç testinin yığma duvar elemanlarının davranışını belirlemede sıklıkla tercih edilen bir yöntem olduğunu göstermiştir. Yapılan çalışmaların genel itibarıyla, yığma duvarların güçlendirilerek sünekliğinin, enerji yutma kapasitesinin, yük taşıma kapasitesinin, deplasman yapabilme kabiliyetinin iyileştirilmesi yönünde olduğu görülmektedir. Yapılacak güçlendirme ile yığma duvarların ideal kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirmesi grafiğinin Şekil 4.4'teki gibi olması beklenmektedir. Tez çalışması kapsamında da, deneysel olarak oluşturulan yığma duvar elemanları için harç içerisinde çelik lif kullanılarak duvar elemanlarının mekanik parametrelerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.



Şekil 4.4. Duvar elemanlarının idealleştirilmiş kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirmesi grafiği [131]

5. PLASTİSİTE VE KIRILMA VARSAYIMLARI

Doğrusal analizlerde malzemelerin akma gerilmesi değerleri aşılmadıkça, gerilme-deformasyon ilişkisi doğrusal olarak kabul edilir ve hesaplamalar doğrusal elastisite teorisine göre yapılır. Ancak yüklemeler karşısında malzemelerin bazı bölgelerinin veya tümünün plastikleşmesi durumunda, doğrusal elastisite teorisine göre yapılacak analizler gerçeği tam olarak yansıtmayacaktır. Üç eksenli gerilme hali için malzemelerin kırılmaması veya plastik hale geçmemesi için Denklem (5.1)'i sağlamaları gerekmektedir. Denklem (5.1) için σ_M malzemenin kırılacağı veya plastik hale geçeceği sınır gerilme değerini ifade etmektedir. Malzemelerin homojen ve izotrop olması halinde f fonksiyonu, asal gerilmelerin $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ simetrik bir fonksiyonu olup yalnızca gerilmelerin şiddetine bağlıdır ve asal gerilmelerin doğrultularının herhangi bir rolü yoktur.

$$\sigma_M > f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \quad (5.1)$$

Plastik hesap ise malzemelerin yüklemeler karşısında davranışını daha gerçekçi bir şekilde hesaplamaya imkân vermektedir [132,133]. Ancak burada da, malzemelerin hangi yük sınırında plastik hale geçeceği veya hangi gerilme değeri için kırılacağı önemli bir soru işaretidir. Malzemeler için tehlikeli sınır kavramı, gevrek malzemeler için kopma, kırılma ve ezilme, plastik ve çok uzayabilen malzemeler için ise akma anlamına gelmektedir [134].

Malzemelerin davranışını tam olarak belirleyebilmek için çeşitli kırılma kriterleri kullanılsa da, malzemenin iç bünyesi ile ilgili karmaşık yapısını ortaya koyabilmek ve kesin bir karşılaştırma kriterinden bahsetmek neredeyse imkânsızdır. Ayrıca, iç yapısı bakımından birbirinden çok büyük farklılıklar gösteren tüm yapı malzemeleri için tek bir kriter kullanmak oldukça kaba bir yaklaşımdır. Bu nedenle bir takım deneyler, varsayımlar ve tecrübeler yardımıyla, malzemenin davranışını en iyi şekilde yansıtacak malzeme kriteri seçilmelidir. Malzemenin kırılma veya plastik hale geçişi için çeşitli hipotezler ortaya konulmuştur. Bu hipotezler gerilme varsayımları, şekil değiştirme varsayımları ve enerji varsayımları olmak üzere üç grupta toplanmaktadır.

Gerilme varsayımları tarihsel gelişimi bakımından incelenecek olunursa, en büyük normal gerilme, en büyük kayma gerilmesi, Coulomb kayma gerilmesi ve Mohr genel kayma gerilmesi varsayımları akla gelecek ilk varsayımlardır. Bunlardan *en büyük normal gerilme varsayımı*, tarih bakımından en eski varsayım olup, Galilei, Leibniz, Navier ve Lamé tarafından ileri sürülmüştür. Bu varsayıma göre tehlikeli duruma geçiş, yalnızca en büyük normal gerilme değeri olan σ_1 'e bağlı olup, σ_2 ve σ_3 'ün tehlikeli duruma herhangi bir etkisi yoktur (Denklem 5.2). Bu varsayım, hidrostatik etkiyi göz ardı ettiği için malzemelerin hidrostatik etkiler altında tehlikeli duruma girmesi imkânsızdır. Bu nedenle çok doğru bir varsayım değildir. Daha sonra 1860'lı yıllarda Henri

Tresca tarafından, plastik hale geçmede ve kırılmadaki en önemli faktörün *en büyük kayma gerilmesi* olduğu fikri ortaya atılmıştır [134]. Bu fikir aynı zamanda Tresca varsayımı olarak da anılmaktadır. Tresca varsayımı, en büyük normal gerilme (σ_1) ve en küçük normal gerilmeye (σ_3) önem vermekte olup, ortanca gerilme (σ_2) dikkate alınmamaktadır (Denklemler 5.3). Bu varsayım, çekme ve basınç dayanımları birbirine eşit olan malzemeler için uygun olup, bu dayanımları birbirinden farklı olan malzemeler için uygun olmamaktadır.

$$\sigma_1 = \sigma_M \quad (5.2)$$

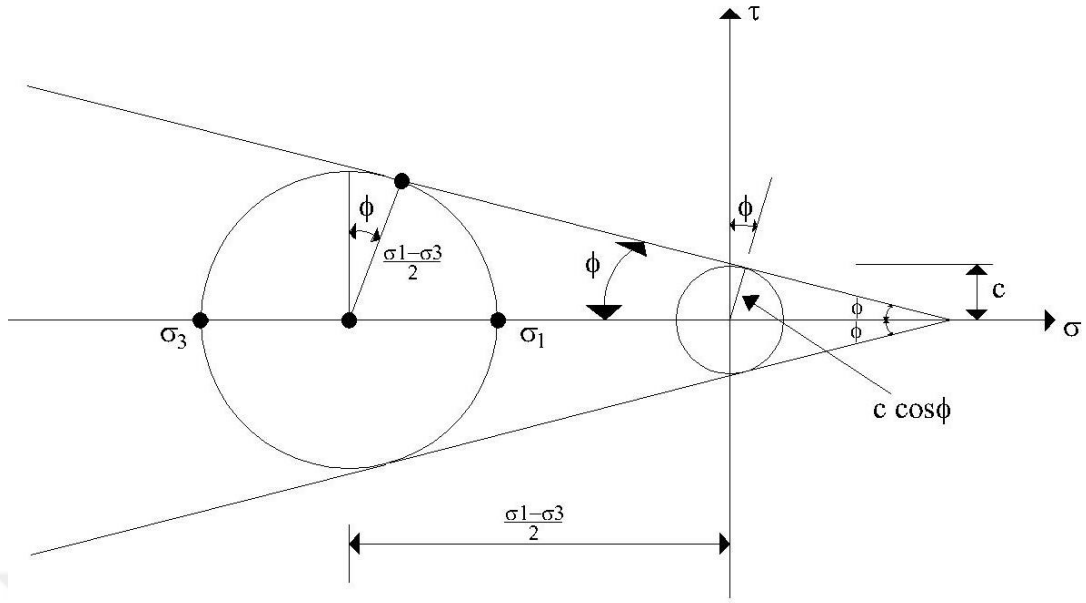
$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_M \quad (5.3)$$

Her bir farklı malzeme farklı bir elasto-plastik davranış sergilediği için yukarıda bahsedilen kriterler araştırmacılar tarafından zamanla geliştirilmiş veya yerlerine yeni kriterler önerilmiştir. Rankine, von Mises, Tresca, Mohr–Coulomb, Drucker Prager, Bresler-Pister, Willam–Warnke, Lade, Chen–Chen, Li–Harmon, Ottosen en çok kullanılan kriterlerdendir. Örneğin; Tresca ve von Mises kriterleri genel olarak çekme ve basınç dayanımları birbirine eşit olan malzemeler için ve özellikle metal malzemeler için sıklıkla kullanılırken, çekme ve basınç dayanımları birbirinden farklı olan ve içsel bir sürtünmeye sahip olan malzemeler için Mohr-Coulomb ve Drucker Prager kriterleri sıklıkla tercih edilmektedir. Bu nedenle, yığma yapıların davranışını uygun bir şekilde temsil eden kriterlerden Mohr-Coulomb ve Drucker Prager kriterlerinin üzerinde durulacaktır.

5.1. Mohr-Coulomb Kriteri

Mohr-Coulomb kriteri, cismin mukavemetinin sona ermesinde kayma gerilmesinin yanı sıra içsel sürtünme nedeniyle kayma gerilmesinin etkidiği yüzeyde normal gerilmenin de etkisinin olacağını kabul etmektedir (Denklemler 5.4). Bu denklemde τ , σ , c , ve ϕ sırasıyla kayma gerilmesini, normal gerilmeyi, kohezyonu ve içsel sürtünme açısını ifade etmektedir. Mohr-Coulomb kriteri, Mohr grafik gösterilim sisteminde sınır dairelerin zarfı birbirini kesen iki doğru şeklindedir (Şekil 5.1) [135].

$$\tau = c - \sigma \tan \phi \quad (5.4)$$



Şekil 5.1. Mohr-Coulomb kriterine ait kırılma zarfı [135]

Şekil (5.1)'den görüleceği gibi, zarf eğrilerinin çekme tarafları kapalı olup basınç tarafları malzemelerin sınırsız hidrostatik basıncı tehlikesizce taşıyabilecekleri kabulü gereği açık vaziyettir. Denklem (5.5) asal gerilmeler ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) cinsinden,

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos \phi = c - \left[\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \phi \right] \tan \phi \quad (5.5)$$

olarak yeniden yazılabilir (Şekil 5.1). Bu denklem yeniden düzenlenirse,

$$\sigma_1 \frac{1 + \sin \phi}{2c \cos \phi} - \sigma_3 \frac{1 - \sin \phi}{2c \cos \phi} = 1 \quad (5.6)$$

eşitliği elde edilir [135]. Eğer malzemenin basınç (f_c) ve çekme (f_t) dayanımları sırasıyla,

$$f_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (5.7)$$

$$f_t = \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad (5.8)$$

biçiminde tanımlanırsa Denklem (5.6) aşağıdaki hali alır.

$$\frac{\sigma_1}{f_t} - \frac{\sigma_3}{f_c} = 1 \quad (5.9)$$

Ayrıca, gerilme tansörünün birinci invariantı (I_1) ve deviatorik gerilme tansörünün ikinci invariantı (J_2) kullanılarak Denklem (5.6),

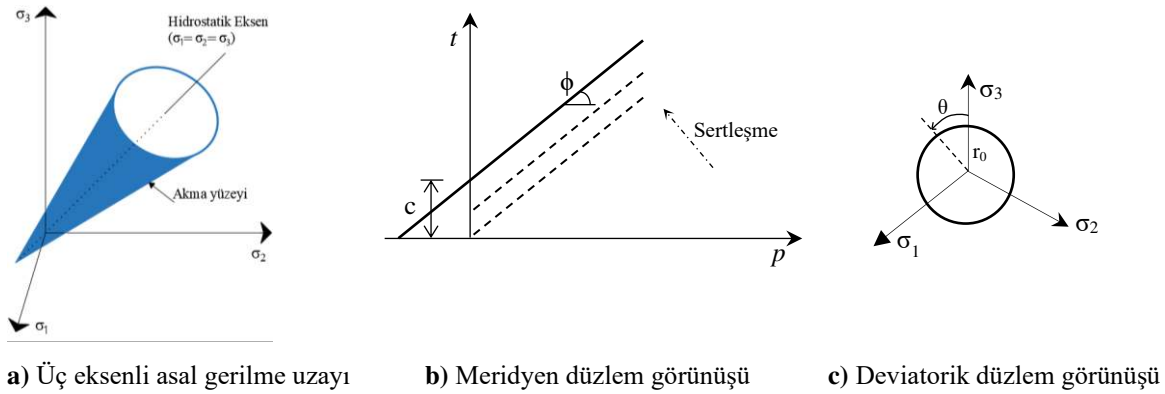
$$f(I_1, J_2, \theta) = \frac{1}{3} I_1 \sin \phi + \sqrt{J_2} \sin \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) + \frac{\sqrt{J_2}}{\sqrt{3}} \cos \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) \sin \phi - c \cos \phi = 0 \quad (5.10)$$

şeklinde de ifade edilebilir [135].

Mohr-Coulomb kriterinin üç boyutlu gerilme uzayında akma yüzeyi altıgen bir piramit şeklindedir. Mohr-Coulomb kriterinde akma yüzeyinin belirlenebilmesi için altıgen kenarlardan birinin bilinmesi gerekmektedir. Eğer herhangi bir nokta için asal doğrultular sabit değilse veya bu doğrultular bilinmiyorsa altıgen kırılma yüzeyini kullanmak sayısal çözümlemede karışıklıklara sebep olmaktadır.

5.2. Drucker Prager Kriteri

Toprak, taş, kaya ve beton gibi içsel sürtünmeye sahip olan malzemelerin göçme davranışını ve elastik ötesi şekil değiştirmelerini belirleyebilmek için Drucker ve Prager (1952) tarafından önerilmiştir (Şekil 5.2) [136].



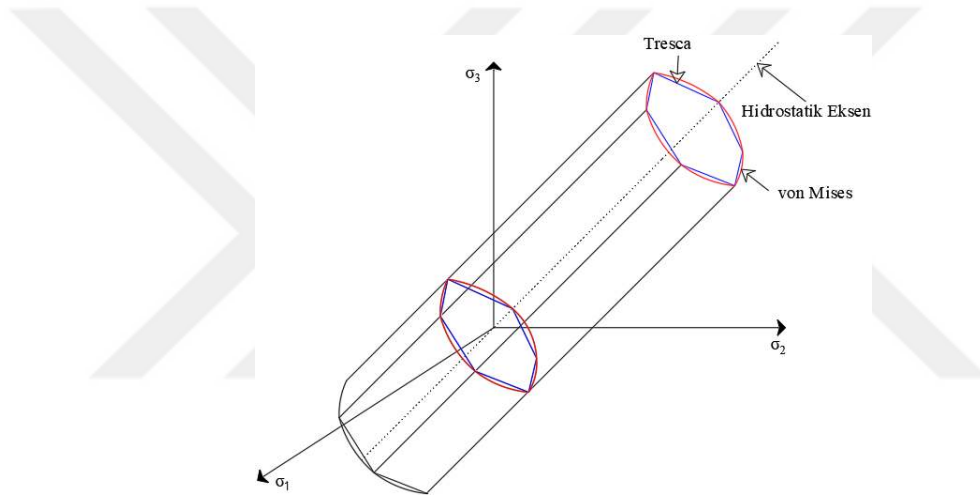
Şekil 5.2. Drucker Prager kriteri için akma yüzeyi

Drucker Prager (DP) kriteri, von Mises kriterine benzemekte olup, ilaveten hidrostatik gerilme etkisini de içermektedir [136–138]. Öncelikle von Mises kriterinden bahsedilecek olunursa, bu kriter Tresca kriterinden farklı olarak, yalnızca en büyük ve en küçük asal gerilmeleri değil, bütün asal gerilmeleri göz önüne alan bir kriterdir (Denklem 5.11). Söz konusu bu iki kriterin

üç eksenli asal gerilme uzayındaki akma yüzeyleri Şekil 5.3'te verilmiştir. Tresca akma yüzeyi iki ucu açık altıgen prizma iken von Mises kriteri iki ucu açık silindir şeklindedir. Von Mises kriteri çekme ve basınç dayanımları birbirine eşit olan malzemelerin davranışını temsil ettiği ve hidrostatik basınç etkisini dikkate almadığı için yığılma yapılar gibi çekme ve basınç dayanımları birbirinden farklı olan malzemelerin davranışını temsil etmekte eksik kalmaktadır. DP kriterinde bu eksiklik, von Mises kriterine ait akma yüzeyi denkleminde hidrostatik basınç etkisi (αI_1) ilave edilerek giderilmektedir (Denklem 5.12) [136].

$$f(J_2) = \sqrt{J_2} - k \quad (5.11)$$

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (5.12)$$



Şekil 5.3. von Mises ve Tresca kriterlerinin üç eksenli asal gerilme uzayındaki akma yüzeyleri

(5.11) ve (5.12) denklemlerinde geçen α ve k büyüklükleri malzeme sabitleridir. Malzemenin çekme dayanımı (f_t) ve basınç dayanımı (f_c) ile α ve k sabitleri arasında Denklem (5.13) ve (5.14)'te verildiği gibi bir ilişki mevcuttur.

$$f_t = \frac{k}{\frac{1}{\sqrt{3}} + \alpha} \quad (5.13)$$

$$f_c = \frac{k}{\frac{1}{\sqrt{3}} - \alpha} \quad (5.14)$$

DP kriteri, yığılma yapılar gibi çekme ve basınç dayanımları birbirinden farklı olan malzemelerin doğrusal olmayan davranışını uygun bir şekilde temsil edebilmektedir [139]. Bu

kriter sahip olduğu özellikler nedeniyle Mohr-Coulomb kriterinin genelleştirilmiş halidir [140]. Mohr-Coulomb kriteri için akma yüzeyi altıgen bir piramit şeklinde iken, DP kriteri bir koni biçimindedir. Bu koni, basınç meridyeni $\theta = 60^\circ$ ve çekme meridyeni $\theta = 0^\circ$ için Mohr-Coulomb akma yüzeyini köşe noktalarından geçerek sırasıyla dıştan ve içten çevrelemektedir. Bu koninin büyüklüğü α ve k sabitlerine bağlı olarak değişmektedir. Bu sabitler, basınç meridyeni $\theta = 60^\circ$ için sırasıyla Denklem (5.15-16), çekme meridyeni $\theta = 0^\circ$ için ise sırasıyla Denklem (5.17-18) ile hesaplanmaktadır [141].

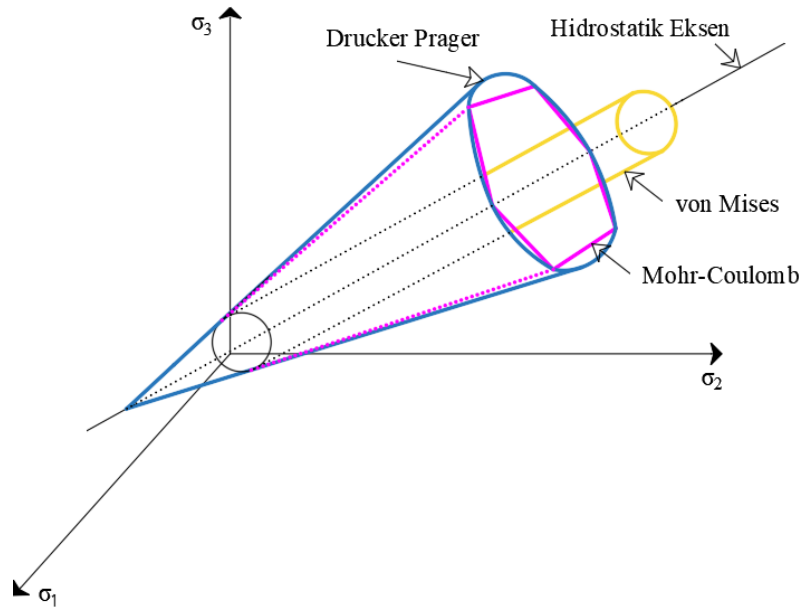
$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (5.15)$$

$$k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (5.16)$$

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (5.17)$$

$$k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (5.18)$$

DP kriterinde akma yüzeyi Mohr-Coulomb kriterine göre daha pürüzsüzdür ve bu akma yüzeyini elde etmek daha kolaydır. Bu nedenle DP kriteri Mohr-Coulomb kriterine göre daha kullanışlıdır. DP, Mohr-Coulomb ve von Mises kriterlerinin akma yüzeylerinin asal gerilme uzayında görünümü Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. DP, Mohr-Coulomb ve von Mises kriterlerinin akma yüzeylerinin asal gerilme uzayında görünümü

DP kriteri, kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve dilatasyon açısı (ψ) parametrelerini kullanmaktadır. Bu parametrelere ait değerler her bir malzeme için değişkenlik göstermektedir.

5.2.1. Drucker Prager Kriteri ile İlgili Literatür Araştırması

Van der Pluijm [142], kayma testleri uyguladığı 11 farklı yığma duvar elemanı için kohezyon değerini 0.14-4.76 MPa aralığında, içsel sürtünme açısını 31.38°-49.48° aralığında, dilatasyon açısını ise 36.87°-44.42° aralığında belirlemiştir.

Lourenço vd. [143], delikli harman tuğlası kullanarak oluşturdıkları yığma duvar elemanları için yapmış oldukları deneyler sonucunda kohezyon değerini 1.39 MPa ve içsel sürtünme açısını ise 45.85° olarak belirlemiştir.

Betti ve Vignoli [144], İtalya’da bulunan Romanesque kilisesinin sismik hasar görebilirliğini araştırdıkları çalışmalarında, duvarların doğrusal olmayan davranışını Drucker Prager kriteri ile dikkate almışlardır. Drucker Prager kriterine ait malzeme parametrelerini kohezyon 0.09 MPa, içsel sürtünme açısı 38° ve dilatasyon açısı 15° olarak seçmişlerdir.

Zucchini ve Lourenço [145], yığma duvarların düzlem içi yüklemeler altında sonlu eleman model analizlerinde malzemenin doğrusal olmayan davranışı için Drucker Prager kırılma kriterini kullanmışlardır. Yığma elemanlar için kohezyon değerini 0.224 MPa ve 0.35 MPa, içsel sürtünme açısını 36.9° ve dilatasyon açısını 0° olarak kabul etmişlerdir.

Roca ve Araiza [146], yığma duvarlar için yapmış oldukları kayma testlerinin sonucunda kohezyon değerini 0.39 MPa ve içsel sürtünme açısını 44.7° olarak belirlemiştir.

Betti vd. [147], tarihi bir kalenin sonlu eleman analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Malzemenin doğrusal olmayan davranışı için Drucker Prager kriterini kullanmış ve bu kriteri ait parametreleri kohezyon için 0.1 MPa, içsel sürtünme açısı için 38° ve dilatasyon açısı için 15° olarak seçmişlerdir.

Betti ve Vignoli [148], tarihi bir yığma kilisenin statik davranışını ve sismik hasar görebilirliğini belirlemeye çalışmışlardır. Kiliseye ait doğrusal olmayan davranış için Drucker Prager kriterini kullanmışlardır. Drucker Prager kriterine ait parametreleri kohezyon için düşey taşıyıcılarda 0.5 MPa, diğer elemanlarda 0.1 MPa, içsel sürtünme açısını ve dilatasyon açısını ise tüm elemanlarda sırasıyla 38° ve 15° olarak seçmişlerdir.

Betti ve Galano [149], tarihi Vicarious sarayının sismik davranışını sonlu eleman model analizlerine bağlı olarak belirlemeye çalışmışlardır. Sarayda bulunan yığma duvarların doğrusal olmayan davranışı için Drucker Prager kriterini kullanmışlardır. Drucker Prager kriterine ait malzeme parametrelerini kohezyon, içsel sürtünme açısı ve dilatasyon açısı için sırasıyla 0.09 MPa, 38° ve 15° olarak seçmişlerdir.

Angelillo vd. [150], kohezyon değerinin yığma birimi ve harç için ayrı ayrı belirlenmesi işleminin imkansız olduğunu, bu nedenle Eurocode 6 tarafından kohezyon değeri için tavsiye edilen

0.1-0.4 MPa aralığının kullanılabilceğini söylemişlerdir. İçsel sürtünme açısının farklı yığma birim-harç kombinasyonları için genel olarak 34.99°-50.19° aralığında değiştiğini ve bu değerin analizlerde 36.87° olarak alınabileceğini tavsiye etmişlerdir. Dilatasyon açısının ise kayma davranışı sırasında yığma birimlerin birbiri üzerine hareket etmesiyle meydana geldiğini ve düşey gerilme arttıkça bu açının sıfıra düşeceğini söylemişlerdir.

Lumantarna vd. [151], 1881-1946 yılları arasında Yeni Zelenda’da tasarlanmış olan 6 farklı donatısız yığma bina örneği için yerinde birtakım deneyler gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları deneyler sonucunda, kohezyon değerini 0.149-0.43 MPa aralığında ve içsel sürtünme açısını ise 39.66°-42.52° aralığında belirlemişlerdir.

Rahman ve Ueda [152], dolu harman tuğlaları ve 4 farklı karışım oranına sahip olan harç ile oluşturdukları duvar numuneleri için kayma dayanımı deneyleri yapmışlardır. Deneyler sonucunda kohezyon değerini 0.12-0.23 MPa aralığında, içsel sürtünme açısını ise 56.3°-69.4° aralığında belirlemişlerdir.

Betti vd. [153], donatısız yığma duvarların sismik değerlendirmesi için İtalyan yönetmeliği (NTC-2008) tarafından belirtilen ve duvar yatay kesitinde kayma gerilmelerinin dağılımıyla ilgili bir katsayı olan b şekil katsayısının analizlerdeki sonuçlara etkisini araştırmışlardır. Oluşturdukları yığma duvar sonlu eleman modelleri için yapmış oldukları analizlerde Drucker Prager kriterine ait malzeme parametrelerini kohezyon için 0.24 MPa, içsel sürtünme açısı ve dilatasyon açısı için 55° olarak seçmişlerdir.

Costa vd. [154], Portekiz’de bulunan taş kemer bir köprünün ölü yükler ve artımsal yükler (araç yükünü temsil edecek şekilde) etkisi altındaki davranışını sonlu eleman model analizleri ile belirlemeye çalışmışlardır. Malzemenin doğrusal olmayan davranışı için Drucker Prager kriterini kullanmışlardır. Bu kritere ait malzeme parametrelerini kohezyon, içsel sürtünme açısı ve dilatasyon açısı için sırasıyla 0.0131 MPa, 41.2° ve 6° olarak kabul etmişlerdir.

Fayala vd. [155], yığma kirişlerin eğilme davranışına cam elyaf takviyeli polimerlerin etkisini araştırdıkları çalışmalarında, ürettikleri kiriş numunelerin sonlu eleman model analizleri esnasında, kirişlerin doğrusal olmayan davranışı için Drucker Prager kriterini kullanmışlardır. Bu kritere ait parametreleri yığma birimlerinde kohezyon için 5.4 MPa ve içsel sürtünme açısı için 45°, harçlar da ise kohezyon için 2.8 MPa ve içsel sürtünme açısı için 58° olarak seçmişlerdir.

Pineda [156], mevcut bir hasarlı yığma kulenin güçlendirilmesinin kulenin performansını nasıl etkileyeceğini, yapmış olduğu sonlu eleman model analizleri ile belirlemeye çalışmıştır. Kulein sonlu eleman modelini makro modelleme tekniğiyle oluşturarak, statik ve dinamik yükler altında analizlerini gerçekleştirmiştir. Malzemenin doğrusal olmayan davranışını Drucker Prager kriteri ile dikkate almıştır. Bu kritere ait parametreleri kohezyon için 0.15 MPa, içsel sürtünme açısı için 54° ve dilatasyon açısı için 10° olarak kabul etmiştir.

Fourie [157], beton ve çimentonun çevreye olan olumsuz etkilerini en aza indirebilmek amacıyla çevre dostu alternatif yığma birimler üretmeyi amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda geleneksel beton yığma birimlere alternatif oluşturacak 4 farklı yığma birimi tasarlamıştır. Bu yığma birimler için yapmış olduğu deneylerin sonucunda, kohezyon değerini 0.05-0.172 MPa aralığında, içsel sürtünme açısını 29.25°-49.48° aralığında ve dilatasyon açısını 29.2°-49.5° aralığında belirlemiştir.

Lizárraga ve Pérez-Gavilán [158], iki farklı harç karışımı için yaptıkları deneyler neticesinde, harçlar için kohezyon değerini 0.46 MPa ve 0.55 MPa, içsel sürtünme açısını 50.19° ve 46.4°, dilatasyon açısını 44.13° ve 50.19° olarak belirlemişlerdir.

Sandoval ve Arnau [159], yığma birimi olarak delikli tuğla kullanarak oluşturdukları yığma duvar elemanları için yapmış oldukları kayma testleri esnasında, kohezyon değerini 1.052 MPa ve içsel sürtünme açısını 37.5° olarak belirlemişlerdir.

Rahgozar ve Hosseini [160], tarihi yapılarda sıklıkla kullanılan harç tipleri ile benzer karışım oranlarına sahip olacak şekilde oluşturdukları birbirinden farklı 9 harç tipi ve bu harçları kullanarak oluşturdukları yığma tuğla duvar elemanları için birtakım mekanik deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda, harç için kohezyon değerini 0.09-0.534 MPa aralığında ve içsel sürtünme açısını 25.22°-75.88° aralığında, yığma duvar elemanları için ise kohezyon değerini 0.054-0.212 MPa aralığında, içsel sürtünme açısını 28.24°-57.47° aralığında ve dilatasyon açısını 5.7°-35.8° aralığında belirlemişlerdir.

Peng vd. [161], farklı uzunluk, farklı boşluk oranı ve farklı harç dayanımına sahip olacak şekilde 6 farklı yığma duvarı laboratuvar ortamında oluşturarak düzlem içi yüklemelere tabi tutmuşlardır. Daha sonra aynı yükler altında bu duvarların sonlu eleman çözümlerini elde etmişlerdir. Yüklemeler esnasında duvarların doğrusal olmayan davranışını Drucker Prager kriteri ile dikkate almışlardır. Bu kriteri ait malzeme parametrelerini kohezyon için bazı duvarlarda 0.393 MPa, bazı duvarlarda ise 0.468 MPa, içsel sürtünme açısı ve dilatasyon açısını ise birbirine eşit kabul ederek bazı duvarlarda 40°, bazı duvarlarda ise 45° olarak seçmişlerdir.

Andreotti vd. [162], yığma tuğla duvar numuneleri için yapmış oldukları deneysel çalışmalarda dilatasyon açısını 0.9°-16.1° aralığında, içsel sürtünme açısını ise bazı numunelerde 28.2° bazı numunelerde 32.0° olarak belirlemişlerdir.

Resketi ve Toufigh [163], harcın sünekliğini ve duvarların kayma mukavemetini artırmak, harcın maliyetini azaltmak maksadıyla doğal puzolan (taftan) ve iki tür pirinç kabuğu kullanarak 9 farklı harç karışımı oluşturmuşlardır. Bu harçlar ve dolu harman tuğlaları yardımıyla ürettikleri duvar elemanları için gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda kohezyon değerini 0.282-0.439 MPa aralığında ve içsel sürtünme açısını 32.51°-40.31° aralığında elde etmişlerdir.

Khan ve Nanda [164], geotekstil malzeme ile güçlendirdikleri yığma duvar elemanlar için yapmış oldukları mikro model sonlu eleman analizlerinde, duvar elemanının doğrusal olmayan

davranışı için Drucker Prager kriterini kullanmışlardır. Bu kritere ait malzeme parametrelerini tuğla ve harç için aynı olacak şekilde kohezyon için 0.9 MPa, içsel sürtünme açısı için 43° ve dilatasyon açısı için 0° olarak kabul etmişlerdir.

Leal-Graciano vd. [165], orta kısmında boşluk olacak şekilde ürettikleri birbirinden farklı 4 yığma dolgu duvarı çevrimsel yanal yüklemeye maruz bırakmışlardır. Yığma dolgu duvarların deneysel analizlerinden sonra bu duvarları sonlu eleman yöntemi ile modelleyerek benzer analizleri yapmışlardır. Bu analizler esnasında duvarların doğrusal olmayan davranışı için Drucker Prager kriterini kullanmışlardır. Bu kritere ait malzeme parametrelerini kohezyon için 0.2 MPa, içsel sürtünme açısı için 30.24° ve dilatasyon açısı için 5° olarak kabul etmişlerdir.

Thakur vd. [166], literatürde mevcut olan deneysel bir çalışmadaki yığma duvar numunelerini mikro modelleme yaklaşımıyla modellemiş ve deneysel çalışma ile benzer yüklemelere maruz bırakmışlardır. Yığma duvarların doğrusal olmayan davranışını, Drucker Prager kriterini kullanarak dikkate almışlardır. Bu kriter için kohezyon değerini 1.4ft, içsel sürtünme açısını 41° ve dilatasyon açısını 11° olarak kabul etmişlerdir. Drucker Prager kriterinin, kil tuğlalar ile üretilen yığma duvarların davranışını temsil etmede oldukça uygun bir kriter olduğunu belirtmişlerdir.

Literatürdeki çalışmalar, Drucker Prager kriterinin yığma yapıların doğrusal olmayan davranışını belirlemede sıklıkla kullanıldığını ve bu yapıların davranışını temsil etmede uygun sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu nedenle, tez çalışması kapsamında yapılacak olan sonlu eleman model analizlerinde, yığma duvar elemanlarının doğrusal olmayan davranışı için Drucker Prager kriteri kullanılmıştır.

6. MATERYAL VE METOT

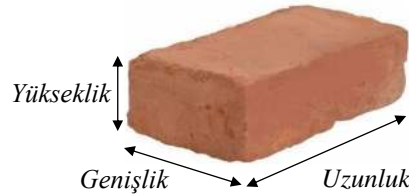
Bu bölüm, deneysel çalışmalar ve sonlu eleman model çalışmaları olmak üzere iki alt başlıktan oluşmaktadır. Deneysel çalışmalar kısmında, kullanılan malzemeler ve bu malzemeler ile oluşturulan yığma duvar elemanları tanıtılmıştır. Daha sonra bu malzemeler ve yığma duvar elemanları için gerçekleştirilen deneylere ait metotlar ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Sonlu eleman modeli çalışmaları kısmında ise, yığma duvar elemanlarına ait mikro ve makro modellerin oluşturulması işlemi detaylı bir şekilde verilmiştir.

6.1. Deneysel Çalışmalar

Yığma duvarlar genellikle, yığma birimlerin yatay/düşey derz harçları yardımıyla bir araya getirilerek oluşturulan kompozit malzemelerdir. Bu malzemelerin davranışları, yığma birimlerin ve harcın fiziksel ve mekanik özelliklerine, duvar örgü tipine, derz kalınlığına, yapım işçiliğine bağlıdır. Bu nedenle, duvara ait yığma birim ve harç bileşenlerinin temel özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Tez kapsamında, deneylerde kullanılan tuğla ve harç birimlerinin ayrı ayrı birtakım fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra bu tuğla ve harçlar kullanılarak oluşturulan duvar elemanları için diyagonal basınç testleri yapılmıştır. Tez çalışması kapsamında yapılan tüm deneyler Fırat Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

6.1.1. Tuğla

Deneysel çalışmalarda yığma birimi olarak 190×90×60 mm boyutlarında üretilmiş olan kil bazlı dolu harman tuğlası piyasadan temin edilerek kullanılmıştır (Şekil 6.1). Harman tuğlası tam dikdörtgenler prizması şeklinde olup herhangi bir delik veya boşluğa sahip değildir.

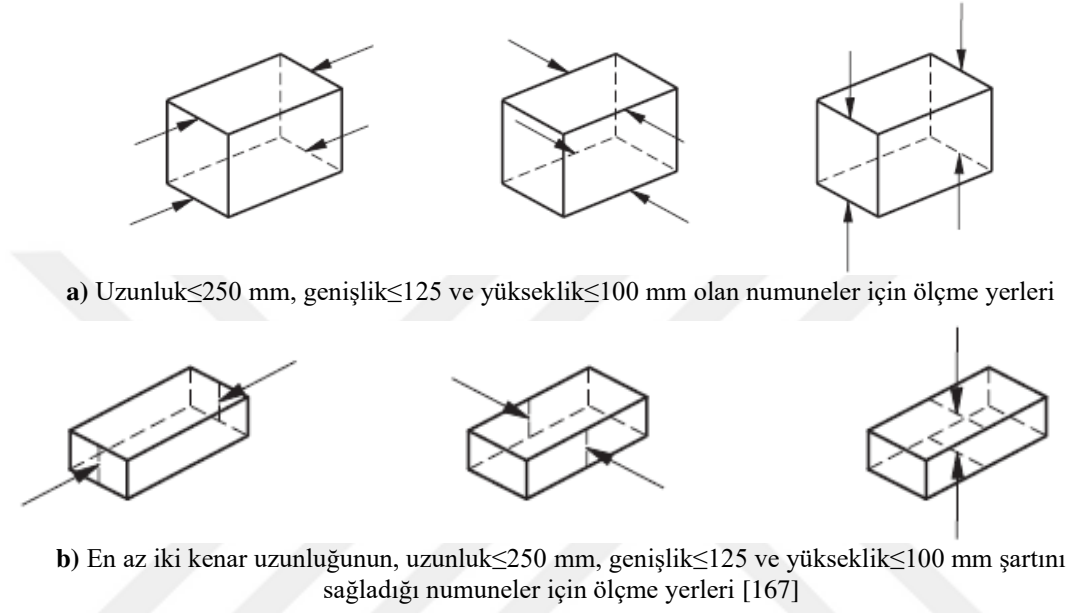


Şekil 6.1. Deneylerde kullanılan kil bazlı dolu harman tuğlası

Boyutların Tayini

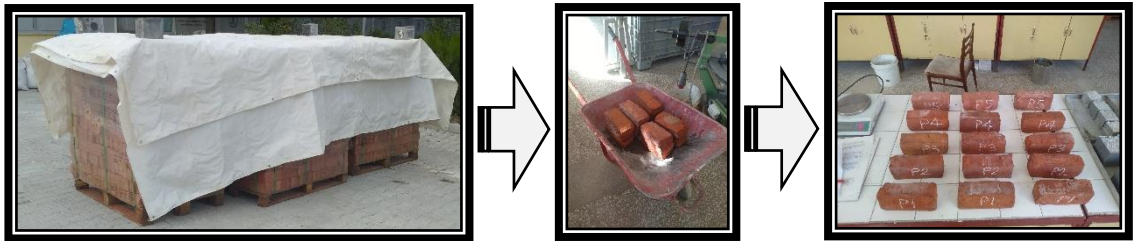
Yığma birimlerin boyutlarının tayini; uçtan uca boyutlarının, dış ve iç et kalınlıkları ile bu kalınlıkların toplamının ve boşluk derinliklerinin, döşeme yüzlerinin düzlemsel paralelliğinin belirlenmesini kapsamaktadır. TS EN 772-16 [167] standardına göre; boyut tayini yapılacaktır.

numune sayısı minimum 6 olmalı, et kalınlığı ve düzlemsel paralelliğinin belirlenmesi için minimum 3 olmalıdır. Düzgün yüzeyli tuğlalar için (lamba ve zıvana, harç cebi, sıva kılavuzu vb. bulunmayan) numunenin uzunluk, genişlik ve yükseklik değerlerinin sırasıyla 250, 125 ve 100 mm değerinden küçük veya eşit olması halinde Şekil 6.2(a), en az iki kenar uzunluğunun bu şartları sağlaması halinde Şekil 6.2(b)'de gösterildiği gibi ölçüm yerleri ayarlanmalıdır.



Şekil 6.2. Ölçme yerleri [167]

Deneylerde kullanılacak olan harman tuğlalarının içerisinde, TS EN 771-1 [10] standardının belirttiği şekilde 15 adet numune alınarak (Şekil 6.3), TS EN 772-16 [167] standardının tavsiye ettiği şekilde boyutları belirlenmiştir. Ölçümler hassas kumpas yardımıyla yapılmıştır.



Şekil 6.3. TS EN 771-1 standardının belirttiği şekilde 15 adet numunenin alınması

Net Hacim ve Boşluk Yüzdesinin Tayini

Net hacim ve boşluk yüzdesinin tayini için su içerisinde tartma yöntemi kullanılmıştır. Deneyler, TS EN 772-3 [168] standardının belirttiği şekilde gerçekleştirilmiştir. İlgili standarda

göre, numune en az 1 saat süreyle, numuneyi bir bütün olarak su içerisine batırmaya yeterli kapasitedeki bir su haznesinin içerisine batırılır ve 30 dakika aralıklarla su içerisinde yapılan tartımların birbirinden %0.2'den fazla fark göstermemesi şartıyla, numune sudan çıkarılarak ikinci tartım görünür kütle (M_{wu}) olarak kaydedilir. Numune yüzeylerinde bulunan serbest su nemli bezle alınarak vakit kaybedilmeden kütle belirlenir (M_{au}). Numunenin net hacmi (V_{nu}), numunenin havada tartımıyla bulunan kütesinden, su içerisindeki tartımıyla bulunan kütesi çıkarılarak ($M_{au} - M_{wu}$), su yoğunluğuna (ρ_w) bölünmesiyle bulunur (Denklem 6.1).

$$V_{nu} = \frac{M_{au} - M_{wu}}{\rho_w} \quad (6.1)$$

Numunenin brüt hacmi (V_{gu}) ise TS EN 772-16 [167] standardına göre ölçülen uzunluk (l_u), genişlik (w_u) ve yüksekliğinin (h_u) çarpılmasıyla bulunur (Denklem 6.2).

$$V_{gu} = l_u \times w_u \times h_u \quad (6.2)$$

Boşlukların hacmi (V_{vu}), brüt hacimden net hacmin çıkarılmasıyla hesaplanır (Denklem 6.3).

$$V_{vu} = V_{gu} - V_{nu} \quad (6.3)$$

Boşlukların yüzdesi ise,

$$\frac{V_{vu}}{V_{gu}} \times 100 \quad (6.4)$$

ile elde edilir (Denklem 6.4) [168].

Su Emme Miktarının Tayini

Harman tuğlasının su emme miktarı (W_m), TS EN 771-1 [10] standardının belirttiği şekilde tayin edilmiştir (Şekil 6.4). Standardın esası; suya doymuş tuğlanın ağırlığının (m_w), etüvde tamamen kurutulmuş tuğlanın ağırlığından (m_d) çıkarılması ve elde edilen değer etüvde tamamen kurutulmuş tuğlanın ağırlığına (m_d) bölünmesi olarak açıklanabilir (Denklem 6.5).

$$W_m = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100 (\%) \quad (6.5)$$



Şekil 6.4. Numunelerin 105 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde kurutulması

TS EN 771-1 standardı [10], deneye tabi tutulacak numune sayısının minimum 10, doymuş ağırlığın belirlenmesi için numunenin en az 24 saat oda sıcaklığındaki bir yerde su dolu bir kap içerisinde ve küçük takozlar üzerine yerleştirilerek tüm yüzeylerine su temas edecek şekilde, etüv kurusu ağırlığın belirlenmesi için ise numunelerin 105 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde en az 24 saat bekletildikten sonra art arda yapılan iki tartım arasındaki farkın toplam numune kütlesinin %0.2'sinden az olması gerektiğini belirtmiştir. Numunelerin doymuş ağırlıkları ölçülürken, sudan çıkarılan numunenin yüzeyindeki serbest su nemli bez veya süngerle kurulanmalıdır. Numunelerin etüv kurusu ağırlıkları ölçülürken ise, numune tartılmadan önce oda sıcaklığına soğuyuncaya kadar bekletilmelidir.

Su Emme Miktarının Tayini

Harman tuğlasının net ve brüt kuru yoğunlukları, TS EN 772-13 [169] standardının belirttiği şekilde tayin edilmiştir. Yığma birimlerin net kuru yoğunlukları ($\rho_{n,u}$) Denklem (6.6), brüt kuru yoğunlukları ($\rho_{g,u}$) Denklem (6.7) ile hesaplanır.

$$\rho_{n,u} = \frac{m_{dry,u}}{V_{n,u}} \times 10^3 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (6.6)$$

$$\rho_{g,u} = \frac{m_{dry,u}}{V_{g,u}} \times 10^3 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (6.7)$$

Denklem (6.6) ve (6.7) için $m_{dry,u}$ değişmez kütleye kadar kurutulan etüv kurusu ağırlığını, $V_{n,u}$ numunenin net hacmini ve $V_{g,u}$ ise numunenin brüt hacmini ifade etmektedir [169].

Basınç Dayanımının Tayini

Harman tuğlasının basınç dayanımı TS EN 772-1 standardının belirttiği şekilde belirlenmiştir [170]. Basınç dayanımı testi yapılacak numunelerin yük uygulanacak yüzeylerinde

herhangi bir yöndeki 100 mm uzunluk için düzlükten sapma maksimum 0.1 mm olacak şekilde düzgün ise ve üst yüzey tabana paralel ve her 100 mm’de aralarındaki açıklık 1 mm’den fazla değil ise direkt basınç testi gerçekleştirilebilir. Bu şartların sağlanamadığı numuneler için aşındırma veya başlıklama yoluyla numunenin hazırlanması gerekmektedir. Kullanılan harman tuğlası bu şartları sağlamadığı için başlıklama yapılarak yüzeylerin yükleme için düzgünlüğü sağlanmıştır.

Başlıklama için, numunenin yükleme yapılacak yüzeyine ve cihaza oturacak karşı yüzeyine çimento harcı yapılmıştır. Harç için en büyük dane büyüklüğü 1 mm olacak şekilde elekten geçirilmiş kum kullanılmıştır. Başlıklama yapılan harcın basınç dayanımının yığma birimin basınç dayanımından az olmaması şartı göz önünde bulundurularak harç için uygun bir karışım oranı seçilmiştir. Hazırlanan harcın yığma birimine uygulanmasından önce yığma birimleri suya doymun hale getirilmiş ve yüzeyindeki atık malzeme vs. temizlenmiştir.

Başlıklama yapılırken, cam bir yüzey yağlanmış ve yağlanan zemin üzerine hazırlanan harç serilmiş ve suya doymun hale getirilmiş tuğlalar bu harcın üzerine bırakılmış ve su terazisi yardımıyla tuğlaların düzgünlüğünün kontrolü sağlanmıştır. Yapılan başlıklamanın kalınlığının en az 3 mm olmasına, uzunluğunun tuğla uzunluğundan en az 25 mm daha fazla olmasına, genişliğinin tuğla genişliğinden en az 10 mm fazla olmasına ve tuğla yan yüzeylerine taşan fazla harçlar yüzeyden temizlenmesine dikkat edilmiştir. Harcın prizini alması için beklenilmiş ve bu süre zarfında hidrasyon ısısı sebebiyle harcın içerisindeki suyu kaybederek çatlamaması için başlıklama yapılan tuğlalar nemli bir bez ile sarılmış ve bu bezin sürekli nemli kalması sağlanmıştır. Harç prizini aldıktan sonra aynı işlem diğer yüzey için tekrarlanmıştır (Şekil 6.5).



Şekil 6.5. Tuğlaların yükleme yönüne dik yüzeylerinin çimento harcı ile başlıklanması

TS EN 772-1 standardı [170], basınç testi yapılacak numunelerin deneyden önce şartlandırılması gerektiğini vurgulamıştır. Bu şartlandırmaları ise, hava kurusuna şartlandırma, etüv kurusuna şartlandırma, %6 nem oranına şartlandırma ve suya batırma yoluyla şartlandırma olarak tarif etmiştir. Harman tuğlaları şartlandırma işleminden sonra, yığma birimin tahmin edilen basınç dayanımı için standart tarafından belirtilen yükleme hızında yüklemeye tabi tutulmuştur (Tablo 6.1). Deneye ait bazı fotoğraflar Şekil 6.6’da verilmiştir.

Tablo 6.1. TS EN 772-1 standardı tarafından tavsiye edilen yükleme hızı değerleri [170]

Tahmin Edilen Basınç Dayanımı (N/mm ²)	Yükleme Hızı (N/mm ²)/s
< 10	0.05
11-20	0.15
21-40	0.3
41-80	0.6
> 80	1.0



Şekil 6.6. Tuğlaların basınç dayanımlarının belirlenmesi süreci

Elastisite Modülünün Tayini

Harman tuğlalarının elastisite modüllerinin belirlenmesi için, 15 farklı tuğla numunesine basınç dayanımı deneylerinde yapılan uygulama gibi başlıklama yapılmıştır. Yapılan başlıkların priz alma süreleri tamamlandıktan sonra tuğlalar düşey basınç yüküne maruz bırakılmıştır. Yükleme esnasında tuğlalarda oluşacak şekil değiştirmeleri belirleyebilmek için özel kelepçeler yapılmış ve bu kelepçeler tuğlalara sabitlenerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Numunelere ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi çizilmiş ve bu eğri için doğrusallığın olduğu başlangıç bölgesinin eğimi esas alınarak her bir tuğla numunesine ait elastisite modülü belirlenmiştir (Şekil 6.7). Ayrıca tüm tuğla numunelerinin elastisite modülleri kullanılarak tuğla için ortalama elastisite modülü hesaplanmıştır.



Şekil 6.7. Tuğlaların elastisite modüllerinin belirlenmesi süreci

Deneyleri gerçekleştirilen harman tuğlaları için elde edilen fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2. Harman tuğlası için deneysel olarak belirlenen fiziksel ve mekanik özellikler

Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)	Basınç Dayanımı (MPa)	Boşluk Yüzdesi (%)	Su emme miktarı (%)	Net Kuru Yoğunluk (kg/m ³)	Brüt Kuru Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (MPa)
193.9	90.1	58.7	24.67	4.94	19.0	1690.2	1606.94	4198

6.1.2. Kum

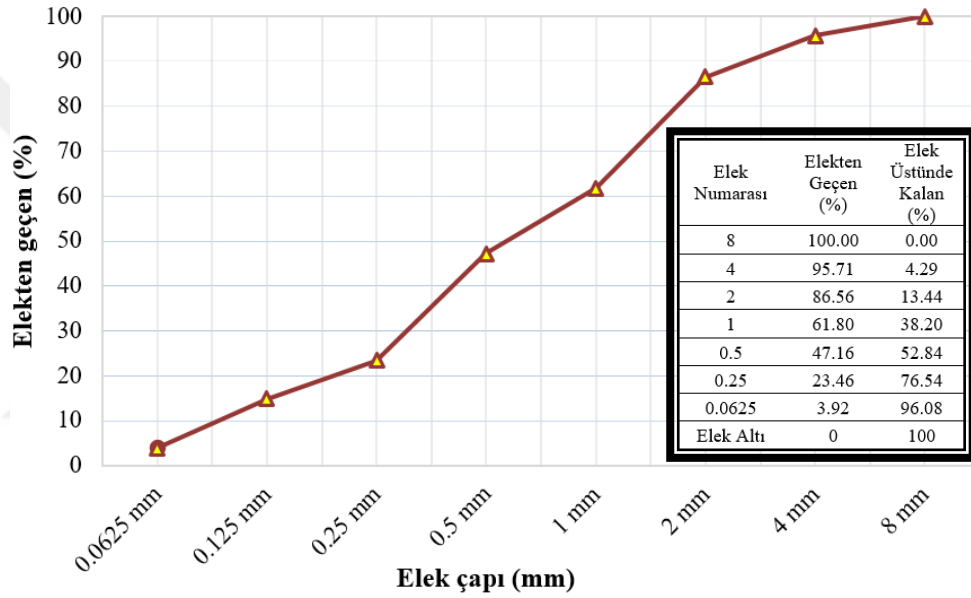
Harcı meydana getiren yapı malzemelerinden biri kumdur. Kullanılan kumun özellikleri, oluşturulacak harcın özellikleri için de önemlidir. Deneylerde, Birlik Beton (Elazığ) kum ocağından temin edilen kalker esaslı kırmataş kum kullanılmıştır (Şekil 6.8). Kullanılan kumun granülometri, özgül ağırlık ve su emme deneyleri yapılmıştır.



Şekil 6.8. Deneylerde kullanılan kalker esaslı kırmataş kum

Kullanılacak olan kumun harç oluşturma işlemine uygun olup olmadığının tespit edilmesi için kum için elek analizi yapılarak, kuma ait granülometri eğrisinin elde edilmesi gerekmektedir. Elek analizi yapıldıktan sonra kum içerisindeki ince ve iri agreganın oranı iyi tespit edilmelidir. Çünkü iri agreganın fazla olduğu kumun bağlayıcılığı az olur ve harç içerisinde büyük boşluklar meydana gelir. İnce agreganın fazla olduğu kumların ise harç yaparken daha fazla su ve çimentoya ihtiyaç duyması sebebiyle hem ekonomik olmayacak hem de dayanım düşecektir.

Deneylerde kullanılacak olan kum için elek analizi, TS EN 933-1 [171] standardının belirttiği şekilde yapılmıştır. Kum yığını temsil edecek şekilde kum numunesi alınmış ve bu numuneler iyice karıştırıldıktan sonra deneye yeterli hale gelinceye kadar dörtleme/çeyreklemeye metodu ile küçültme işlemine tabi tutulmuştur. Küçültme işlemi yapıldıktan sonra 4 kg numune etüvde değişmez ağırlığa gelene kadar kurutulmuştur. Değişmez ağırlığa ulaşan kum, en büyük elek en üstte olacak şekilde büyükten küçüğe aşağıya doğru set halinde dizilmiş bir şekildeki elek setine konularak 10 dakika süresince elenmiş ve eleme işleminden sonra her elek üzerinde kalan malzeme tartılmıştır. Elek analizi sonuçları ve bu sonuçlara bağlı olarak çizilen granülometri eğrisi Şekil 6.9’da verilmiştir.



Şekil 6.9. Deneylerde kullanılan kuma ait granülometri eğrisi ve elek analizi sonuçları

Kullanılan kuma ait elek analizi sonuçları incelendiğinde;

- ❖ 4 numaralı elekten daha büyük numaralı elek üzerinde malzeme kalmadığı için TS 2717 [15] standardına göre kullanılan kum “Orta Kum” sınıfına girmektedir.
- ❖ 4 numaralı elek ve daha küçük numaralı eleklerin üzerinde kalan malzemelerin yüzde (%) değerlerinin toplamının 100’e bölünmesiyle kum incelik modülü 2.81 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, TS 2717’e göre uygun bir incelik modülüdür [15]. Çünkü ilgili standart (TS 2717), orta kumların incelik modülü değerinin 1.8-2.9 aralığında olması gerektiğini belirtmiştir.
- ❖ TS 2717 standardına göre kırma kumlar için elek analizi sonucunda 0.063 numaralı elekten geçen malzeme miktarının ağırlıkça %6’dan fazla olmaması gerekmektedir [15]. Kullanılan kum için bu değer %3.92 olarak bulunmuştur.

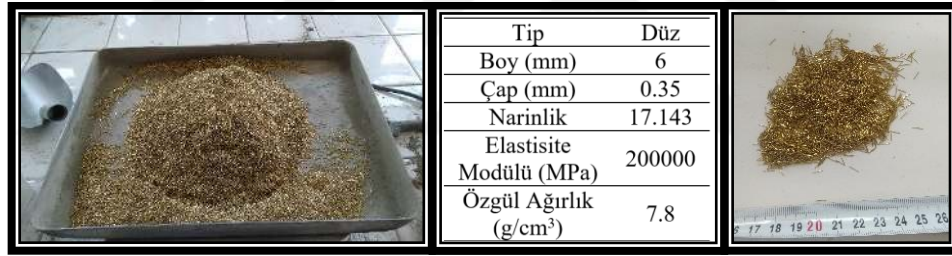
Deneylerde kullanılan kumun özgül ağırlığının ve su emme oranının belirlenebilmesi için TS 706 EN 12620 [172] standardından yararlanılmıştır. Kum için özgül ağırlık 2.61 g/cm^3 ve su emme miktarı %0.324 olarak elde edilmiştir.

6.1.3. Çimento

Deneylerde CEM I-42.5/R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun taze olarak tek bir fabrikadan alınarak bozulmadan kullanılmasına ve laboratuvarında uygun koşullarda istiflenmesine özen gösterilmiştir.

6.1.4. Çelik Lif

Çalışmada kullanılan çelik lifler normal dayanımlı (düşük karbon oranına sahip) ve düz geometriye sahip olarak TS EN 14889-1 [173] standardına göre Kemerli Metal San. ve Tic. A.Ş. (Kayseri) firması tarafından üretilmiş olan mikro çelik liflerdir. Kullanılan çelik lifler ve özellikleri Şekil 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6.10. Deneylerde kullanılan mikro çelik lifler ve özellikleri

6.1.5. Harç

Duvar elemanlarının yapımında kullanılacak olan harç, çimento, kum ve suyun uygun oranlarda karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Harç içerisindeki çimento:kum oranı için, literatürde sıklıkla kullanılan 1:4 oranı seçilmiştir. Bu çimento:kum oranı için optimum su miktarı, harcın derz üzerinde akıp gitmeyecek ve kolaylıkla işlenebilecek şekilde plastik kıvamda olmasına özen gösterilerek ayarlanmıştır. Buna bağlı olarak harç karışımı için su/çimento oranı 0.62 olarak belirlenmiştir. İlgili harç deneyler süresinde NH olarak isimlendirilmiştir.

Lifsiz harç karışımlarının içerisine ağırlıkça %0.1 ile %6 aralığında çelik lifler ilave edilerek çelik lifin harcın basınç ve eğilme çekme dayanımına etkisi incelenmiş ve içerisinde ağırlıkça %1'in altında çelik lif kullanılan harçlar için çelik lifin etkisinin pek fazla olmadığı, %3'ün üzerinde çelik lif kullanılan harçlar için mekanik parametrelerin pek fazla değişmediği ve harcın karıştırılmasının oldukça zorlaştığı gözlenmiştir. Buna bağlı olarak, duvar elemanlarının yapımında

kullanılacak harcın içerisindeki lif oranı ağırlıkça %1, %2 ve %3 olarak seçilmiş ve bu karışım oranlarına sahip olacak harçlar sırasıyla L1, L2 ve L3 olarak isimlendirilmiştir. Bu karışım oranları için 40×40×160 mm boyutlarında harç numuneleri oluşturulmuş (Şekil 6.11), daha sonra bu numuneler için basınç (Şekil 6.12(a)) ve eğilme çekme (Şekil 6.12(b)) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylere ait sonuçlar Tablo 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.11. 40×40×160 mm boyutlarında oluşturulan harç numuneleri



Şekil 6.12. Harç numuneleri için a) basınç ve b) eğilme çekme deneyleri

Tablo 6.3. 40×40×160 mm harç numuneleri için basınç ve eğilme çekme dayanımı değerleri

Numune Adı	Basınç Dayanımı (28 gün) (MPa)	Eğilme Çekme Dayanımı (28 gün) (MPa)
NH	39.1	7.0
	40.0	
	41.3	
	36.1	6.9
	37.2	
	38.0	
	<i>Ortalama: 38.6 (1.9*)</i>	<i>Ortalama: 6.97 (0.06*)</i>
L1	36.7	7.2
	35.8	
	40.9	
	41.8	7.3
	38.6	
	39.3	
	<i>Ortalama: 38.9 (2.3*)</i>	<i>Ortalama: 7.27 (0.06*)</i>
L2	46.8	7.8
	45.4	
	43.5	
	45.3	7.8
	41.0	
	41.2	
	<i>Ortalama: 43.9 (2.4*)</i>	<i>Ortalama: 7.8 (0.0*)</i>
L3	45.4	8.4
	44.3	
	40.9	
	46.9	7.7
	45.7	
	46.0	
	<i>Ortalama: 44.9 (2.1*)</i>	<i>Ortalama: 7.8 (0.6*)</i>

* Standart sapma değeri.

Çelik lifin beton içerisinde kullanılmasının basınç dayanımına ve eğilme çekme dayanımına olan olumlu etkisi Bölüm 3'te açıklanmış olup, literatürde bunu doğrulayan pek çok çalışma mevcuttur. Lee [63] yapmış olduğu çalışmada, beton içerisinde çelik lif kullanılması durumunda betonun basınç dayanımının lifsiz betona göre %16 arttığını ifade etmiştir. Wu vd. [64] düz, kancalı uçlu ve dalgalı çelik lifler kullanarak yaptıkları çalışmada basınç dayanımındaki artışın %50'ye kadar çıktığını belirtmişlerdir. Bentur ve Mindess [49] ise, çelik lifin betonun çekme dayanımını %133'e kadar artırdığını ifade etmişlerdir. Yukarıda verilen Tablo 6.3'teki değerler incelendiğinde; harç içerisinde çelik lif kullanılması halinde basınç dayanımının maksimum %16.2, eğilme çekme dayanımının maksimum %12.8 oranında arttığı ve bu sonuçların literatür ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Harç içerisinde belirli oranlarda mikro çelik lif kullanılması durumunda harcın mekanik özelliklerinin iyileşeceği bu çalışmayla da bir kez daha ortaya çıkmıştır.

Harç numunelerine ait elastisite modüllerinin elde edilmesi için her bir karışım oranına ait 6 adet olmak üzere toplamda 24 adet harç numunesi, harman tuğlası ile aynı olacak şekilde 190×90×60 mm boyutlarında üretilmiştir. Harç numunelerinin prizlerini almaları için 28 gün

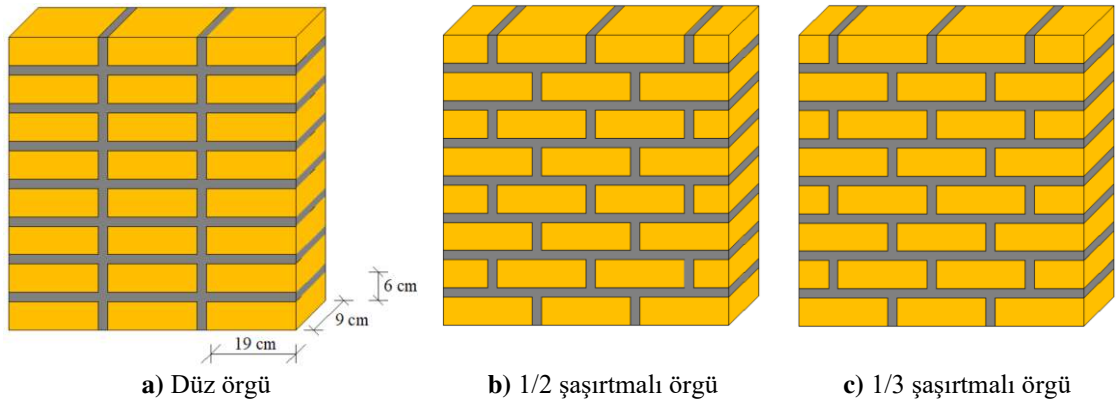
beklendikten sonra ilgili numuneler düşey basınç yüküne maruz bırakılmıştır. Yükleme esnasında harç numunelerinde oluşacak şekil değiştirmeleri belirleyebilmek için özel kelepçeler yaptırılarak, bu kelepçeler harç numunelerine sabitlenmiş ve ölçümler gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.13). Numunelere ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri için doğrusallığın olduğu başlangıç bölgesinin eğimi esas alınarak her bir harç numunesine ait elastisite modülü belirlenmiştir. Ayrıca tüm harç numunelerinin elastisite modülleri kullanılarak harç için ortalama elastisite modülü hesaplanmıştır (Şekil 6.13). NH, L1, L2 ve L3 harçları için elde edilen ortalama elastisite modülleri sırasıyla, 3866 MPa, 4091 MPa, 4125 MPa ve 4437 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.13. Harç numunelerinin elastisite modüllerinin belirlenmesi

6.1.6. Yığma Duvar Elemanları

Dolu harman tuğlası ve çelik lifli/lifsiz harçlar kullanılarak yığma duvar elemanları üretilmiştir. Bu elemanlar için derz kalınlıkları 1 cm, 2 cm ve 3 cm, örgü tipleri düz örgü, 1/2 şaşırtmalı örgü ve 1/3 şaşırtmalı örgü, harç tipleri ise lifsiz (NH) ve çelik lifli (L1, L2 ve L3) harç şeklindedir. Duvar örüm işlemlerinde kullanılan örgü tipleri Şekil 6.14'te verilmiştir. Duvar elemanları üretilirken özel kalıplar kullanılmış, bu sayede duvarların düzgün bir biçimde örülmesi ve istenilen derz kalınlığında olması sağlanmıştır (Şekil 6.15). Buna bağlı olarak 36 farklı tipte duvar elemanı ve her bir duvar elemanı için 3 tekrar duvar elemanı olmak üzere toplamda 108 adet duvar elemanı oluşturulmuştur (Şekil 6.16). Tüm harçlar için çimento:kum:su oranı olarak 1:4:0.62 oranı kullanılmıştır. Duvar elemanlarına ait isim kodlaması Tablo 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.14. Duvar örüm işlemlerinde kullanılan örgü tipleri

Tablo 6.4. Yığma duvar elemanlarına ait isim kodlamaları

Duvar Adı	Derz Kalınlığı (cm)	Lif Oranı (%)	Örgü Tipi	Duvar Adı	Derz Kalınlığı (cm)	Lif Oranı (%)	Örgü Tipi
D1NHO1	1	0	Düz	D1L2O1	1	2	Düz
D1NHO2	1	0	1/2 Şaşırtmalı	D1L2O2	1	2	1/2 Şaşırtmalı
D1NHO3	1	0	1/3 Şaşırtmalı	D1L2O3	1	2	1/3 Şaşırtmalı
D2NHO1	2	0	Düz	D2L2O1	2	2	Düz
D2NHO2	2	0	1/2 Şaşırtmalı	D2L2O2	2	2	1/2 Şaşırtmalı
D2NHO3	2	0	1/3 Şaşırtmalı	D2L2O3	2	2	1/3 Şaşırtmalı
D3NHO1	3	0	Düz	D3L2O1	3	2	Düz
D3NHO2	3	0	1/2 Şaşırtmalı	D3L2O2	3	2	1/2 Şaşırtmalı
D3NHO3	3	0	1/3 Şaşırtmalı	D3L2O3	3	2	1/3 Şaşırtmalı
D1LIO1	1	1	Düz	D1L3O1	1	3	Düz
D1LIO2	1	1	1/2 Şaşırtmalı	D1L3O2	1	3	1/2 Şaşırtmalı
D1LIO3	1	1	1/3 Şaşırtmalı	D1L3O3	1	3	1/3 Şaşırtmalı
D2LIO1	2	1	Düz	D2L3O1	2	3	Düz
D2LIO2	2	1	1/2 Şaşırtmalı	D2L3O2	2	3	1/2 Şaşırtmalı
D2LIO3	2	1	1/3 Şaşırtmalı	D2L3O3	2	3	1/3 Şaşırtmalı
D3LIO1	3	1	Düz	D3L3O1	3	3	Düz
D3LIO2	3	1	1/2 Şaşırtmalı	D3L3O2	3	3	1/2 Şaşırtmalı
D3LIO3	3	1	1/3 Şaşırtmalı	D3L3O3	3	3	1/3 Şaşırtmalı

Tüm duvar elemanları oluşturulduğu günden testin yapılacağı güne kadar yerinden oynatılmayarak laboratuvar koşullarında bekletilmiş ve belirli saat aralıklarında sulanarak kür işleminin yapılmasına özen gösterilmiştir (Şekil 6.17).



Şekil 6.15. Yığma duvar elemanlarının hazırlanması



Şekil 6.16. Yığma duvar elemanları



Şekil 6.17. Yığma duvar elemanlarına kür işleminin yapılması

Duvar elemanlarının kayma dayanımlarının belirlenebilmesi için duvar elemanlarına diyagonal basınç testi uygulanmıştır. Testler, ASTM E-519 [116] ve RILEM LUM-B6 [117] standartları tarafından belirtilen şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında duvar elemanlarını 45° eğimli bir biçimde tutabilmek için çelik başlıklar üretilmiştir. Çelik başlıkların yükleme esnasında eğilme vs. gibi davranışlar göstermemesi için yeterli rijitliğe sahip olması sağlanmıştır (Şekil 6.18).



Şekil 6.18. Diyagonal basınç testlerinde kullanılan çelik başlıklar

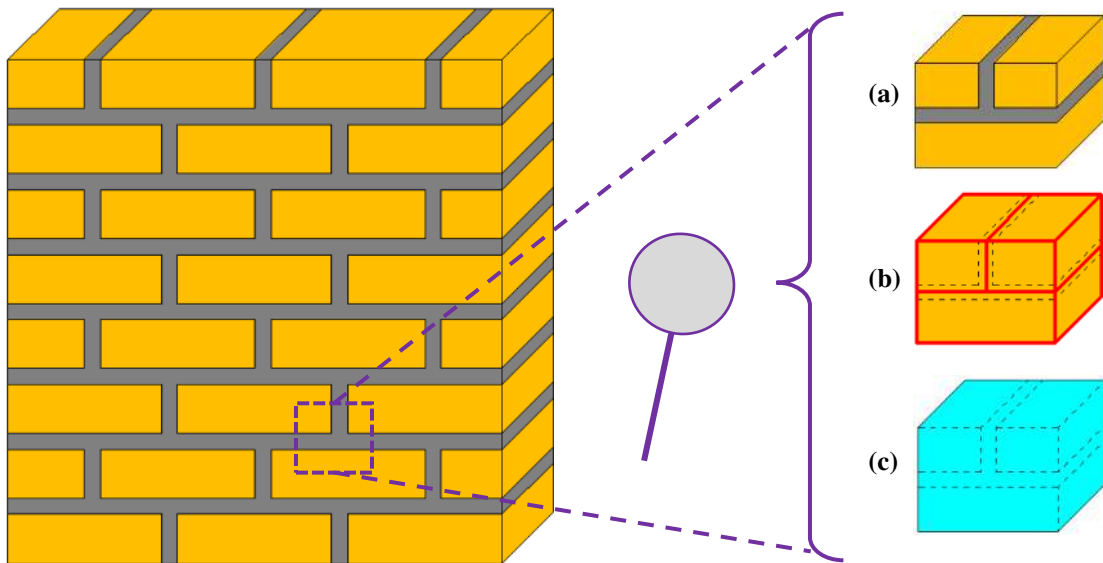
Standartların belirttiği şekilde duvar elemanları için üretim, muhafaza ve uygun ölçüm koşulları sağlandıktan sonra ilgili elemanların diyagonal basınç testleri gerçekleştirilmiştir. İlgili testler Fırat Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı bünyesinde bulunan hidrolik basınç test presi ile yapılmıştır (Şekil 6.19). Duvar elemanlarına hidrolik basınç test presi yardımıyla düzgün artan bir yük uygulandığı sırada, duvar elemanlarının taşıdığı yük değerleri yük hücresi yardımıyla, yapmış oldukları düşey yer değiştirme değerleri ise potansiyometrik cetveller yardımıyla veri toplama sistemine (TESTBOX-1001) kaydedilmiştir. Duvar elemanlarının yapmış oldukları düşey yer değiştirme değerleri, yükleme doğrultusundaki diyagonal üzerinde bulunan ve yüklemenin yapıldığı köşe noktasının yaklaşık olarak 15 cm aşağısındaki bir noktadan alınmıştır.



Şekil 6.19. Diyagonal basınç testlerinin gerçekleştirildiği basınç test presi

6.2. Sonlu Eleman Model Çalışmaları

Yapıların sonlu eleman modellemesi gelişen bilgi ve teknolojiler sayesinde giderek yaygınlaşmıştır. Buna bağlı olarak yığma yapıların da sonlu eleman modellerinin oluşturularak arzu edilen analizlerinin gerçekleştirilmesi günümüzde birçok araştırmacı tarafından sıklıkla kullanılmaktadır. Yığma yapıların sonlu eleman modellemesinde çeşitli yöntemler tercih edilmektedir. Bu yöntemler genel olarak heterojen ve homojen modeller olarak sınıflandırılabilir. Heterojen modeller, yığma duvarı oluşturan malzemelerin ayrı ayrı modellendiği yöntem olup, mikro ve basitleştirilmiş mikro olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Homojen modeller ise, yığma yapıyı oluşturan tüm malzemelerin tek bir malzeme gibi düşünüldüğü (eşdeğer malzeme) yöntem olup, makro modelleme olarak ifade edilmektedir. Bu modelleme tekniklerinin yığma bir duvar elemanı üzerinde gösterimi Şekil 6.20’de verilmiştir.



Şekil 6.20. Yığma yapıların (a) mikro, (b) basitleştirilmiş mikro ve (c) makro tekniğiyle modellenmesi

Tez çalışması kapsamında, diyagonal basınç testleri için genel olarak en iyi mekanik davranışı gösteren yığma duvar elemanına ait sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. İlgili duvar elemanının modellenmesi işlemi hem mikro hem de makro modelleme tekniği ile olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu modellere deneysel yükleme ile benzer şekilde yük uygulanmıştır. Yükleme esnasında duvar elemanının iki köşegeninin kesişim noktasına her üç eksen doğrultusunda ötelenmeye ve dönmeye karşı hareketini engelleyen ankastre mesnetler yerleştirilmiştir. Her iki modele ait malzemenin doğrusal olmayan davranışı için Drucker Prager kriteri kullanılmıştır. Tüm modelleme işlemleri ANSYS paket programı yardımıyla yapılmış ve eleman tipi olarak SOLID65 seçilmiştir [174].

Duvar elemanlarının mikro modellemesinde tuğla ve harç birimleri ayrı ayrı modellenmiştir. Birimlere ait elastisite modülleri için deneysel olarak belirlenen değerler kullanılmış, Poisson oranları ve doğrusal olmayan malzeme özellikleri ise daha önce araştırmacılar tarafından kullanılan/tavsiye edilen değerler gözönünde bulundurularak seçilmiştir.

Duvar elemanlarının makro modellemesinde ise homojen malzeme kabulü yapılarak eşdeğer yığma malzemesi kullanılmıştır. Eşdeğer yığma malzemesinin elastisite modülü,

$$E_y = \frac{t_h + t_t}{\frac{t_h}{E_h} + \frac{t_t}{E_t}} \times \rho \quad (6.8)$$

eşitliği kullanılarak belirlenmiştir [175]. Burada E_y , E_t ve E_h , sırasıyla eşdeğer yığma malzeme, tuğla ve harç için elastisite modüllerini göstermektedir. t_t tuğla malzemesinin yüksekliği, t_h harç malzemesinin derz kalınlığı ve ρ ise yığma malzemesine ait bir katsayıdır. Lourenço vd. [175] ρ katsayısının 0.5 olarak alınabileceğini ifade etmişlerdir.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölüm, deneysel analizlerden ve sonlu eleman model analizlerinden elde edilen bulgular olmak üzere iki alt başlıktan oluşmaktadır. Deneysel analizlerden elde edilen bulgular kısmında, yığma duvar elemanları için gerçekleştirilen diyagonal basınç testlerinin sonuçları verilmiş ve bu sonuçlar yorumlanmıştır. Sonlu eleman model analizlerinden elde edilen bulgular kısmında ise, optimum duvar olarak adlandırılan duvar elemanı için oluşturulan sonlu eleman modelleri ve bu modeller için kullanılan malzeme parametreleri verilmiştir. Daha sonra, sonlu eleman modellerine deneysel yükleme ile benzer şekilde yükleme yapılarak elde edilen sonuçlar sunulmuş ve bu sonuçların deneysel sonuçlar ile karşılaştırması yapılmıştır.

7.1. Deneysel Analizlerden Elde Edilen Bulgular

Bu bölümde, 108 adet yığma duvar elemanına ait diyagonal basınç testi sonuçları verilmiştir. İlgili testler yapılmadan önce tüm duvar elemanları laboratuvar koşullarında bekletilmiş ve üretimini takip eden 28'nci günün sonunda ASTM E-519 [116] ve RILEM LUM-B6 [117] standartlarının tavsiye ettiği şekilde diyagonal basınç testine tabi tutulmuştur. Deneyler esnasında, duvarların diyagonal doğrultudaki iki köşesine rijit çelik başlıkların düzgün bir şekilde yerleştirilmesine özen gösterilmiştir. Diyagonal basınç testleri sonrasında duvar elemanlarının çatlak/göçme biçimleri (Ek-1) ve mekanik parametrelerin değişimi bakımından karşılaştırması yapılmıştır.

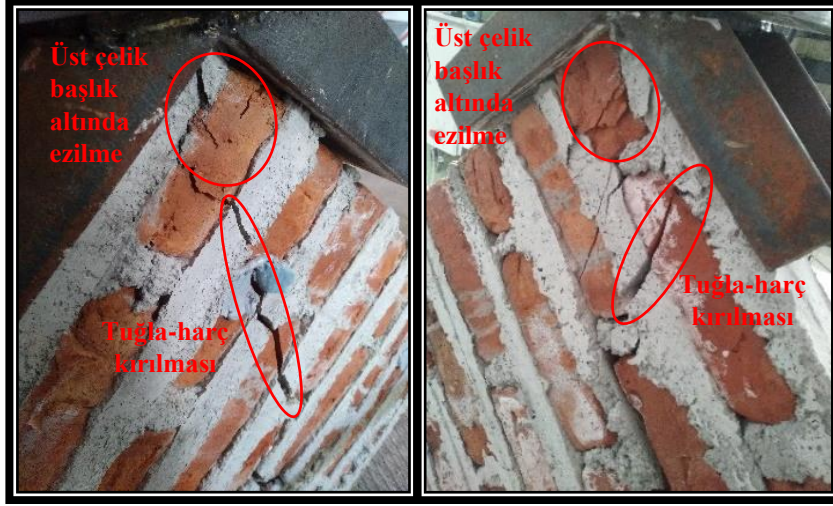
Duvar elemanları göçme biçimleri bakımından incelendiğinde;

- ❖ Yükleme doğrultusu boyunca çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların alt çelik başlığın bulunduğu köşeye doğru ilerlediği görülmüştür (Şekil 7.1(a)-7.1(b)). Ancak lifli harçlar ile oluşturulan duvarlar için, harç içerisindeki lif miktarı arttıkça bu çatlağın uzunluğunun azaldığı belirlenmiştir.
- ❖ Bazı duvar elemanları için tuğla ile harç arasında ayrılmaların olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7.1(b)-7.1(c)).



Şekil 7.1. Yüklemeye doğrultusu boyunca oluşan diyagonal çatlaklar ve tuğla ile harç arasındaki ayrılmalar

- ❖ Üst çelik başlık altındaki tuğla ve harçlarda ezilmelerin olduğu gözlenmiştir (Şekil 7.2). Ancak bu ezilmeler, hiçbir duvar elemanının göçme biçimini etkilememiş olup, hemen hemen tüm duvar elemanları diyagonal doğrultuda meydana gelen çatlaklar nedeniyle göçmeye uğramıştır.
- ❖ Tüm duvarlar için yüklemeye esnasında harçların yanı sıra tuğlalarda da kırılmalar oluşmuştur. Bunun sebebinin, harç mukavemetinin iyi düzeyde olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 7.2).



Şekil 7.2. Üst çelik başlık altında meydana gelen ezilmelere ve tuğla-harç kırılmasına örnekler

- ❖ Lifsiz harç (NH) kullanılarak oluşturulan duvar elemanları için ayrılarak (dağılarak) göçme gözlemlenirken (Şekil 7.3), lifli harçlar (L1, L2 ve L3) kullanılarak oluşturulan duvar elemanları için harç içerisinde mikro çelik lif kullanıldığından dolayı toptan göçme meydana gelmemiştir (Şekil 7.4).



Şekil 7.3. Ayrılarak göçmeye uğrayan duvarlara örnekler



Şekil 7.4. Toptan göçmenin meydana gelmediği duvarlara örnekler

- ❖ Duvar elemanlarında oluşan çatlak/göçme biçimleri yığma duvarların öngörülen çatlak/göçme davranışı ile benzerlik göstermektedir [120,124,131,176–182].

Duvar elemanları için yüklemeler esnasında kaydedilen yük ve yer değiştirme verileri kullanılarak, her bir duvar elemanına ait yük-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir (Ek-2). Bu eğrilerden yararlanılarak duvar elemanlarının süneklik kapasiteleri, maksimum kayma mukavemetleri, yapmış oldukları maksimum yer değiştirme ve taşıdıkları maksimum yük değerleri belirlenmiştir. Her bir duvar elemanı için belirlenen bu mekanik parametreler Tablo 7.1-7.4'te ve bu parametrelerin değişimini gösteren grafikler Şekil 7.5'te sunulmuştur.

Tablo 7.1. Lifsiz harç (NH) kullanılarak oluşturulan duvar elemanları için elde edilen mekanik parametreler

	P_{max} (kN)	$P_{ortalama}$ (kN)	δ_{max} (mm)	$\delta_{ortalama}$ (mm)	τ_{max} (MPa)	$\tau_{ortalama}$ (MPa)	Süneklik Kapasitesi (joule)	Ortalama Süneklik Kapasitesi (joule)
D1NHO1-A	3.56	4.26	5.85	5.81	0.035	0.041	13.18	15.15
D1NHO1-B	2.73		5.05		0.027		10.42	
D1NHO1-C	6.50		6.52		0.063		21.86	
D1NHO2-A	7.38	7.09	7.48	6.57	0.072	0.069	34.79	30.52
D1NHO2-B	7.12		6.57		0.069		28.50	
D1NHO2-C	6.76		5.66		0.066		28.29	
D1NHO3-A	8.22	8.65	7.87	8.18	0.080	0.084	38.33	37.39
D1NHO3-B	7.77		8.04		0.076		23.31	
D1NHO3-C	9.96		8.61		0.097		50.53	
D2NHO1-A	3.62	3.75	3.43	2.89	0.033	0.034	7.13	6.47
D2NHO1-B	3.48		2.20		0.031		4.02	
D2NHO1-C	4.15		3.03		0.037		8.26	
D2NHO2-A	6.91	7.16	4.66	4.69	0.062	0.065	19.85	16.98
D2NHO2-B	7.41		5.86		0.067		17.02	
D2NHO2-C	7.16		3.56		0.065		14.07	
D2NHO3-A	8.66	8.32	6.12	6.07	0.078	0.075	26.90	26.64
D2NHO3-B	7.76		7.58		0.070		33.64	
D2NHO3-C	8.54		4.51		0.077		19.37	
D3NHO1-A	3.88	4.04	2.26	1.93	0.033	0.034	5.74	5.15
D3NHO1-B	4.08		1.98		0.034		4.97	
D3NHO1-C	4.16		1.54		0.035		4.73	
D3NHO2-A	7.92	7.16	5.50	4.73	0.067	0.060	27.82	21.96
D3NHO2-B	7.25		3.69		0.061		18.25	
D3NHO2-C	6.31		5.01		0.053		19.82	
D3NHO3-A	8.13	7.46	4.27	4.28	0.068	0.063	16.48	14.33
D3NHO3-B	8.15		5.09		0.069		15.93	
D3NHO3-C	6.09		3.48		0.051		10.57	

Tablo 7.2. Ağırlıkça %1 oranında mikro çelik lif içeren harç (L1) kullanılarak oluşturulan duvar elemanları için elde edilen mekanik parametreler

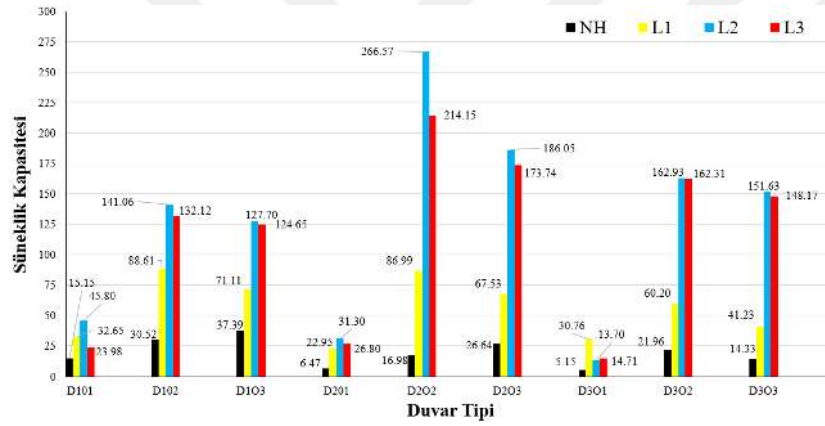
	P_{max} (kN)	$P_{ortalama}$ (kN)	δ_{max} (mm)	$\delta_{ortalama}$ (mm)	τ_{max} (MPa)	$\tau_{ortalama}$ (MPa)	Süneklik Kapasitesi (joule)	Ortalama Süneklik Kapasitesi (joule)
D1L1O1-A	9.10	9.29	8.51	7.92	0.089	0.090	36.90	32.65
D1L1O1-B	9.95		8.62		0.097		32.06	
D1L1O1-C	8.82		6.64		0.086		29.01	
D1L1O2-A	11.57	12.35	11.74	12.51	0.113	0.120	86.23	88.61
D1L1O2-B	11.68		12.85		0.114		81.52	
D1L1O2-C	13.80		12.94		0.134		98.09	
D1L1O3-A	13.37	12.20	11.83	10.38	0.130	0.119	76.50	71.11
D1L1O3-B	13.05		9.94		0.127		74.30	
D1L1O3-C	10.19		9.37		0.099		62.52	
D2L1O1-A	10.57	10.60	5.49	5.02	0.096	0.096	23.64	22.95
D2L1O1-B	10.13		5.92		0.091		27.56	
D2L1O1-C	11.11		3.65		0.100		17.63	
D2L1O2-A	15.97	15.46	10.61	11.04	0.144	0.140	67.41	86.99
D2L1O2-B	15.05		11.92		0.136		124.64	
D2L1O2-C	15.37		10.57		0.139		68.92	
D2L1O3-A	14.52	14.72	8.95	8.49	0.131	0.133	66.46	67.53
D2L1O3-B	14.62		8.21		0.132		70.70	
D2L1O3-C	15.01		8.33		0.136		65.42	
D3L1O1-A	7.73	9.49	4.88	5.54	0.065	0.080	20.51	30.76
D3L1O1-B	11.68		6.23		0.098		36.06	
D3L1O1-C	9.05		5.49		0.076		35.70	
D3L1O2-A	12.22	12.48	8.54	8.37	0.103	0.105	64.19	60.20
D3L1O2-B	12.11		7.83		0.102		54.23	
D3L1O2-C	13.10		8.72		0.110		62.19	
D3L1O3-A	15.50	12.45	6.81	6.90	0.130	0.105	50.67	41.23
D3L1O3-B	10.74		7.08		0.090		29.98	
D3L1O3-C	11.12		6.81		0.093		43.03	

Tablo 7.3. Ağırlıkça %2 oranında mikro çelik lif içeren harç (L2) kullanılarak oluşturulan duvar elemanları için elde edilen mekanik parametreler

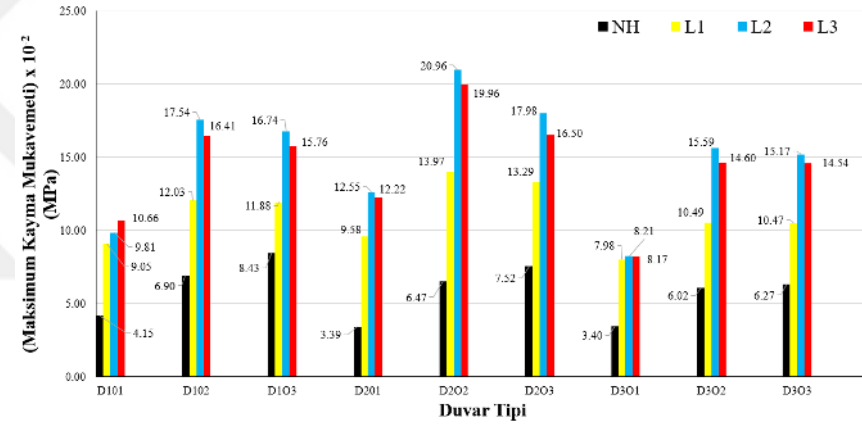
	P_{max} (kN)	$P_{ortalama}$ (kN)	δ_{max} (mm)	$\delta_{ortalama}$ (mm)	τ_{max} (MPa)	$\tau_{ortalama}$ (MPa)	Süneklik Kapasitesi (joule)	Ortalama Süneklik Kapasitesi (joule)
D1L2O1-A	9.61	10.08	6.59	9.40	0.094	0.098	33.44	45.80
D1L2O1-B	10.35		9.92		0.101		57.54	
D1L2O1-C	10.28		11.69		0.100		46.40	
D1L2O2-A	14.70	18.01	13.95	13.54	0.143	0.175	121.53	141.06
D1L2O2-B	18.37		13.32		0.179		129.53	
D1L2O2-C	20.95		13.35		0.204		172.13	
D1L2O3-A	17.13	17.19	15.11	13.63	0.167	0.167	142.05	127.70
D1L2O3-B	16.49		12.40		0.161		95.81	
D1L2O3-C	17.94		13.36		0.175		145.24	
D2L2O1-A	15.18	13.90	4.90	3.95	0.137	0.126	35.58	31.30
D2L2O1-B	12.42		2.34		0.112		18.85	
D2L2O1-C	14.10		4.61		0.127		39.47	
D2L2O2-A	22.19	23.21	16.09	16.28	0.200	0.210	255.32	266.57
D2L2O2-B	23.15		15.04		0.209		245.88	
D2L2O2-C	24.28		17.72		0.219		298.53	
D2L2O3-A	19.64	19.91	15.52	15.97	0.177	0.180	172.17	186.05
D2L2O3-B	20.10		18.93		0.182		258.13	
D2L2O3-C	19.99		13.47		0.181		127.83	
D3L2O1-A	9.25	9.76	4.32	3.34	0.078	0.082	16.90	13.70
D3L2O1-B	8.84		2.94		0.074		12.98	
D3L2O1-C	11.19		2.77		0.094		11.22	
D3L2O2-A	18.03	18.54	15.45	15.70	0.152	0.156	167.22	162.93
D3L2O2-B	18.72		15.86		0.157		158.99	
D3L2O2-C	18.86		15.79		0.159		162.59	
D3L2O3-A	18.74	18.05	15.19	15.31	0.158	0.152	156.70	151.63
D3L2O3-B	19.33		15.24		0.163		139.69	
D3L2O3-C	16.08		15.51		0.135		158.49	

Tablo 7.4. Ağırlıkça %3 oranında mikro çelik lif içeren harç (L3) kullanılarak oluşturulan duvar elemanları için elde edilen mekanik parametreler

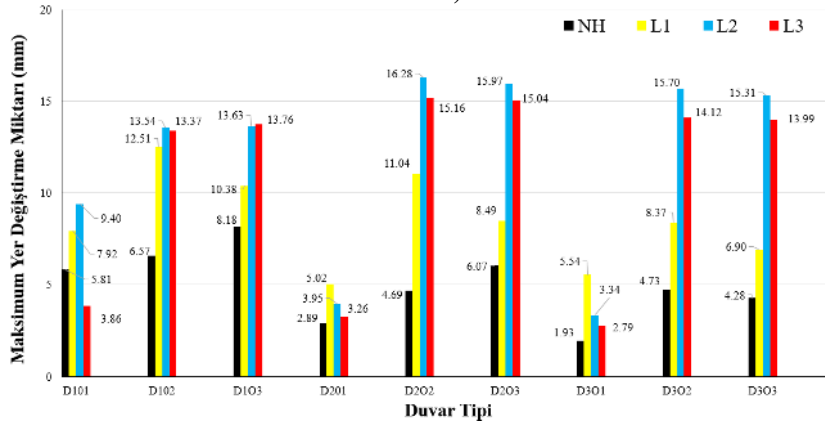
	P_{max} (kN)	$P_{ortalama}$ (kN)	δ_{max} (mm)	$\delta_{ortalama}$ (mm)	τ_{max} (MPa)	$\tau_{ortalama}$ (MPa)	Süneklik Kapasitesi (joule)	Ortalama Süneklik Kapasitesi (joule)
D1L3O1-A	8.50	10.95	3.23	3.86	0.083	0.107	17.56	23.98
D1L3O1-B	14.81		4.83		0.144		36.30	
D1L3O1-C	9.54		3.54		0.093		18.07	
D1L3O2-A	16.97	16.85	12.87	13.37	0.165	0.164	116.15	132.12
D1L3O2-B	16.56		13.53		0.161		126.00	
D1L3O2-C	17.03		13.69		0.166		154.22	
D1L3O3-A	15.42	16.18	13.22	13.76	0.150	0.158	126.57	124.65
D1L3O3-B	16.20		14.60		0.158		124.49	
D1L3O3-C	16.93		13.47		0.165		122.89	
D2L3O1-A	14.61	13.53	1.54	3.26	0.132	0.122	13.15	26.80
D2L3O1-B	13.10		3.63		0.118		25.69	
D2L3O1-C	12.89		4.62		0.116		41.56	
D2L3O2-A	20.47	22.10	15.19	15.16	0.185	0.200	217.11	214.15
D2L3O2-B	22.39		13.94		0.202		211.95	
D2L3O2-C	23.45		16.34		0.212		213.40	
D2L3O3-A	19.14	18.27	14.40	15.04	0.173	0.165	137.95	173.74
D2L3O3-B	16.78		15.28		0.152		175.17	
D2L3O3-C	18.88		15.43		0.171		208.09	
D3L3O1-A	8.99	9.72	2.39	2.79	0.076	0.082	15.23	14.71
D3L3O1-B	10.53		3.20		0.089		15.78	
D3L3O1-C	9.64		2.79		0.081		13.13	
D3L3O2-A	18.76	17.36	14.49	14.12	0.158	0.146	166.24	162.31
D3L3O2-B	17.23		14.04		0.145		175.84	
D3L3O2-C	16.10		13.83		0.135		144.87	
D3L3O3-A	17.17	17.29	13.74	13.99	0.144	0.145	152.49	148.17
D3L3O3-B	17.40		14.54		0.146		157.79	
D3L3O3-C	17.31		13.69		0.146		134.23	



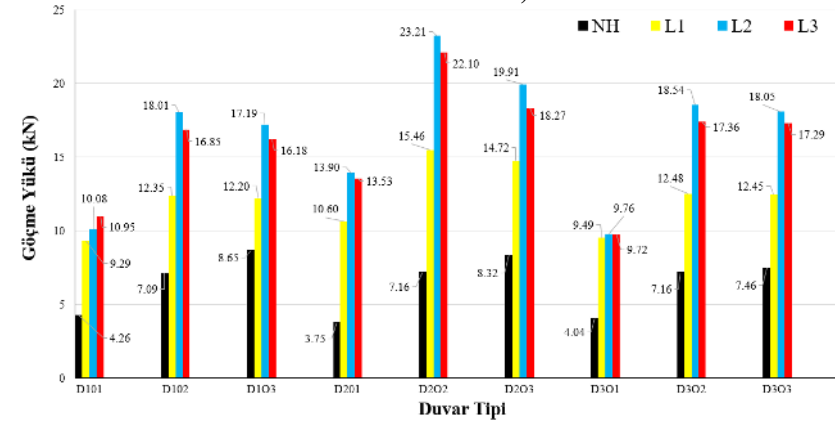
a)



b)



c)



d)

Şekil 7.5. a) Süneklik kapasitesi b) Maksimum kayma mukavemeti c) Maksimum yer değiştirme miktarı d) Göçme yükü bakımından duvar elemanlarının karşılaştırılması

Süneklik kapasitesi bakımından değerlendirildiğinde (Tablo 7.1-7.4 ve (Şekil 7.5(a)));

- ❖ NH tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlar için, derz kalınlığı aynı olan duvarlarda örgü tipi bakımından bir karşılaştırma yapıldığında, Örgü 2 ve Örgü 3 tip duvarların, Örgü 1 tip duvarlardan daha iyi bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Ancak Örgü 2 ve Örgü 3 tiplerinden hangisinin daha iyi olduğu ile ilgili kesin bir kaniya varılamamıştır.
- ❖ L1, L2 ve L3 tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlar için derz kalınlığı aynı olan duvarlarda örgü tipi bakımından bir karşılaştırma yapıldığında, Örgü 2 ve Örgü 3 tip duvarların, Örgü 1 tip duvarlardan daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Örgü 2 ve Örgü 3 tip duvarlar kendi aralarında değerlendirildiğinde, Örgü 2 tip duvarların daha iyi bir davranış sergilediği ancak bu iki örgü tipinin sonuçları arasında çok büyük farkların olmadığı görülmüştür.
- ❖ NH tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlarda süneklik kapasitesi derz kalınlığı bakımından değerlendirildiğinde; derz kalınlığı arttıkça süneklik kapasitesinin Örgü 1 ve Örgü 3 tip duvarlar için azaldığı, ancak Örgü 2 tip duvarlar için bu durumun geçerli olmadığı belirlenmiştir.
- ❖ L1 tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlarda süneklik kapasitesi derz kalınlığı bakımından değerlendirildiğinde; derz kalınlığı arttıkça Örgü 2 ve Örgü 3 tip duvarlarda süneklik kapasitesinin düştüğü, Örgü 1 tipinde ise en büyük değerlerin sırasıyla derz kalınlığı 1 cm, 3 cm ve 2 cm olan duvarlarda olduğu tespit edilmiştir.
- ❖ L2 tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlarda süneklik kapasitesi derz kalınlığı bakımından değerlendirildiğinde; derz kalınlığı arttıkça Örgü 1 tip duvarlar için süneklik kapasitesinin düştüğü, Örgü 2 ve Örgü 3 tip duvarlarda ise en yüksek değerlerin sırasıyla derz kalınlığı 2 cm, 3 cm ve 1 cm olan duvarlarda olduğu belirlenmiştir.
- ❖ L3 tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlarda süneklik kapasitesi derz kalınlığı bakımından değerlendirildiğinde; en yüksek süneklik kapasitesi değerlerinin sırasıyla derz kalınlığı 2 cm, 3 cm ve 1 cm olan duvarlarda olduğu belirlenmiştir.
- ❖ Aynı derz kalınlığına ve aynı örgü tipine sahip duvarlar için harç tipi bakımından bir karşılaştırma yapıldığında; en yüksek süneklik kapasitesinin sırasıyla L2, L3, L1 ve NH tip harçlar ile oluşturulan duvarlarda olduğu ve bu durumun yalnızca D1O1 ve D3O1 tip duvarlarda görülmediği belirlenmiştir.

Maksimum kayma mukavemeti bakımından değerlendirildiğinde (Tablo 7.1-7.4 ve (Şekil 7.5(b)));

- ❖ NH tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlar için derz kalınlığı aynı olan duvarlarda örgü tipi bakımından bir karşılaştırma yapıldığında, maksimum kayma mukavemetinin sırasıyla Örgü 3, Örgü 2 ve Örgü 1 tip duvarlarda olduğu belirlenmiştir.
- ❖ L1, L2 ve L3 tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlar için derz kalınlığı aynı olan duvarlarda örgü tipi bakımından bir karşılaştırma yapıldığında, maksimum kayma mukavemetinin sırasıyla Örgü 2, Örgü 3 ve Örgü 1 tip duvarlarda olduğu belirlenmiştir.
- ❖ NH tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlarda maksimum kayma mukavemeti derz kalınlığı bakımından değerlendirildiğinde; derz kalınlığı arttıkça maksimum kayma mukavemetinin düştüğü belirlenmiştir.
- ❖ L1, L2 ve L3 tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlarda maksimum kayma mukavemeti derz kalınlığı bakımından değerlendirildiğinde; en büyük değerlerin sırasıyla derz kalınlığı 2 cm, 1 cm ve 3 cm olan duvarlarda olduğu belirlenmiştir.
- ❖ Aynı derz kalınlığına ve aynı örgü tipine sahip duvarlar için harç tipi bakımından bir karşılaştırma yapıldığında; en yüksek kayma mukavemeti değerlerinin sırasıyla L2, L3, L1 ve NH tip harçlar ile oluşturulan duvarlar için olduğu ve bu durumun yalnızca D1O1 tip duvarlarda görülmediği belirlenmiştir.

Maksimum yer değiştirme miktarı bakımından değerlendirildiğinde (Tablo 7.1-7.4 ve (Şekil 7.5(c)));

- ❖ NH tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlar için derz kalınlığı aynı olan duvarlarda örgü tipi bakımından bir karşılaştırma yapıldığında, Örgü 2 ve Örgü 3 tip duvarların, Örgü 1 tip duvarlardan daha iyi davranış sergilediği görülmüştür. Ancak Örgü 2 ve Örgü 3 tipleri arasında hangi örgü tipinin daha iyi olduğu ile ilgili bir sonuca varılmamıştır. Maksimum yer değiştirme miktarı, derz kalınlığı 1 cm ve 2 cm olan duvarlar için Örgü 3 tip duvarlarda, derz kalınlığı 3 cm olan duvarlar için ise Örgü 2 tip duvarlarda görülmüştür.
- ❖ L1 tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlar için derz kalınlığı aynı olan duvarlarda örgü tipi bakımından bir karşılaştırma yapıldığında, maksimum yer değiştirme miktarı sırasıyla Örgü 2, Örgü 3 ve Örgü 1 tip duvarlarda görülmüştür.
- ❖ L2 ve L3 tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlar için derz kalınlığı aynı olan duvarlarda örgü tipi bakımından bir karşılaştırma yapıldığında, Örgü 2 ve Örgü 3 tip duvarlardaki maksimum yer değiştirme miktarının, Örgü 1 tip duvarlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek değerlerin ise derz kalınlığı 1 cm olan

duvarlar için sırasıyla Örgü 3, Örgü 2 ve Örgü 1 tip duvarlarda, derz kalınlığı 2 cm ve 3 cm olan duvarlar için ise sırasıyla Örgü 2, Örgü 3 ve Örgü 1 tip duvarlarda meydana geldiği belirlenmiştir.

- ❖ NH tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlar için maksimum yer değiştirme miktarı derz kalınlığı bakımından değerlendirildiğinde; derz kalınlığı arttıkça Örgü 1 ve Örgü 3 tip duvarlar için maksimum yer değiştirme miktarının düştüğü, ancak bu durumun Örgü 2 tip duvarlar için geçerli olmadığı belirlenmiştir.
- ❖ L1 tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlar için maksimum yer değiştirme miktarı derz kalınlığı bakımından değerlendirildiğinde; Örgü 1 tip duvarlar için maksimum yer değiştirme miktarının sırasıyla derz kalınlığı 1 cm, 3 cm ve 2 cm olan duvarlarda olduğu, Örgü 2 ve Örgü 3 tip duvarlar için ise derz kalınlığı arttıkça maksimum yer değiştirme miktarının düştüğü görülmüştür.
- ❖ L2 tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlar için maksimum yer değiştirme miktarı derz kalınlığı bakımından değerlendirildiğinde; Maksimum yer değiştirme miktarının Örgü 1 tip duvarlar için sırasıyla derz kalınlığı 1 cm, 3 cm ve 2 cm olan duvarlarda, Örgü 2 ve Örgü 3 tip duvarlar için ise sırasıyla derz kalınlığı 2 cm, 3 cm ve 1 cm olan duvarlarda olduğu belirlenmiştir.
- ❖ L3 tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlar için maksimum yer değiştirme miktarı derz kalınlığı bakımından değerlendirildiğinde; Örgü 1 tip duvarlar için derz kalınlığı arttıkça maksimum yer değiştirme miktarının düştüğü, Örgü 2 ve Örgü 3 tip duvarlar için ise maksimum yer değiştirme miktarının sırasıyla derz kalınlığı 2 cm, 3 cm ve 1 cm olan duvarlarda meydana geldiği tespit edilmiştir belirlenmiştir.
- ❖ Aynı derz kalınlığına ve aynı örgü tipine sahip duvarlar için harç içeriği bakımından bir karşılaştırma yapıldığında; maksimum yer değiştirme miktarının D1O2, D2O2, D2O3, D3O2 ve D3O3 tip duvarlar için sırasıyla L2, L3, L1 ve NH harç tipleri, D2O1 ve D3O1 tip duvarlar için sırasıyla L1, L2, L3 ve NH harç tipleri, D1O3 tip duvarlar için sırasıyla L3, L2, L1 ve NH harç tipleri, D1O1 tip duvarlar için ise en yüksek değerlerin sırasıyla L2, L1, NH ve L3 harç tipleri ile olduğu belirlenmiştir.

Göçme yükü bakımından değerlendirildiğinde (Tablo 7.1-7.4 ve (Şekil 7.5(d)));

- ❖ Derz kalınlığı aynı olan duvarlarda örgü tipi bakımından bir karşılaştırma yapıldığında, en büyük göçme yükü değerlerinin NH tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlar için sırasıyla Örgü 3, Örgü 2 ve Örgü 1 tip duvarlarda meydana geldiği, L1, L2 ve L3 tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlar için ise sırasıyla Örgü 2, Örgü 3 ve Örgü 1 tip duvarlarda meydana geldiği belirlenmiştir.
- ❖ NH tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlar için göçme yükü derz kalınlığı bakımından değerlendirildiğinde; Örgü 3 tip duvarlar için derz kalınlığı arttıkça

göçme yükü değerinin düştüğü, ancak bu durumun Örgü 1 ve Örgü 2 tip duvarlar için geçerli olmadığı belirlenmiştir.

- ❖ L1 tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlar için göçme yükü derz kalınlığı bakımından değerlendirildiğinde; en büyük göçme yükü değerlerinin sırasıyla derz kalınlığı 2 cm, 3 cm ve 1 cm olan duvarlarda meydana geldiği belirlenmiştir.
- ❖ L2 ve L3 tip harçlar kullanılarak oluşturulan duvarlar için göçme yükü derz kalınlığı bakımından değerlendirildiğinde; Örgü 1 tip duvarlar için en büyük göçme yükü değerinin sırasıyla derz kalınlığı 2 cm, 1 cm ve 3 cm olan duvarlarda olduğu, Örgü 2 ve Örgü 3 tip duvarlar için ise en büyük göçme yükü değerlerinin sırasıyla derz kalınlığı 2 cm, 3 cm ve 1 cm olan duvarlarda olduğu görülmüştür.
- ❖ Aynı derz kalınlığına ve aynı örgü tipine sahip duvarlar için harç içeriği bakımından bir karşılaştırma yapıldığında; en büyük göçme yükü değerinin D1O1 tip duvarlar hariç tüm duvarlarda sırasıyla L2, L3, L1 ve NH harç tipleri ile olduğu, D1O1 tip duvarlar için ise sırasıyla L3, L2, L1 ve NH harç tipleri ile olduğu belirlenmiştir.

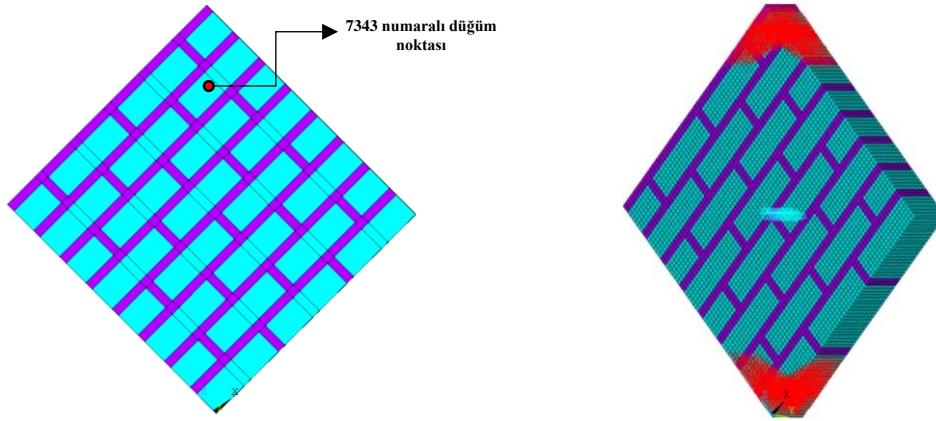
Yukarıda verilen Tablo 7.1-7.4 ve Şekil 7.5 bir bütün olarak değerlendirilirse;

- ✓ NH tip harçların kullanıldığı duvarlar, hemen hemen tüm derz kalınlıkları ve örgü tipleri için mekanik parametreler bakımından en düşük sayısal değerlere sahip olan duvarlardır. Bu nedenle çelik lifin mekanik parametrelere olumlu etkisi aşıkârdır.
- ✓ Örgü 1 tip duvarlar, hemen hemen tüm derz kalınlıkları ve harç tipleri için mekanik parametreler bakımından en düşük sayısal değerlere sahip olan duvarlardır. Bu örgü tipi için genel olarak anlamlı sonuçlar elde edilememiştir.
- ✓ Harç tipine göre bir kıyaslama yapıldığında, en büyük sayısal değerlerin genel olarak L2 tip harçların kullanıldığı duvarlarda olduğu görülmüştür.
- ✓ Örgü tipleri bakımından bir kıyaslama yapıldığında, Örgü 2 ve Örgü 3 tip duvarlara ait sonuçlar Örgü 1 tip duvarlardan daha yüksek çıkmıştır. Örgü 2 ve Örgü 3 tip duvarlar için elde edilen sonuçlar birbirine çok yakın olsa da hemen hemen tüm durumlarda da Örgü 2 tip duvarlar daha iyi bir performans sergilemiştir. Ayrıca saha uygulamaları için 1/2 şaşırtmalı örgü tipi 1/3 şaşırtmalı örgü tipine göre işçilik bakımından daha avantajlıdır.
- ✓ Derz kalınlığına göre bir kıyaslama yapıldığında, en büyük sayısal değerlerin derz kalınlığı 2 cm olan duvarlarda olduğu belirlenmiştir.
- ✓ Yukarıda sıralanan tüm bu sonuçlar için mekanik parametreler bakımından en iyi davranışı sergileyen duvarlar, derz kalınlığı 2 cm (D2), harç tipi L2 (%2 lifli harç) ve Örgü tipi 2 (O2) şeklindeki D2L2O2 tip duvarlar olduğu ortaya çıkmıştır.

7.2. Sonlu Eleman Model Analizlerinden Elde Edilen Bulgular

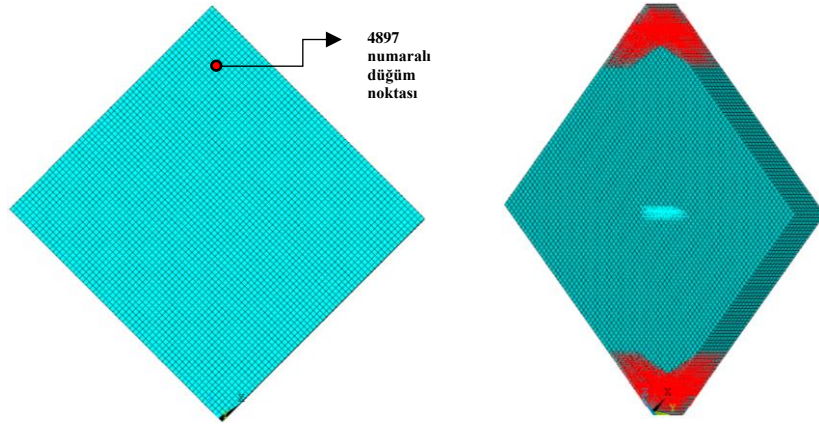
Bu bölümde, deneysel olarak en iyi davranışı sergileyen D2L2O2 duvarının sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Modellemede mikro ve makro modelleme teknikleri kullanılmıştır. Deneysel olarak diyagonal basınç testine tabi tutulan duvar elemanının iki köşegen doğrultusu yükleme açısından simetrik olduğundan bu iki köşegenin kesişim noktası hareketsiz kalacaktır. Bu nedenle modellemelerde söz konusu noktaya ankastre mesnet yerleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda çelik başlıkların uygulanan yükü köşe noktasından başlayarak üçgensel bir biçimde duvara ilettiği kabul edilerek sonlu eleman modellemesinde yükleme yapılmıştır. Bu yükleme altında duvar elemanının doğrusal olmayan çözümleri gerçekleştirilmiştir. Malzemenin doğrusal olmayan davranışı için Drucker Prager kriteri kullanılmıştır. Bu kriterle ait parametreler, optimum duvar elemanı için deneysel sonuçlar ve sonlu eleman çözümleri ile bulunan yük-yer değiştirme eğrileri birbiriyle uyum içerisinde olacak şekilde parametrik bir çalışma ile belirlenmiştir. Sonlu eleman çözümlerinden elde asal gerilmeler ve yer değiştirmeler değerlendirilmiştir.

Mikro modelleme yönteminin kullanıldığı sonlu eleman modeli için tuğla ve harç birimleri ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Tuğla ve harç birimlerinin elastisite modülleri için, Bölüm 6’da gerçekleştirilen çalışmalar ile sırasıyla 2398 MPa ve 4125 MPa olarak belirlenen değerler kullanılmıştır. Bu model için 36864 adet prizmatik eleman ve 42250 adet düğüm noktası kullanılmıştır. Modele ait görünüm Şekil 7.6’da verilmiştir.



Şekil 7.6. Duvar elemanına ait mikro model

Makro modelleme yöntemi ise malzemenin homojenleştirme kabulüne dayanmaktadır. Yığma malzemesinin eşdeğer elastisite modülü Denklem (6.8)’den yararlanılarak 1339 MPa olarak hesaplanmıştır. Model için 35712 adet prizmatik eleman ve 40950 adet düğüm noktası kullanılmıştır. Bu yöntem ile oluşturulan sonlu eleman modeli Şekil 7.7’de verilmiştir.



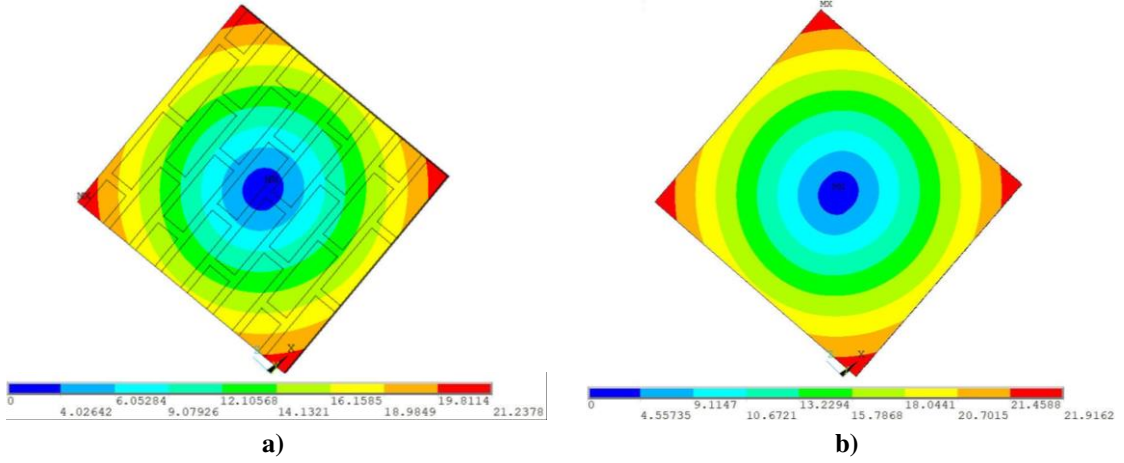
Şekil 7.7. Duvar elemanına ait makro model

Her iki sonlu eleman modelinde de malzemenin doğrusal olmayan davranışı için Drucker Prager kriteri kullanılmış ve Poisson oranı 0.2 olarak kabul edilmiştir. Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri Tablo 7.5’te verilmiştir.

Tablo 7.5. Mikro ve makro model için analizlerde kullanılan malzeme parametreleri

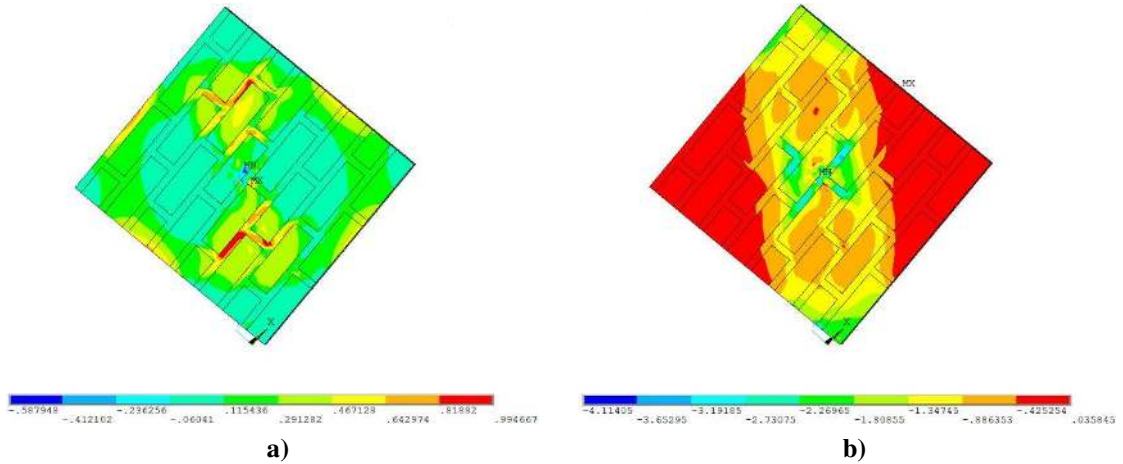
Model	Malzeme	Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı	Kohezyon (MPa)	İçsel sürtünme açısı (°)	Dilatasyon açısı (°)
Mikro	Tuğla	2398	0.2	0.4	26	26
	Harç	4125	0.2	0.713	26	26
Makro	Yığma	1339	0.2	0.45	32.5	32.5

Gerçekleştirilen analizler neticesinde, duvar elemanının göçme yükü ve maksimum yer değiştirme değeri mikro model çözümlerinde sırasıyla 22.671 kN ve 14.861 mm, makro model çözümlerinde ise sırasıyla 22.607 kN ve 15.547 mm olarak meydana gelmiştir. Duvar elemanının mikro ve makro model çözümleri için yer değiştirmenin vektöriyel toplamının konturları Şekil 7.8’de verilmiştir. Bu yer değiştirmeler her iki model çözümleri için (mikro ve makro) benzerlik göstermekte olup, duvar elemanının köşe noktalarından başlayarak orta noktasına doğru azalmaktadır. Buna göre, maksimum yer değiştirmeler köşe noktaları civarında, minimum yer değiştirmeler ise duvar elemanının iki köşegenin kesişim noktası çevresinde meydana gelmektedir.

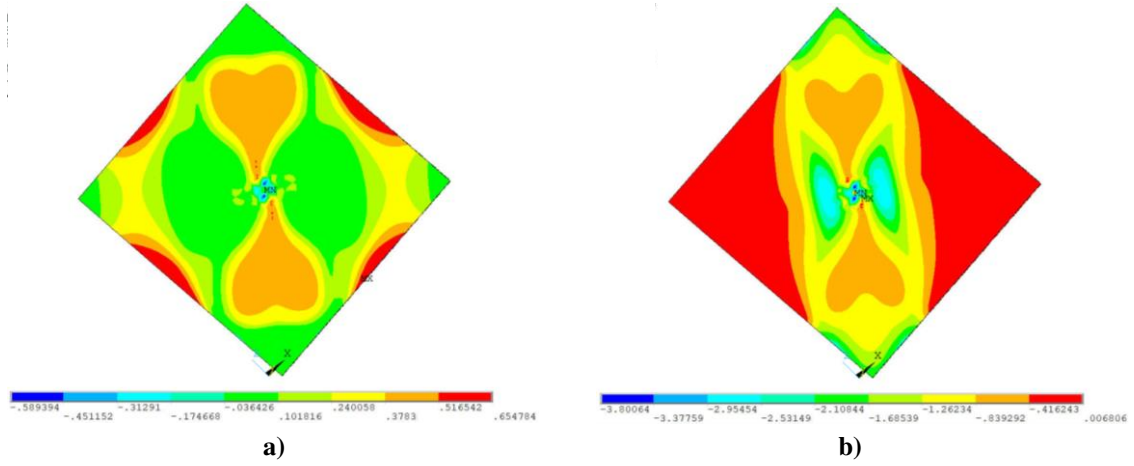


Şekil 7.8. a) Mikro ve b) makro model çözümleri için yer değiştirmenin vektöriyel toplamının konturları

Mikro ve makro model analizleri için göçme esnasında duvar elemanında oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelere ait konturlar Şekil 7.9-7.10'da verilmiştir. Mikro model için maksimum ve minimum asal gerilmelerin mutlak değerce en büyük değerleri ve makro model için minimum asal gerilmelerin mutlak değerce en büyük değerleri yükleme doğrultusundaki köşegeni çevreleyen bir bant içerisinde meydana gelmiştir. Her iki model çözümleri için dış kenarların orta bölgelerine yakın yerlerde maksimum asal gerilmelerin artış gösterdiği gözlenmiştir. Bu artış mikro model çözümleri için daha küçük bir bölgede iken, makro model çözümleri için daha geniş bir bölgededir. Ayrıca makro model analizleri için maksimum asal gerilmelerin mutlak değerce en büyük değerleri, iki köşegenin kesiştiği nokta çevresinde de küçük bölgeler halinde görülmektedir.

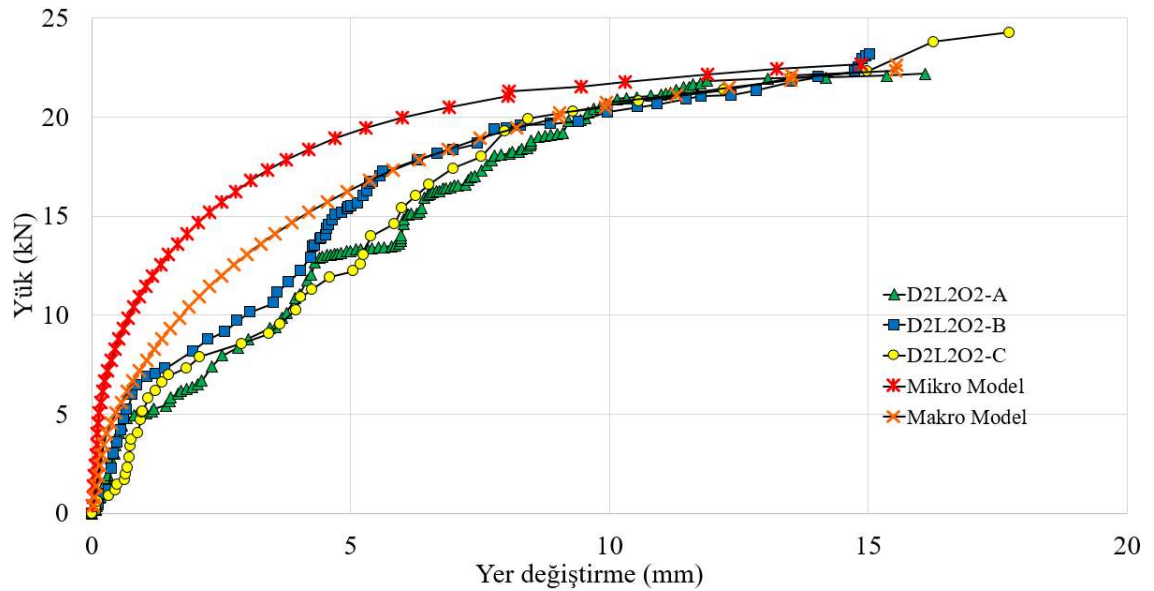


Şekil 7.9. Mikro model çözümlerinden elde edilen a) maksimum ve b) minimum asal gerilme konturları



Şekil 7.10. Makro model çözümlerinden elde edilen a) maksimum ve b) minimum asal gerilme konturları

Mikro ve makro model çözümleri için yük-yer değiştirme eğrileri deneysel sonuçlar ile birlikte Şekil 7.11’de verilmiştir. Burada D2L2O2-A, D2L2O2-B ve D2L2O2-C, D2L2O2 duvarına ait tekrar numunelerini temsil etmektedir. Eğrilerin çiziminde kullanılan yer değiştirmeler, mikro ve makro modeller için sırasıyla 7343 (Şekil 7.6) ve 4897 (Şekil 7.7) numaralı düğüm noktalarının düşey yer değiştirmeleridir. Yük-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, deneysel ölçüm sonuçlarına ait eğrilerin birbiri ile uyumlu olduğu ve sonlu eleman model çözümlerinin de deneysel sonuçlar ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Makro model çözümleri deneysel sonuçlara mikro model çözümlerine nazaran daha yakın olarak seyretmektedir.



Şekil 7.11. Deneysel ölçüm sonuçları ve sonlu eleman model çözümlerine ait yük-yer değiştirme eğrileri

8. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, harç ve örgü tipinin yığma duvarların mekanik parametrelerine olan etkisi incelenmiştir. Bu doğrultuda, içeriğinde farklı karışım oranlarında çelik lif bulunan harçlar ile farklı derz kalınlıklarına ve örgü tiplerine sahip olacak şekilde duvar elemanları oluşturulmuş ve bu duvar elemanları diyagonal basınç testine tabi tutularak mekanik parametreler bakımından en iyi davranışı gösteren (optimum) duvar elemanı belirlenmiştir. Daha sonra, optimum duvar elemanının sonlu eleman model çözümleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sonlu eleman model çözümleri birbiriyle karşılaştırılarak sonlu eleman çözümlerinin etkinliği incelenmiştir.

Deneysel çalışmalar kapsamında öncelikle kum, yığma birimi (dolu harman tuğlası) ve harç birimleri için birtakım fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu birimler kullanılarak, 4 farklı harç tipi (ağırlıkça %0, %1, %2 ve %3 oranında çelik lif içeren harçlar), 3 farklı derz kalınlığı (1 cm, 2 cm ve 3 cm) ve 3 farklı örgü tipi (düz örgü, 1/2 şaşırtmalı örgü ve 1/3 şaşırtmalı örgü) için toplamda 108 adet duvar elemanı oluşturulmuş ve ilgili duvar elemanları diyagonal basınç testine tabi tutulmuştur. Her bir duvar elemanının göçme biçimleri, süneklik kapasitesi, maksimum kayma mukavemeti, maksimum yer değiştirme miktarı ve göçme yükü elde edilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- ❖ Diyagonal basınç testleri esnasında yükleme doğrultusu boyunca çatlakların meydana geldiği ve bu çatlakların alt çelik başlığın bulunduğu köşeye doğru ilerlediği gözlenmiştir. Harç içerisindeki lif miktarı arttıkça yükleme köşegeni doğrultusunda meydana gelen bu çatlakların uzunluğunun azaldığı görülmüştür.
- ❖ Duvar elemanlarında oluşan çatlak/göçme biçimleri yığma duvarların öngörülen çatlak/göçme davranışı ile benzerlik göstermektedir.
- ❖ Lifsiz harç kullanılarak oluşturulan duvar elemanları için ayrılarak (dağılarak) göçme gözlemlenirken, lifli harçlar kullanılarak oluşturulan duvar elemanlarında böyle bir göçme biçimi meydana gelmemiştir.
- ❖ Lifsiz harçların kullanıldığı duvarlar, hemen hemen tüm derz kalınlıkları ve örgü tipleri için mekanik parametreler bakımından en düşük sayısal değerlere sahip olan duvarlardır. Bu nedenle çelik lifin mekanik parametrelere olumlu etkisi aşikârdır.
- ❖ Düz örgü tipindeki duvarlar, hemen hemen tüm derz kalınlıkları ve harç tipleri için mekanik parametreler bakımından en düşük sayısal değerleri vermiştir.
- ❖ Harç tipine göre bir kıyaslama yapıldığında, mekanik parametreler bakımından en büyük sayısal değerlerin genel olarak, içerisinde ağırlıkça %2 karışım oranında çelik lif bulunduran harçların kullanıldığı duvarlarda olduğu belirlenmiştir.
- ❖ Örgü tipleri bakımından bir kıyaslama yapıldığında, 1/2 ve 1/3 şaşırtmalı örgü tipi duvarlara ait mekanik parametre değerleri, düz örgü tipi duvarlardan daha yüksek

çıkmiştir. 1/2 ve 1/3 şaşırtmalı örgü tipi duvarlar için genel olarak elde edilen sonuçlar birbirine çok yakın olsa da hemen hemen tüm durumlarda da 1/2 şaşırtmalı örgü tipi duvarlar daha iyi bir performans sergilemiştir. Ayrıca saha uygulamaları için 1/2 şaşırtmalı örgü tipi 1/3 şaşırtmalı örgü tipine göre işçilik bakımından daha avantajlıdır.

- ❖ Derz kalınlığına göre bir kıyaslama yapıldığında, mekanik parametreler bakımından en büyük sayısal değerlerin derz kalınlığı 2 cm olan duvarlarda olduğu belirlenmiştir.
- ❖ Süneklik kapasitesi, maksimum kayma mukavemeti, göçme yükü ve maksimum yer değiştirme miktarı mekanik parametreleri bakımından en iyi davranışı sergileyen duvar, içerisinde ağırlıkça %2 karışım oranında çelik lif bulunduran 2 cm derz kalınlığında harç ile üretilen 1/2 şaşırtmalı örgü tipi duvarlar olduğu ortaya çıkmıştır. Bu duvar, optimum duvar elemanı olarak adlandırılmıştır.

Sonlu eleman model çalışmaları kapsamında, deneysel çalışmalar ile belirlenen optimum duvar elemanının mikro ve makro modelleme teknikleri kullanılarak sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Duvar elemanının doğrusal olmayan davranışı için Drucker Prager kriteri kullanılmıştır. Optimum duvar elemanı için bu parametreler, deneysel ve sayısal yol ile bulunan yük-yer değiştirme eğrileri birbiriyle uyum içerisinde olacak şekilde parametrik bir çalışma ile belirlenmiştir.

Sonlu eleman model çözümleri için elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- ❖ Mikro ve makro çözümleri için yer değiştirmenin vektöriyel toplamının kontur grafiklerinden, yer değiştirmelerin köşe noktaları civarında maksimum olduğu, duvar elemanının iki köşegeninin kesişim noktasına doğru giderek azaldığı ve bu nokta çevresinde minimum değerini aldığı belirlenmiştir.
- ❖ Asal gerilme kontur grafiklerinden; mikro model çözümleri için maksimum ve minimum asal gerilmelerin mutlak değerce en büyük değerlerinin, yükleme doğrultusundaki köşegeni çevreleyen bir bant içerisinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Bunun yanında dış kenarların orta bölgelerine yakın yerlerinde de maksimum asal gerilmelerin artış gösterdiği gözlenmiştir.
- ❖ Asal gerilme kontur grafiklerinden; makro model çözümleri için maksimum asal gerilmelerin mutlak değerce en büyük değerleri duvar kenarlarının orta noktaları civarında geniş bir bölgede ve iki köşegenin kesiştiği nokta çevresinde daha küçük bölgeler halinde oluşmuştur. Minimum asal gerilmeler için mutlak değerce en büyük değerler, yükleme doğrultusundaki köşegeni çevreleyen geniş bir bant içerisinde meydana gelmiştir.

Bu çalışma ile harç içerisinde çelik lif kullanımının, yığma duvarların süneklik kapasitesi, maksimum kayma mukavemeti, göçme yükü ve maksimum yer değiştirme miktarı mekanik parametrelerini artırdığı belirlenmiştir. Bu parametreler bakımından en iyi davranışı sergileyen duvar elemanı (optimum duvar elemanı) ise, içerisinde ağırlıkça %2 karışım oranında çelik lif bulunduran 2 cm derz kalınlığında harç ile üretilen 1/2 şaşırtmalı örgü tipi duvardır. Optimum duvar elemanı için gerçekleştirilen sonlu eleman model çözümleri ile bu duvar elemanına ait deneysel çözümler karşılaştırıldığında, genel olarak uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, sonlu eleman model çözümlerinin yığma duvarların davranışını tahmin etmede önemli bir araç olduğunu göstermiştir.



ÖNERİLER

Yığma duvarlar, kendisini oluşturan yığma birim ve harçların yapısal özellikleri nedeniyle gevrek bir davranışa sahiptir. Tez çalışması kapsamında, harç içerisinde çelik lif kullanarak yığma duvarların sünekliğinin artırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda farklı oranlarda çelik lif içeren harçlar kullanılarak, farklı derz kalınlıkları ve farklı örgü tipleri için duvar elemanları oluşturulmuş ve bu duvar elemanları için diyagonal basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonunda, lifli harç kullanılan duvarların mekanik parametrelerinde önemli ölçüde artışlar gözlenmiş ve bu durum harç içerisinde belirli oranlarda çelik lif kullanımının duvarların mekanik parametrelerine olan faydasını göstermiştir. Ancak farklı çelik lif tipleri, farklı örgü tipleri, farklı yığma birimler, farklı harç içerikleri, farklı oranda çelik lif içeren harçlar, farklı derz kalınlıkları ve farklı duvar boyutları için bu durumun nasıl değişeceği hususunda deneysel çalışmaların yürütülmesi yararlı olacaktır.

Tez çalışmasının sonlu eleman model çözümleri kapsamında malzeme modeli olarak Drucker Prager kriteri kullanılmıştır. Bu kriter için hem mikro hem de makro model çözümlerinde deneysel sonuçlar ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Gelecek çalışmalar için, gerek bu deneysel sonuçlar gerekse yeni yapılacak deneysel çalışmalar göz önünde bulundurularak, farklı malzeme modelleri için sonlu eleman model çözümleri yapılabilir. Buna bağlı olarak, söz konusu malzeme modellerinin yığma duvarların davranışını tahmin etmede olan etkinlikleri irdelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] B. Özsayın, Boşluklu tuğla duvarların lifli polimer ile güçlendirilmesi ve davranışta harç etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [2] URL-1, (2021). <https://www.sanliurfa.bel.tr/icerik/226/30/gobeklitepe>.
- [3] Y. Hurol, H. Yüceer, Ö. Şahali, Building code challenging the ethics behind adobe architecture in North Cyprus., Science and engineering ethics. 21 (2015) 381–99. <https://doi.org/10.1007/s11948-014-9533-0>.
- [4] C. Çitiloğlu, Seismic performance assessment of confined masonry buildings, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 2016.
- [5] Z. Riahi, K.J. Elwood, S.M. Alcocer, Backbone model for confined masonry walls for performance based seismic design, Journal of Structural Engineering. 135 (2009) 644–654. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000012](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000012).
- [6] M. Yetkin, K.E. Alyamaç, Y. Calayır, Investigation of material properties of masonry units used in brick walls, International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC), Dicle University, Diyarbakır, Türkiye, 2019: ss. 6–8.
- [7] TS EN 771-1+A1, Kâgir birimler - Özellikler - Bölüm 1: Kil kâgir birimler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2015.
- [8] A.O. Kuruşçu, Yığma duvar ve temellerde doğrusal olmayan modelleme, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
- [9] Ç. Türkçü, Yapım, Mimarlar Odası İzmir Şubesi Yayınları, İzmir, 1997.
- [10] TS EN 771-1, Kâgir birimler - Özellikler - Bölüm 1: Kil kâgir birimler (Tuğlalar), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [11] TS EN 771-6+A1, Kâgir birimler - Özellikler - Bölüm 6: Doğal taş kâgir birimler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2015.
- [12] TBDY-2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2018.
- [13] TS EN 771-3 + A1, Kâgir birimler - Özellikleri - Bölüm 3: Beton kâgir birimler (Yoğun ve hafif agregalı), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2015.
- [14] TS 2510, Kargir duvarlar hesap ve yapım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1977.
- [15] TS 2717, Harç kumları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1977.
- [16] M.M. Saraç, Tarihi yığma kâgir yapıların güçlendirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
- [17] P. Yılmaz, Tarihi yapıların modellenmesi ve deprem güvenliklerinin belirlenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2006.
- [18] D.S. Demirkan, Yığma yapılarda derz kalınlığı ve duvar örme tekniğinin yapıya etkisinin anizotrop bir model üzerinde incelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.
- [19] B. Dündar, Farklı duvar ve harç malzemeleri ile üretilen duvarların mekanik özelliklerinin belirlenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [20] TS 2848, Kâgir duvar harçları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1977.
- [21] F. Greco, L. Leonetti, R. Luciano, P. Trovalusci, Multiscale failure analysis of periodic masonry structures with traditional and fiber-reinforced mortar joints, Composites Part B: Engineering. 118 (2017) 75–95. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.004>.
- [22] J.A. Thamboo, M. Dhanasekar, Nonlinear finite element modelling of high bond thin-layer mortared concrete masonry, International Journal of Masonry Research and Innovation. 1 (2016) 5–26. <https://doi.org/10.1504/IJMRL.2016.074727>.
- [23] M. Yetkin, K.E. Alyamaç, Y. Calayır, Investigation and assessment of joint mortar mixing ratios used in masonry structures, International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2019), Dicle University, Diyarbakır, Türkiye, 2019: ss. 55–63.
- [24] TS EN 1996-1-1:2005+A1, Kâgir yapıların tasarımı - Bölüm 1-1: Donatılı ve donatısız kâgir yapılar için genel kurallar (Eurocode 6), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.

- [25] N. Bayülke, Yığma yapıların deprem davranışı ve güvenliği, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Ankara, 2011: ss. 23–36.
- [26] N. Bayülke, 13 Mart 1992 Erzincan depremi raporu, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 1993.
- [27] H. Demir, Z. Polat, 30 Ekim 1983 Erzurum depremi hakkında rapor, İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, 1985.
- [28] ODTÜ, 1 Ekim 1995 Dinar depremi mühendislik raporu, İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara Şubesi, Ankara, 1995.
- [29] İTÜ, 1 Ekim 1995 Dinar Depremi Raporu, Türkiye Deprem Vakfı TDV/DR 95-002, İstanbul, 1995.
- [30] A. Doğangün, Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Turkey, Engineering Structures. 26 (2004) 841–856. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.02.005>.
- [31] A. Karaşin, E. Karaesmen, 1 Mayıs Bingöl depreminde meydana gelen yığma yapı hasarları, YDGA2005 - Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2005: ss. 90–107.
- [32] Z. Celep, A. Erken, B. Taskin, A. Ilki, Failures of masonry and concrete buildings during the March 8, 2010 Kovancılar and Palu (Elazığ) Earthquakes in Turkey, Engineering Failure Analysis. 18 (2011) 868–889. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.11.001>.
- [33] K.E. Alyamaç, E. Sayın, B. Yön, F. Çetişli, M. Karataş, A.S. Erdoğan, M. Ülker, Y. Calayır, Observations on damages at buildings in the Rural Area due to the Basyurt-Karakocan (Elazığ) Earthquake, Turkish Journal of Science & Technolog. 6 (2011) 117–128.
- [34] ODTÜ., İMO., 23 Ekim 2011 Mw 7.2 Van Depremi sismik ve yapısal hasara ilişkin saha gözlemleri, METU/EERC, Ankara, 2011.
- [35] E. Damcı, R. Temur, G. Bekdaş, B. Sayın, Damages and causes on the structures during the October 23, 2011 Van earthquake in Turkey, Case Studies in Construction Materials. 3 (2015) 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2015.10.001>.
- [36] H.H. Korkmaz, S.Z. Korkmaz, M.S. Donduren, Earthquake hazard and damage on traditional rural structures in Turkey, Natural Hazards and Earth System Sciences. 10 (2010) 605–622. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-605-2010>.
- [37] MTA, 25 Mart (Mw 5.5) ve 28 Mart (Mw 5.5) 2004 Aşkale (Erzurum) depremleri değerlendirme raporu, Maden Tetkik Arama ve Genel Müdürlüğü, Ankara, 2004.
- [38] Y. Gök, N.T. Altaş, S. Zaman, Aşkale depremleri ve etkileri, Doğu Coğrafya Dergisi. 12 (2007) 161–184.
- [39] A. Doğangün, A. Ural, Seismic performance of masonry buildings during recent earthquakes in Turkey, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008: ss. 12–17.
- [40] Ö. Ekincioglu, Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı bir optimum tasarım, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
- [41] M. Sarı, Farklı tipteki liflerin betonun mekanik davranışına etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.
- [42] C. Kızıllırmak, Statik ve darbe yükleri altında lifli betonların mekanik özelliklerinin incelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2017.
- [43] ACI 544.1R-96, State of the art report on fiber reinforced concrete, ACI Journal. 544 (2002) 1–66.
- [44] A.M. Brandt, Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering, Composite Structures. 86 (2008) 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006>.
- [45] M.Y. Yardımcı, Çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonların reolojik, mekanik, kırılma parametrelerinin araştırılması ve optimum tasarımı, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2007.
- [46] M. Açıkgeç, Çelik lif donatılı betonların tasarımı için grafik tabanlı bir yaklaşım, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2015.
- [47] ACI 544.5R-10, Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete, American Concrete Institute, 2010.
- [48] M. Kozak, Beton travers üretiminde agrega türü (bazaltkalker) ve çelik lifin kullanılabilirliğinin araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2010.

- [49] A. Bentur, S. Mindess, *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, CRC Press, London, 2006. <https://doi.org/10.1201/9781482267747>.
- [50] ACI 544.3R-93, Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete, *ACI Journal*. 90 (1998) 94–103.
- [51] E. Güngör, Karma lifli betonların özelliklerinin deneysel irdelenmesi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2013.
- [52] M.A. Taşdemir, Ö. Şengül, C. Şengül, Çelik tel donatılı betonların mekanik davranışı, İston Teknik Rapor, İTÜ, 2013.
- [53] URL-2, (2021). <http://steelfibers.eu/steelfibers>.
- [54] L.R. Betterman, C. Ouyang, S.P. Shah, Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar, *Advanced Cement Based Materials*. 2 (1995) 53–61. [https://doi.org/10.1016/1065-7355\(95\)90025-X](https://doi.org/10.1016/1065-7355(95)90025-X).
- [55] H. Yaprak, O. Şimşek, A. Öneş, Cam ve çelik liflerin bazı beton özelliklerine etkisi, *Politeknik Dergisi*. 7 (2004) 353–358.
- [56] Ö. Eren, K. Marar, Effects of limestone crusher dust and steel fibers on concrete, *Construction and Building Materials*. 23 (2009) 981–988. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.014>.
- [57] P.C. Tatnall, Fiber-reinforced concrete, J.F. Lamond, J.H. Pielert (Ed.), *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials STP 169D*, ASTM, USA, 2006: ss. 578–590.
- [58] V. Berbergil, Kendiliğinden yerleşen betonlarda çelik lif kullanımının işlenebilirliğe etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [59] O.A. Abaza, Z.S. Hussein, Flexural behavior of flat-end steel-fiber-reinforced concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*. 26 (2014) 04014034. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001015](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001015).
- [60] F. Köksal, F. Altun, İ. Yiğit, Y. Şahin, Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes, *Construction and Building Materials*. 22 (2008) 1874–1880. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.017>.
- [61] T. Uygunoğlu, Effect of fiber type and content on bleeding of steel fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*. 25 (2011) 766–772. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.008>.
- [62] J. Gao, W. Sun, K. Morino, Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete, *Cement and Concrete Composites*. 19 (1997) 307–313. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(97\)00023-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00023-1).
- [63] I. Lee, Complete stress-strain characteristics of high performance concrete, Department of Civil and Environmental Engineering, New Jersey Institute of Technology, USA, 2002.
- [64] Z. Wu, C. Shi, W. He, L. Wu, Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete, *Construction and Building Materials*. 103 (2016) 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.028>.
- [65] P.. Song, S. Hwang, Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*. 18 (2004) 669–673. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027>.
- [66] İ. Sekban, Çelik lif katkısının tekrarlı yük etkisindeki geleneksel ve yüksek performanslı betonarme kolonların davranışlarına etkisinin incelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2007.
- [67] G. Camps, A. Turatsinze, A. Sellier, G. Escadeillas, X. Bourbon, Steel-fibre-reinforcement and hydration coupled effects on concrete tensile behaviour, *Engineering Fracture Mechanics*. 75 (2008) 5207–5216. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.08.008>.
- [68] S.C. Lee, J.Y. Cho, F.J. Vecchio, Diverse embedment model for steel fiber-reinforced concrete in tension: model development, *ACI Materials Journal*. 108 (2011) 516–525.
- [69] S.T. Kang, H.W. Cho, J.H. Lee, D.J. Kim, Improvement in tensile performance of steel fiber reinforced high strength concrete: influence of fiber shape and sand to aggregate ratio, 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS), Politecnico Milano, Italy, 2012: ss. 3258–3263.
- [70] M. Tokyay, K. Ramyar, L. Turanlı, Polipropilen ve çelik lifli yüksek dayanımlı betonların basınç ve çekme yükleri altındaki davranışları, 2. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 1991: ss. 303–311.

- [71] C. Sevil, Uçucu küllü, lifli beton kompozitinde lif tipinin beton özelliklerine etkisi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2001.
- [72] O. Kayali, M. Haque, B. Zhu, Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*. 25 (2003) 207–213. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00016-1).
- [73] B. Ünal, F. Köksal, C. Eyyubov, Polipropilen ve çelik liflerin betonun donma-çözülme ve aşınma dirençlerine ortak etkisi, 5. Ulusal Beton Kongresi (Betonun Dayanıklılığı), İstanbul, 2003: ss. 345–354.
- [74] Ş. Yazıcı, H.Ş. Arel, V. Tabak, The effects of impact loading on the mechanical properties of the SFRCs, *Construction and Building Materials*. 41 (2013) 68–72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.095>.
- [75] S. Aydın, Effects of fiber strength on fracture characteristics of normal and high strength concrete, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 57 (2013) 191–200. <https://doi.org/10.3311/PPci.7174>.
- [76] T.S. Lok, J.R. Xiao, Flexural Strength Assessment of Steel Fiber Reinforced Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*. 11 (1999) 188–196. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:3\(188\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:3(188)).
- [77] S.P. Shah, B.V. Rangan, Fiber reinforced concrete properties, *ACI Journal Proceedings*. 68 (1971) 126–135.
- [78] M.N. Soutsos, T.T. Le, A.P. Lampropoulos, Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres, *Construction and Building Materials*. 36 (2012) 704–710. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.042>.
- [79] A.R. Khaloo, M. Afshari, Flexural behaviour of small steel fibre reinforced concrete slabs, *Cement and Concrete Composites*. 27 (2005) 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.03.004>.
- [80] P.B. Cachim, J.A. Figueiras, P.A. Pereira, Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression, *Cement and Concrete Composites*. 24 (2002) 211–217. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00019-1).
- [81] A. Parvez, S.J. Foster, Fatigue behavior of steel-fiber-reinforced concrete beams, *Journal of Structural Engineering*. 141 (2015) 04014117. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001074](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001074).
- [82] A. Arslan, Mixed-mode fracture performance of fibre reinforced concrete under impact loading, *Materials and Structures*. 28 (1995) 473–478. <https://doi.org/10.1007/BF02473167>.
- [83] W. Suaris, S.P. Shah, Strain-rate effects in fibre-reinforced concrete subjected to impact and impulsive loading, *Composites*. 13 (1982) 153–159. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(82\)90052-0](https://doi.org/10.1016/0010-4361(82)90052-0).
- [84] X.X. Zhang, G. Ruiz, R.C. Yu, M. Tarifa, Fracture behaviour of high-strength concrete at a wide range of loading rates, *International Journal of Impact Engineering*. 36 (2009) 1204–1209. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.04.007>.
- [85] A.N. Dancygier, A. Katz, M.Y. Yardimci, D.Z. Yankelevsky, Behavior of high ductility cement composite beams under low impact, *International Journal of Protective Structures*. 3 (2012) 177–191. <https://doi.org/10.1260/2041-4196.3.2.177>.
- [86] X.X. Zhang, A.M. Abd Elazim, G. Ruiz, R.C. Yu, Fracture behaviour of steel fibre-reinforced concrete at a wide range of loading rates, *International Journal of Impact Engineering*. 71 (2014) 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.04.009>.
- [87] E.K. Horszczaruk, Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete, *Wear*. 267 (2009) 110–115. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.11.010>.
- [88] E.K. Schrader, A. V. Munch, Fibrous Concrete Repair of Cavitation Damage, *Journal of the Construction Division*. 102 (1976) 385–399. <https://doi.org/10.1061/JCCEAZ.0000614>.
- [89] ASTM 1018-97, Standart test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete, American Society for Testing and Materials (ASTM), USA, 1997.
- [90] TS 10515, Beton-Çelik Tel Takviyeli-Eğilme Mukavemeti Deney Metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1992.
- [91] M. Aral, Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı-bir optimum tasarımı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [92] C.D. Atış, O. Karahan, Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete, *Construction and Building Materials*. 23 (2009) 392–399. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.002>.

- [93] Y. Ding, W. Kusterle, Compressive stress-strain relationship of steel fibre-reinforced concrete at early age, *Cement and Concrete Research*. 30 (2000) 1573–1579. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00348-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00348-3).
- [94] X. Luo, W. Sun, S.Y.. Chan, Characteristics of high-performance steel fiber-reinforced concrete subject to high velocity impact, *Cement and Concrete Research*. 30 (2000) 907–914. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00255-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00255-6).
- [95] F. Altun, D.M. Özcan, M. Vekli, T. Haktanır, Çelik lif katkılı betonarme kirişlerin taşıma gücünün deneysel incelenmesi, *ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 2002: ss. 205–212.
- [96] F. Çivici, Çelik lif donatılı betonun eğilme tokluğu, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 12 (2006) 183–188. file:///C:/Users/MELTEM/Desktop/literatür/ÇELİK LİF DONATILI BETONUN EĞİLME TOKLUĞU _ ÇİVİCİ _ Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi.html.
- [97] B. Aktaş, Çelik lifli hafif beton ile imal edilmiş betonarme kirişlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri*, 2007.
- [98] O. Ünal, T. Uygunoğlu, O. Gençel, Çelik liflerin beton basınç ve eğilme özelliklerine etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 13 (2007) 23–30. <https://doi.org/10.1080/026782997208901>.
- [99] E. Salami, Çelik liflerin farklı dayanıma sahip betonların mekanik özelliklerine etkisinin deneysel olarak incelenmesi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon*, 2009.
- [100] M. Nili, V. Afroughsabet, Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete, *International Journal of Impact Engineering*. 37 (2010) 879–886. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.03.004>.
- [101] M.A. Çakıroğlu, S. Kasap, E. Erenoğlu, Betona Değişik Geometrik Formlarda Çelik Lif Eklenmesinin Basınç Dayanımına Etkisi, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, 2011: ss. 96–100.
- [102] M. Ramli, E. Dawood, High-strength flowable mortar reinforced by steel fiber, *Slovak Journal of Civil Engineering*. 19 (2011) 10–16. <https://doi.org/10.2478/v10189-011-0013-0>.
- [103] L. Nguyen-Minh, M. Rovňák, T. Tran-Ngoc, T. Le-Phuoc, Punching shear resistance of post-tensioned steel fiber reinforced concrete flat plates, *Engineering Structures*. 45 (2012) 324–337. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.027>.
- [104] C. Çakır, Makrosentetik ve çelik lif donatılı betonların mekanik davranışı, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, 2013.
- [105] S. İpek, Improving the ductility properties of lightweight concretes by steel fiber addition, *University of Gaziantep Graduate School of Natural & Applied Sciences, Gaziantep*, 2013.
- [106] M. Kozak, O. Ünal, Bazalt agregası ile üretilen beton traversite çelik lifin kullanılabilirliğinin araştırılması, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 18 (2014) 15–21.
- [107] A.A.G.A. Abdussalam, Compressive and tensile behaviors of steel fiber reinforced concrete, *The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Atılım University*, 2015.
- [108] M.H. Arslan, G. Doğan, K. Dabanlı, M. Özdemir, H. Divarçı, Beton içinde çelik tel kullanarak betonarme binaların deprem performansının artırılması, *Selçuk University Journal of Engineering, Science and Technology*. 1 (2015) 1–11. <https://doi.org/10.15317/Scitech.2015310832>.
- [109] D. Hamzaçebi, Atık çelik liflerin betonun mekanik özelliklerine etkisi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, 2015.
- [110] S.-C. Lee, J.-H. Oh, J.-Y. Cho, Compressive behavior of fiber-reinforced concrete with end-hooked steel fibers, *Materials*. 8 (2015) 1442–1458. <https://doi.org/10.3390/ma8041442>.
- [111] H. Bozkurt, C. Karakurt, Çelik lif katkılı beton yol kaplamalarının özellikleri, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 4 (2016) 617–624. <https://doi.org/10.1080/01402382.2011.648007>.
- [112] K. Türker, T. Birol, A. Yavaş, U. Hasgöl, Ultra yüksek performanslı lifli beton içeren kirişlerde etkin çelik lif tipi incelemesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 16 (2016) 776–785. <https://doi.org/10.5578/fmbd.39342>.
- [113] F. Korkut, Z.F. Türkmenoğlu, R.B. Taymuş, S. Güler, Çelik ve sentetik liflerin kendiliğinden yerleşen betonların taze ve mekanik özellikleri üzerine etkisi, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 6 (2017) 560–570. <https://doi.org/10.2312/tjes.v21i1.452>.

- [114] M. Karagöz, Farklı agregalara sahip lifsiz ve çelik fiber takviyeli harçların aşınma direnci ve mukavemet özellikleri, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.
- [115] D. Alterman, A.W. Page, Bond characteristics of fibre reinforced mortar in masonry using image analysis, C. Modena, F. da Porto, M.R. Valluzzi (Ed.), The 16th International Brick and Block Masonry Conference (IBMAC 2016), Taylor & Francis Group, Padova, Italy, 2016: ss. 357–363.
- [116] ASTM E519/ E519M, Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages, West Conshohocken, PA, 2010.
- [117] RILEM LUM-B6, Diagonal tensile strength tests of small wall specimens, RILEM recommendations for the testing and use of constructions materials, 1991.
- [118] M. İspir, A comprehensive experimental research on the behavior of historical brick masonry walls of 19th century buildings, Istanbul Technical University, Institute of The Graduate School of Science and Technology, Istanbul, 2010.
- [119] G. Erol, Yüksek mukavemetli özel tuğlalardan yapılmış duvarlarda kayma dayanımı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.
- [120] A. Gabor, E. Ferrier, E. Jacquelin, P. Hamelin, Analysis and modelling of the in-plane shear behaviour of hollow brick masonry panels, Construction and Building Materials. 20 (2006) 308–321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.032>.
- [121] M.S. Döndüren, Bağlayıcı özelliği artırılan duvar ve sıva harcının düzlem dışı yüklenen tuğla duvarların mekaniksel davranışına etkisi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2008.
- [122] A. İlki, M. İspir, F. As, C. Demir, N. Kumbasar, Frp retrofit of walls constructed with historical bricks, Torres Marques et al. (Ed.), CCC2008-Challenges for Civil Construction, FEUP, Porto, 2008: ss. 1–12.
- [123] E. Yılmaz, Boşluklu tuğla ile örülmüş yığma duvarların LP kompozitler ile güçlendirilmesi ve davranışta boyut etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [124] V. Alecci, M. Fagone, T. Rotunno, M. De Stefano, Shear strength of brick masonry walls assembled with different types of mortar, Construction and Building Materials. 40 (2013) 1038–1045. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.107>.
- [125] H. Basaran, A. Demir, M. Bagci, Investigating the behaviour of plaster mortared rural masonry walls, 2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, BCCCE, Epoka University, Tirana, Albania, 2013.
- [126] A.B. Çobanoğlu, Investigation of material properties for the Turkish masonry buildings, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 2014.
- [127] M.N. Atay, Tuğla dolgu duvarların plastik atık malzeme, lifli polipropilen ve geogrid ile güçlendirilmesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye, 2017.
- [128] C. Shermi, R.N. Dubey, In-plane behaviour of unreinforced masonry panel strengthened with welded wire mesh and mortar, Construction and Building Materials. 178 (2018) 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.081>.
- [129] P.E. Mezrea, M. İspir, I.A. Balci, I.E. Bal, A. İlki, Diagonal tensile tests on historical brick masonry wallets strengthened with fabric reinforced cementitious mortar, Structures. 33 (2021) 935–946. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.076>.
- [130] A. Buyukkaragoz, Y. Koprman, In-plane behaviour of masonry brick walls strengthened with mortar from two sides, Structures. 29 (2021) 1627–1639. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.029>.
- [131] X. Wang, C.C. Lam, V.P. Iu, Experimental investigation of in-plane shear behaviour of grey clay brick masonry panels strengthened with SRG, Engineering Structures. 162 (2018) 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.027>.
- [132] E. Köksal, H.O. Köksal, H. Yıldırım, Eksenel basınç altında beton briket yığma prizmaların sonlu eleman analizi, İMO Teknik Dergi. 15 (2004) 3249–3265. <https://doi.org/10.18400/td.25103>.
- [133] Ç. Kaya, Yığma duvarların elastik-plastik hesabı, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [134] M. İnan, Cisimlerin mukavemeti, İTÜ Vakfı, 2001.
- [135] W.F. Chen, D.J. Han, Plasticity for Structural Engineers, Springer New York, New York, NY, 1988. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3864-5>.

- [136] D.C. Drucker, W. Prager, Soil mechanics and plastic analysis or limit design, *Quarterly of Applied Mathematics*. 10 (1952) 157–165.
- [137] L.R. Alejano, A. Bobet, Drucker-Prager criterion, *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 45 (2012) 995–999. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0278-2>.
- [138] M.H. Yu, Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th century, *Applied Mechanics Reviews*. 55 (2002) 169–218. <https://doi.org/10.1115/1.1472455>.
- [139] K.F. Abdulla, L.S. Cunningham, M. Gillie, Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach, *Engineering Structures*. 151 (2017) 349–365. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.021>.
- [140] J. Seville, C.Y. Wu, Finite element modeling, *Particle Technology and Engineering*, Elsevier Ltd, 2016: ss. 243–277. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098337-0.00010-2>.
- [141] A. Anandarajah, The Drucker–Prager model and its integration, *Computational Methods in Elasticity and Plasticity: Solids and Porous Media*, 1. baskı, Springer, New York, NY, 2010: ss. 513–560. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6379-6_13.
- [142] R. van der Pluijm, Out-of-plane bending of masonry behaviour and strength, Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 1999. <https://doi.org/10.6100/IR528212>.
- [143] P.B. Lourenço, J.O. Barros, J.T. Oliveira, Shear testing of stack bonded masonry, *Construction and Building Materials*. 18 (2004) 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.08.018>.
- [144] M. Betti, A. Vignoli, Modelling and analysis of a Romanesque church under earthquake loading: Assessment of seismic resistance, *Engineering Structures*. 30 (2008) 352–367. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.03.027>.
- [145] A. Zucchini, P.B. Lourenço, A micro-mechanical homogenisation model for masonry: Application to shear walls, *International Journal of Solids and Structures*. 46 (2009) 871–886. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.09.034>.
- [146] P. Roca, G. Araiza, Shear response of brick masonry small assemblages strengthened with bonded FRP laminates for in-plane reinforcement, *Construction and Building Materials*. 24 (2010) 1372–1384. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.005>.
- [147] M. Betti, M. Orlando, A. Vignoli, Static behaviour of an Italian Medieval Castle: Damage assessment by numerical modelling, *Computers & Structures*. 89 (2011) 1956–1970. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.05.022>.
- [148] M. Betti, A. Vignoli, Numerical assessment of the static and seismic behaviour of the basilica of Santa Maria all’Impruneta (Italy), *Construction and Building Materials*. 25 (2011) 4308–4324. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.028>.
- [149] M. Betti, L. Galano, Seismic analysis of historic masonry buildings: The Vicarious palace in Pescia (Italy), *Buildings*. 2 (2012) 63–82. <https://doi.org/10.3390/buildings2020063>.
- [150] M. Angelillo, P.B. Lourenço, G. Milani, Masonry behaviour and modelling, M. Angelillo (Ed.), *Mechanics of Masonry Structures*, 1. baskı, Springer, Vienna, 2014: ss. 1–26. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1774-3_1.
- [151] R. Lumantarna, D.T. Biggs, J.M. Ingham, Compressive, flexural bond, and shear bond strengths of in situ New Zealand unreinforced clay brick masonry constructed using lime mortar between the 1880s and 1940s, *Journal of Materials in Civil Engineering*. 26 (2014) 559–566. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000685](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000685).
- [152] A. Rahman, T. Ueda, Experimental investigation and numerical modeling of peak shear stress of brick masonry mortar joint under compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*. 26 (2014) 04014061. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000958](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000958).
- [153] M. Betti, L. Galano, M. Petracchi, A. Vignoli, Diagonal cracking shear strength of unreinforced masonry panels: a correction proposal of the b shape factor, *Bulletin of Earthquake Engineering*. 13 (2015) 3151–3186. <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9756-8>.
- [154] C. Costa, A. Arêde, M. Morais, A. Aníbal, Detailed FE and de Modelling of Stone Masonry Arch Bridges for the Assessment of Load-carrying Capacity, *Procedia Engineering*. 114 (2015) 854–861. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.039>.
- [155] I. Fayala, O. Limam, I. Stefanou, Experimental and numerical analysis of reinforced stone block masonry beams using GFRP reinforcement, *Composite Structures*. 152 (2016) 994–1006. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.06.046>.

- [156] P. Pineda, Collapse and upgrading mechanisms associated to the structural materials of a deteriorated masonry tower. Nonlinear assessment under different damage and loading levels, *Engineering Failure Analysis*. 63 (2016) 72–93. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.02.013>.
- [157] J. Fourie, Characterisation and evaluation of the mechanical properties of alternative masonry units, Faculty of Engineering, Stellenbosch University, South Africa, 2017. <https://scholar.sun.ac.za>.
- [158] J.F. Lizárraga, J.J. Pérez-Gavilán, Parameter estimation for nonlinear analysis of multi-perforated concrete masonry walls, *Construction and Building Materials*. 141 (2017) 353–365. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.008>.
- [159] C. Sandoval, O. Arnau, Experimental characterization and detailed micro-modeling of multi-perforated clay brick masonry structural response, *Materials and Structures*. 50 (2017) 1–17. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0888-3>.
- [160] A. Rahgozar, A. Hosseini, Experimental and numerical assessment of in-plane monotonic response of ancient mortar brick masonry, *Construction and Building Materials*. 155 (2017) 892–909. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.079>.
- [161] B. Peng, D. Wang, G. Zong, Y. Zhang, Homogenization strategy for brick masonry walls under in-plane loading, *Construction and Building Materials*. 163 (2018) 656–667. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.133>.
- [162] G. Andreotti, F. Graziotti, G. Magenes, Expansion of mortar joints in direct shear tests of masonry samples: implications on shear strength and experimental characterization of dilatancy, *Materials and Structures*. 52 (2019) 1–16. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1366-5>.
- [163] N.A. Resketi, V. Toufigh, Enhancement of brick-mortar shear bond strength using environmental friendly mortars, *Construction and Building Materials*. 195 (2019) 28–40. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.118>.
- [164] H.A. Khan, R.P. Nanda, Out-of-plane bending of masonry wallette strengthened with geosynthetic, *Construction and Building Materials*. 231 (2020) 117198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117198>.
- [165] J.M. Leal-Graciano, B. Quiñónez, H.E. Rodríguez-Lozoya, J.J. Pérez-Gavilán, J.F. Lizárraga-Pereda, Use of GFRP as retrofit alternative for confined masonry walls with window opening subjected to in-plane lateral load, *Engineering Structures*. 223 (2020) 111148. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111148>.
- [166] A. Thakur, K. Senthil, A.P. Singh, M.A. Iqbal, Prediction of dynamic amplification factor on clay brick masonry assemblage, *Structures*. 27 (2020) 673–686. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.06.009>.
- [167] TS EN 772-16, Kâgir birimler - Deney yöntemleri - Bölüm 16: Boyutların tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [168] TS EN 772-3, Kâgir birimler- Deney metotları- Bölüm 3: Kıl kâgir birimlerin net hacmi ve boşluk yüzdesinin su içerisinde tartma metoduyla tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [169] TS EN 772-13, Kâgir birimler - Deney metotları - Bölüm 13: Kâgir birimlerin net ve brüt kuru birim hacim kütlelerin tayini (doğal taş hariç), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [170] TS EN 772-1+A1, Kâgir birimler - Deney yöntemleri - Bölüm 1: Basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2015.
- [171] TS EN 933-1, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [172] TS 706 EN 12620+A1, Beton agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [173] TS EN 14889-1, Lifler – Betonda kullanım için – Bölüm 1: Çelik lifler – Tarifler, özellikler ve uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2006.
- [174] ANSYS User's Manual Version 19R1, Swanson Analysis Systems Inc. Houston, (2019).
- [175] P.B. Lourenço, G. Vasconcelos, L. Ramos, Assessment of the Stability Conditions of a Cistercian Cloister, *Second International Congress of Studies in Ancient Structures*. (2001) 669–678.
- [176] D. Addessi, S. Marfia, E. Sacco, J. Toti, Send Orders for Reprints to reprints@benthamscience.net Modeling Approaches for Masonry Structures, *The Open Civil Engineering Journal*. 8 (2014) 288–300.
- [177] G. Hamdy, O. Kamal, O. Al-Hariri, T. El-Salakawy, Plane and vaulted masonry elements strengthened by different techniques – Testing, numerical modeling and nonlinear analysis, *Journal*

- of Building Engineering. 15 (2018) 203–217. <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.11.009>.
- [178] C.L. Knox, D. Dizhur, J.M. Ingham, Experimental study on scale effects in clay brick masonry prisms and wall panels investigating compression and shear related properties, *Construction and Building Materials*. 163 (2018) 706–713. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.149>.
- [179] M. Basili, F. Vestroni, G. Marcari, Brick masonry panels strengthened with textile reinforced mortar: experimentation and numerical analysis, *Construction and Building Materials*. 227 (2019) 117061. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117061>.
- [180] M. Shabdin, M. Zargar, N.K.A. Attari, Experimental diagonal tension (shear) test of Un-Reinforced Masonry (URM) walls strengthened with textile reinforced mortar (TRM), *Construction and Building Materials*. 164 (2018) 704–715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.234>.
- [181] S. Zhang, S.M. Taheri Mousavi, N. Richart, J.F. Molinari, K. Beyer, Micro-mechanical finite element modeling of diagonal compression test for historical stone masonry structure, *International Journal of Solids and Structures*. 112 (2017) 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.02.014>.
- [182] V. Singhal, D.C. Rai, Suitability of half-scale burnt clay bricks for shake table tests on masonry walls, *Journal of Materials in Civil Engineering*. 26 (2014) 644–657. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000861](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000861).



EKLER

EK- 1: DİYAGONAL BASINÇ TESTLERİ İÇİN DUVARLARDA OLUŞAN HASARLAR

Bu bölümde, duvar elemanlarında diyagonal basınç yüklemesi için oluşan hasarlara ait görseller verilmiştir.



Şekil E1.1. D1L1O1 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.2. D1L1O2 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.3. D1L1O3 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.4. D1L2O1 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.5. D1L2O2 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.6. D1L2O3 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.7. D1L3O1 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.8. D1L3O2 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.9. D1L3O3 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.10. D1NHO1 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.11. DINHO2 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.12. D1NH03 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.13. D2L1O1 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.14. D2L1O2 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.15. D2L1O3 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.16. D2L2O1 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.17. D2L2O2 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.18. D2L2O3 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.19. D2L3O1 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.20. D2L3O2 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.21. D2L3O3 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.22. D2NHO1 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.23. D2NHO2 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.24. D2NHO3 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.25. D3L1O1 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.26. D3L1O2 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.27. D3L1O3 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.28. D3L2O1 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.29. D3L2O2 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.30. D3L2O3 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.31. D3L3O1 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.32. D3L3O2 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.33. D3L3O3 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları



Şekil E1.34. D3NHO1 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları

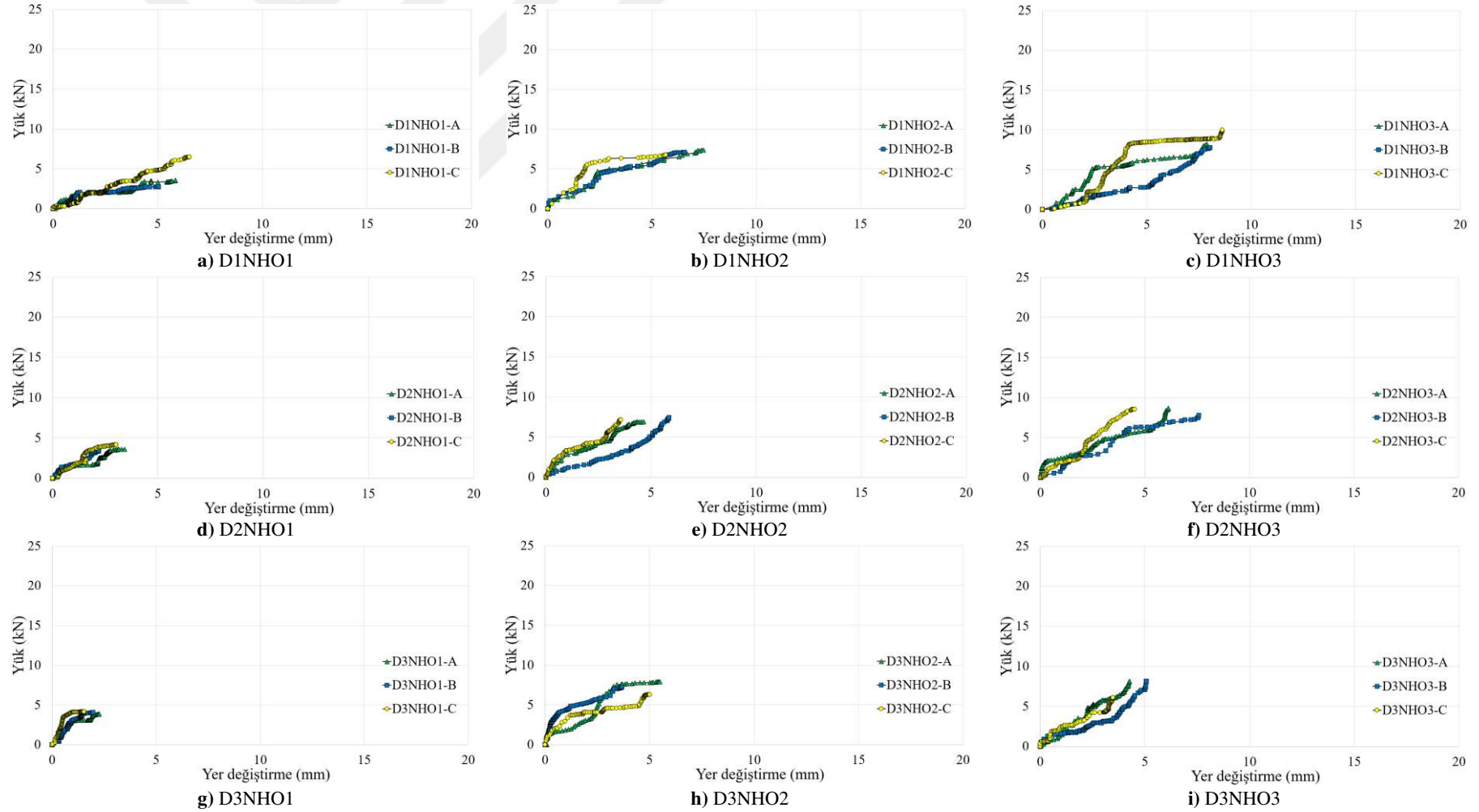


Şekil E1.35. D3NHO2 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları

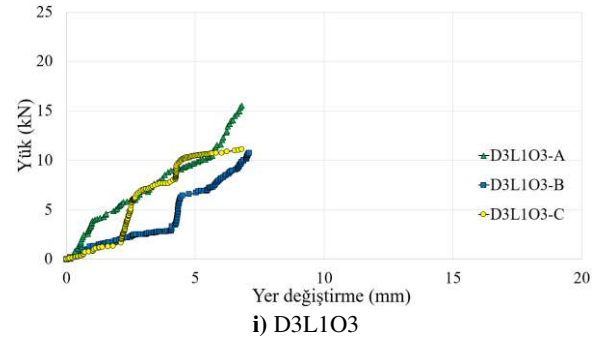
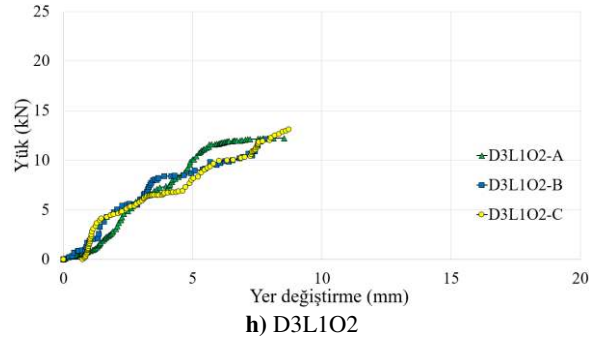
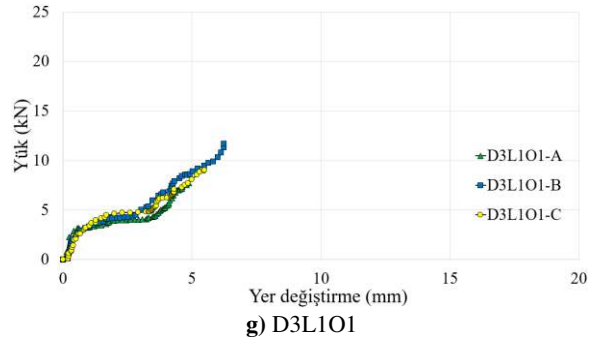
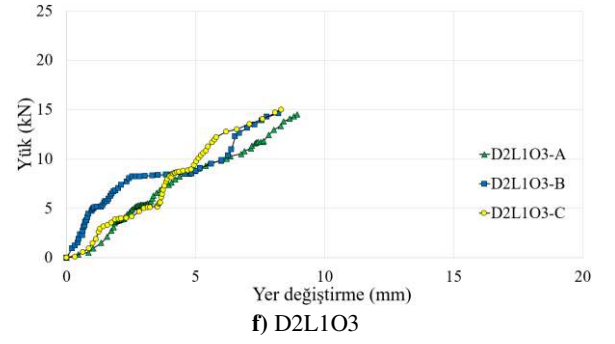
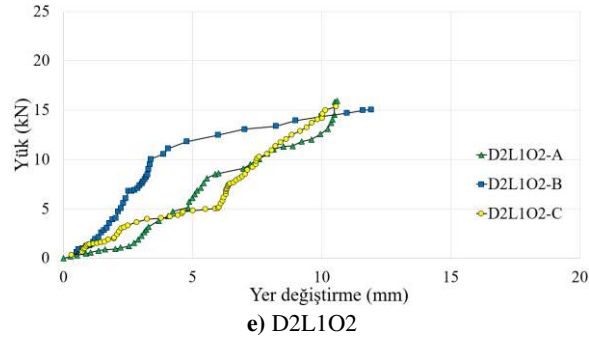
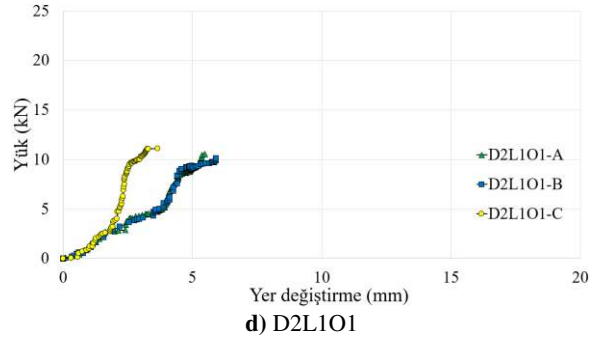
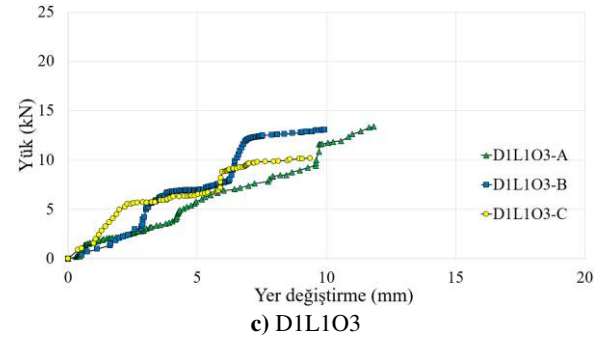
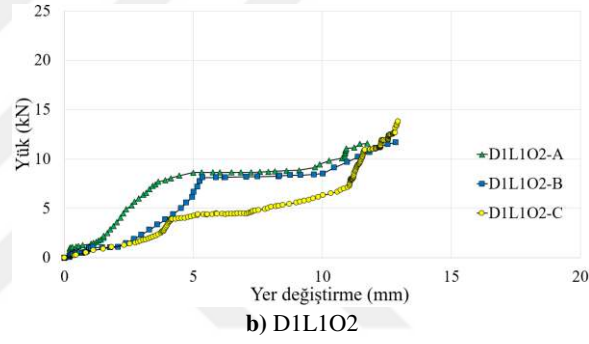
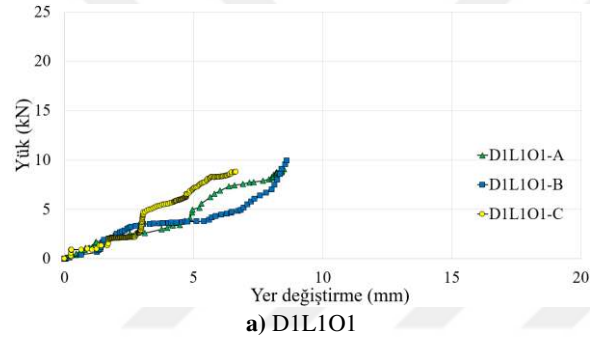


Şekil E1.36. D3NHO3 tip duvarlara ait hasar fotoğrafları

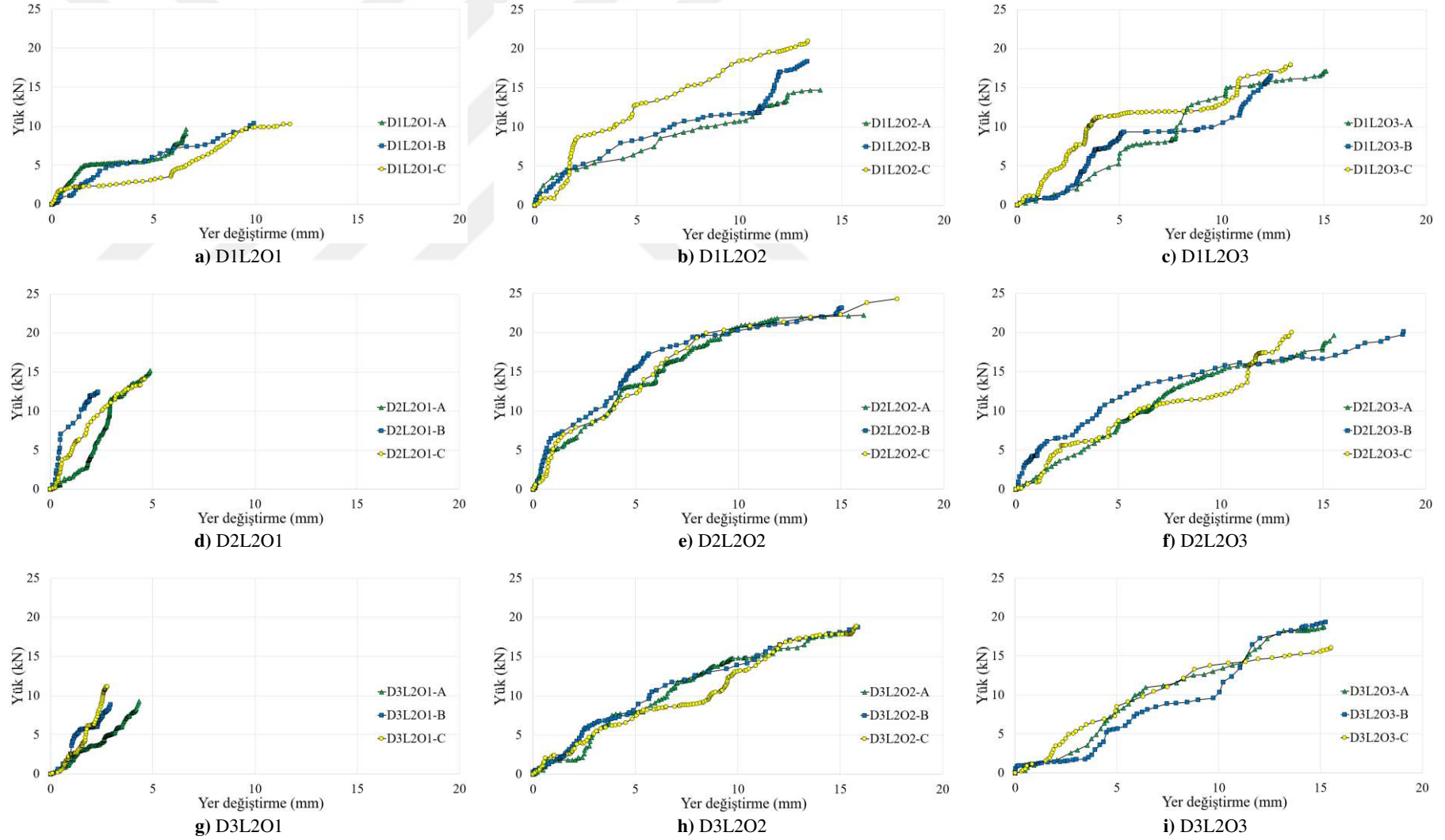
EK- 2: DUVAR ELEMANLARI İÇİN YÜK-YER DEĞİŞTİRME EĞRİLERİ



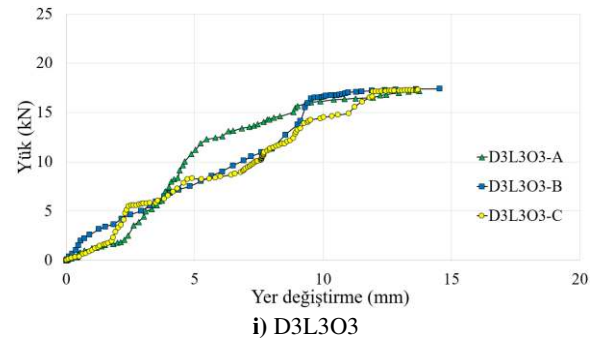
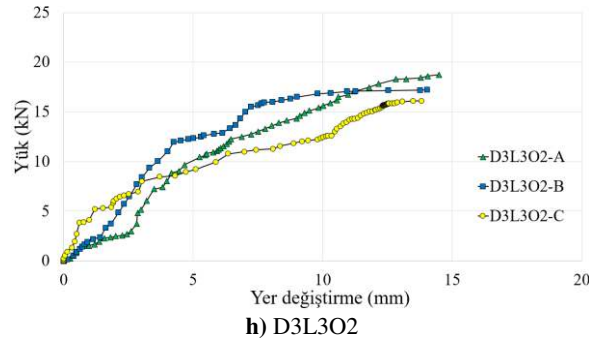
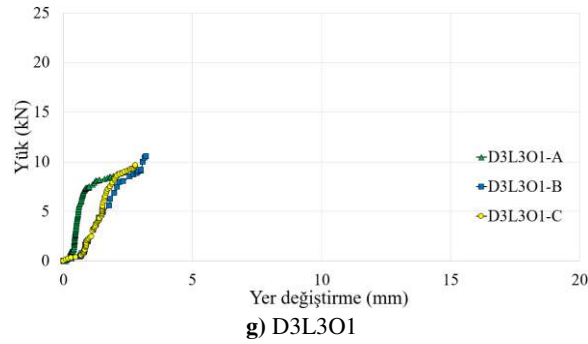
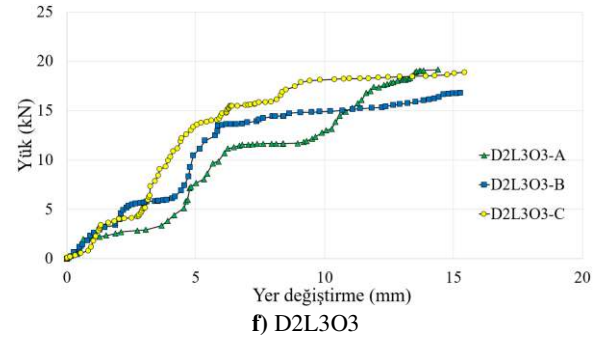
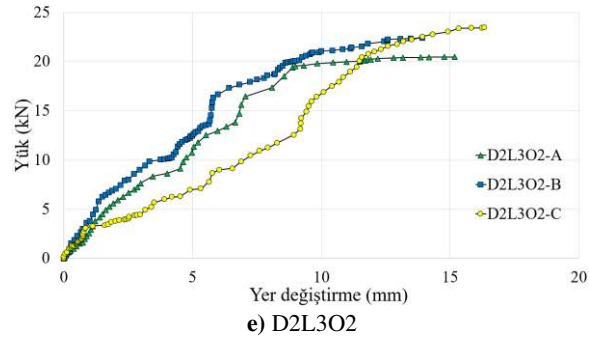
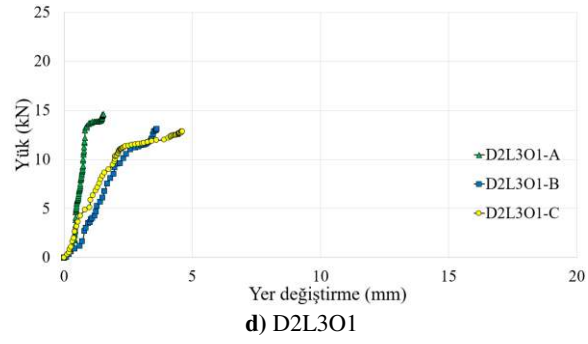
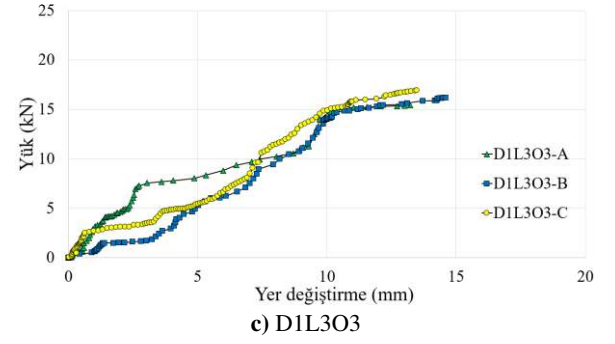
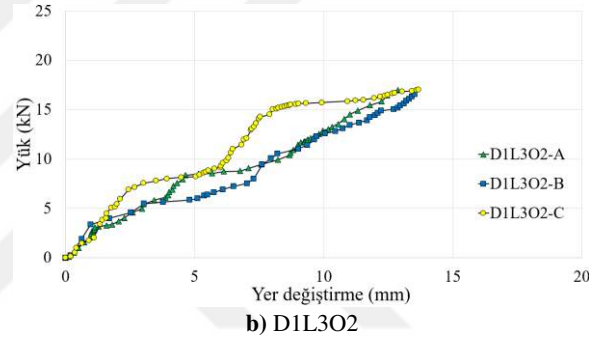
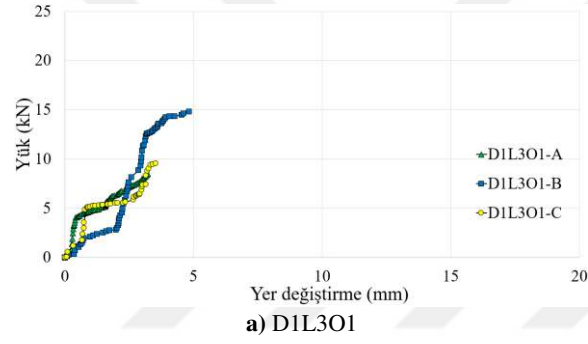
Şekil E2.1. Lifsiz harç (NH) kullanılarak oluşturulan duvar elemanları için elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri



Şekil E2.2. Ağırlıkça %1 oranında mikro çelik lif içeren harç (L1) kullanılarak oluşturulan duvar elemanları için elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri



Şekil E2.3. Ağırlıkça %2 oranında mikro çelik lif içeren harç (L2) kullanılarak oluşturulan duvar elemanları için elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri



şekil E2.4. Ağırlıkça %3 oranında mikro elik lif içeren harç (L3) kullanılarak oluşturulan duvar elemanları için elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri

ÖZGEÇMİŞ

Musa YETKİN

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] | [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. **Yetkin, M.,** Erkek, H., and Calayır, Y., 2018. Determining dynamic characteristics of reinforced concrete minarets and updating of their finite element models using environmental vibration data, *Firat University Turkish Journal of Science & Technology*, 13(1), pp. 93-98.
2. **Yetkin, M.,** Calayır, Y., Sayın E., and Karaton, M., 2018. Nonlinear Seismic Behavior of A Historical Dam For Different Soil Groups, *Sigma J Eng & Nat Sci* 36(4), pp. 1009-1022.
3. **Yetkin, M.,** Erkek, H., Calayır, Y., 2021. Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Referanslı ve Referanssız Ölçümlerin Karşılaştırılması: Bir Minare Örneği, İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(3): pp. 2069-2078.
<https://doi.org/10.21597/jist.778875>
4. **Yetkin, M.,** Dedeoğlu, İ.Ö., Calayır, Y., 2021. 24 Ocak 2020 Sivrice Depremi Sonrasında Elazığ İlinde Bulunan Minarelerde Meydana Gelen Hasarların Araştırılması ve Değerlendirilmesi, *Firat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(2): pp. 379-389.
<https://doi.org/10.35234/fumbd.838261>
5. Calayır, Y., **Yetkin, M.,** Erkek, H. 2021. Finite Element Model Updating of Masonry Minarets by Using Operational Modal Analysis Method, In *Structures*, Vol. 34, pp. 3501-3507. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.103>.

Bildiriler:

1. Calayır, Y., Karaton, M., ve **Yetkin, M.**, 2014. Tarihi Sultan Mahmut Bendinin Lineer Olmayan Sismik Analizi, *Uluslararası Katılımlı IV. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu*, Elazığ, 9-11 Ekim, s. 841-852
2. Calayır, Y., **Yetkin, M.**, Karaton, M., ve Sayın E., 2015. Tarihi Sultan Mahmut Bendinin Doğrusal Olmayan Sismik Davranışına Zemin Esnekliğinin Etkisi, Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 11-15 Mayıs, s. 1493-1505.
3. **Yetkin, M.**, Calayır, Y., ve Erkek, H., 2016. Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi ve Sonlu Eleman Modellerinin Güncelleştirilmesi, International Symposium on Natural Hazards and Hazard Management (Uluslararası Doğal Afetler ve Afet Yönetimi Sempozyumu - DAAYS'16), Karabük Üniversitesi, Karabük, 2-4 Mart, s. 133-138.
4. **Yetkin, M.**, Erkek, H., and Calayır, Y., 2017. Determining dynamic characteristics of reinforced concrete minarets and updating of their finite element models using environmental vibration data, International Conference on Advances and Innovations in Engineering (ICAIE), Fırat University, Elazığ, 10-12 May, pp. 760-764.
5. **Yetkin, M.**, Alyamaç, K.E., and Calayır, Y., 2019. Investigation and Assessment of Joint Mortar Mixing Ratios Used in Masonry Structures, International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2019), Dicle University, Diyarbakır, 06-08 November, pp. 55-63.
6. **Yetkin, M.**, Alyamaç, K.E., and Calayır, Y., 2019. Investigation of Material Properties of Masonry Units Used in Brick Walls, International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2019), Dicle University, Diyarbakır, 06-08 November, pp. 92-98.
7. **Yetkin, M.**, Calayır, Y., and Alyamaç, K.E., 2020. The effect of using steel fiber in joint mortar on the failure behavior of masonry walls, 2. International ICONTECH SYMPOSIUM on Innovative Surveys in Positive Sciences, Tomori Pal College, Budapest, Hungary, 23-26 September, pp. 187-198.
8. Erkek, H., Calayır, Y., and **Yetkin, M.**, 2021. Experimental determination of the dynamic characteristics of the Adana Great Clock Tower, Al-Farabi International Congress on Applied Sciences – II, Nakhchivan" University, Azerbaijan, May 2-4, 2021, pp. 92-99.
9. **Yetkin, M.**, Erkek, H., and Calayır, Y., 2021. Model updating of a reinforced concrete minaret by using ambient vibration tests, 9th Turkish Conference on Earthquake Engineering (9TCEE), Istanbul, Turkey, June 2-3, 2021, pp. 459-467.

Projeler:

1. FÜBAP - MF.19.13, Tarihi Yığma Yapıların Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Dinamik Davranışının İncelenmesi, Araştırmacı, 2019-2021.
2. FÜBAP - MF.19.20, Donatısız Yığma Duvar Elemanlarının Sünekliğine Çelik Lifli Harç, Duvar Örgü Tipi ve Derz Kalınlığı Değişkenlerinin Etkisi, Araştırmacı, 2019-Devam Ediyor.
3. FÜBAP - MF.20.18, Özel Beton/Betonarme Kirişlerin Eğilme Etkisi Altındaki Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi, Araştırmacı, 2020-2021.