

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TARİHİ YIĞMA YAPILARIN ONARIMINDA KULLANILAN ENJEKSİYON
MALZEMESİNİN (GROUT) PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ
VE 19. YÜZYIL TUĞLA YIĞMA YAPILARDA ÖRNEKLENMESİ**

ENİSE YASEMİN GÖKYİĞİT ARPACI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MİMARLIK ANABİLİM DALI
YAPI PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. NABİ YÜZER
EŞ DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. DİLEK EKŞİ AKBULUT**

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TARİHİ YIĞMA YAPILARIN ONARIMINDA KULLANILAN ENJEKSİYON
MALZEMESİNİN (GROUT) PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ
VE 19. YÜZYIL TUĞLA YIĞMA YAPILARDA ÖRNEKLENMESİ**

Enise Yasemin GÖKYİĞİT ARPACI tarafından hazırlanan tez çalışması 27.04.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Nabi YÜZER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Eş Danışman

Yrd. Doç. Dr. Dilek EKŞİ AKBULUT
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Nabi YÜZER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Dilek EKŞİ AKBULUT
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Aynur Çiftçi
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Bekir Yılmaz Pekmezci
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Işıl Polat Pekmezci
İstanbul Teknik Üniversitesi



Bu alışma, TÜBİTAK'ın 114M256 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Öncelikle yüksek lisans tez danışmanım olmayı kabul eden ve bu konuda benimle bütün bilgi ve deneyimlerini paylaşan, tezin araştırma ve deneysel çalışmaları boyunca bana yol gösterici olan değerli hocalarım Prof. Dr. Nabi YÜZER ve Yrd. Doç. Dr. Dilek EKŞİ AKBULUT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yaklaşık 1 yıl süren deneysel çalışmalarım sırasında benden yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Araş. Gör. Didem OKTAY ve Arş. Gör. Serhan Ulukaya'ya, teknisyenimiz Halil Yavaşca'ya ve sevgili Orhan Emekli'ye,

Deneysel çalışmalarımı destekleyen TÜBİTAK'a, enjeksiyon uygulamasının gerçekleştirilmesinde büyük katkısı olan Letoon Mimarlık'a,

Literatür çalışmalarım sırasında kaynaklara ulaşmama yardımcı olan sevgili annem Gülümser Arpacı'ya,

Akademik çalışmalarım sırasında ve hayatım boyunca benden desteğini hiç bir zaman esirgemeyen canım babam Mehmet Oğuz Gökyiğit'e, sevgili dedelerim Ali Nihat Gökyiğit ve Burhan Cahit Gökyiğit'e,

En zor günlerimde yanımda olan sevgili babaannem İclal Nermin Gökyiğit, amcam Ahmet Cengiz Gökyiğit, halam Emine Arzu Gökyiğit'e,

Her an yardıma hazır bekleyen sevgili kardeşlerim Ahmet Yiğit Gökyiğit, Damla Karakız ve annem Dilnur Karakız'a,

Bütün çalışmam boyunca yanımdan hiç ayrılmayan, yol gösterici ve en büyük güç kaynağım olan, anlayış ve sonsuz sabırla beni destekleyen, çok sevgili eşim Dağhan Mehmet Arpacı'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, bana aklının zekâtını veren sevgili dedem Burhan Cahit Gökyiğit'e ithaf edilmiştir.

Nisan, 2016

Enise Yasemin GÖKYİĞİT ARPACI

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xvi
ÖZET	xviii
ABSTRACT.....	xxi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
BÖLÜM 2	
TARİHİ YIĞMA YAPILARDA KULLANILAN MALZEMELER VE TAŞIYICI ELEMANLAR	6
2.1 Tarihi Yığma Yapı Malzemesi Olarak Tuğla	7
2.2 Tarihi Yığma Yapılarda Kullanılan Harçlar	9
2.2.1 Tarihi Yığma Yapılarda Kullanılan Harç İçerisindeki Bağlayıcılar	10
2.2.2 Tarihi Yığma Yapılarda Kullanılan Harç İçerisindeki Agregalar	15
2.3 Tarihi Yığma Yapıların Taşıyıcı Duvarları	15
BÖLÜM 3	
TARİHİ YIĞMA YAPILARDA OLUŞAN HASARLAR, NEDENLERİ VE HASAR TESPİT YÖNTEMLERİ	19
3.1 Tarihi Yığma Yapılarda Hasarlara Neden Olan Etkenler	19
3.1.1 Doğal Etkenler	21
3.1.2 Tasarım ve Yapım Hataları	29
3.1.3 Yapının Kullanım Süreci İçinde Oluşan Hasarlar	32

3.2 Hasar Tespit Yöntemleri.....	36
3.2.1 Yerinde (in-situ) Uygulanan Deneyler ve Numune Alınması	39
3.2.2 Laboratuvar Ortamında Yapılan Deneyler.....	51
3.2.2.1 Fiziksel Deneyler.....	52
3.2.2.2 Mekanik Deneyler	56
3.2.2.3 Kimyasal Deneyler.....	58
3.2.2.4 İç Yapı İncelemeleri ve Diğer Analizler	60

BÖLÜM 4

TARİHİ YIĞMA YAPILARDA UYGULANAN ONARIMLAR VE ENJEKSİYON YÖNTEMİ (GROUTING)	61
4.1 Tarihi Yığma Yapılarda Uygulanan Onarımın Tanımı ve Ana İlkeleri.....	61
4.2 Tarihi Yığma Yapılarda Uygulanan Onarım Teknikleri.....	66
4.2.1 Müdahale Ölçeği ve Müdahale Yaklaşımları	66
4.2.2 Müdahale Biçimleri.....	67
4.3 Tarihi Yığma Yapıların Onarımında Uygulanan Enjeksiyon Yöntemi	68
(Grouting).....	68
4.3.1 Zaman İçerisinde Tarihi Yığma Yapıların Onarımında Kullanılan Enjeksiyon Yönteminin (Grouting) Gelişimi.....	70
4.3.2 Enjeksiyon Uygulaması Öncesi, Sırası ve Sonrasında Dikkat Edilmesi Gerekenler	80

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ	83
5.1 Yerinde (In-situ) Şerbet Enjeksiyonu Öncesi İzlenmesi Gereken Adımlar ...	85
5.2 Toz Halindeki Enjeksiyon Malzemelerinin Fiziksel Gözlemi, Fiziksel ve	87
Kimyasal Analizi.....	87
5.2.1 Toz Halindeki Enjeksiyon Malzemelerinin Fiziksel Gözlemi	87
5.2.2 Toz Halindeki Enjeksiyon Malzemelerinin Fiziksel ve Kimyasal Analizi	87
5.3 Enjeksiyon Şerbetinin Hazırlanması ve Beklenen Özelliklerin Sağlanması için Yapılan Taze Haldeki Şerbet Deneyleri	89
5.3.1 Enjeksiyon Şerbetinin Hazırlanması	89
5.3.2 Taze Birim Ağırlık	96
5.3.3 Akışkanlık Özelliği	96
5.3.4 Hacim Sabitliği Özelliği.....	100
5.3.5 Penetrasyon Özelliği	102
5.4 Sertleşmiş Şerbet Numuneleri ile Yapılan Mekanik ve Fiziksel Deneyler ..	107
5.4.1 Eğilme Deneyi	109
5.4.2 Basınç Deneyi.....	110
5.4.3 Kılcal Su Emme.....	111
5.5 Enjeksiyon Şerbetinin Enjekte Edilebilirliğinin ve Bu Malzeme ile Onarılmış . Elemanın Dayanımının Test Edilmesi	114
5.5.1 Silindir Enjeksiyon Deneyi.....	114
5.5.2 Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülünün Belirlenmesi.....	120

5.6 Model Duvar Deneyleri	123
5.6.1 Duvarların Üretilmesi	123
5.6.2 Duvarların Kür Koşulları	129
5.6.3 Model Duvarlardaki Yatay ve Düşey Yük Altında Yer Değiştirmenin Belirlenmesi	131
5.6.4 Enjeksiyon Uygulaması	139
5.6.5 Onarılan Model Duvarlardaki Yatay ve Düşey Yük Altında Yer Değiştirmenin Belirlenmesi	144
5.6.6 Model Duvarların Çatlak Haritalarının Çıkarılması	153
5.6.7 Ultra-ses deneyi ile enjeksiyon performansının değerlendirilmesi.	164
 BÖLÜM 6	
SONUÇ VE ÖNERİLER	167
KAYNAKLAR.....	171
 EK-A	
TARİHİ YIĞMA YAPILARIN ONARIMINDA KULLANILAN ENJEKSİYON MALZEMESİ İLE ÜRETİLEN NUMUNELERİN REOLOJİK VE FİZİKSEL DENEY SONUÇLARI	183
 EK-B	
19. YÜZYIL TUĞLA YAPILARA ÖRNEKLER, CUNDA.....	189
 EK-C	
SÖZLÜK.....	189
ÖZGEÇMİŞ	191

SİMGE LİSTESİ

a_s	Ağırlıkça su emme katsayısı
A	Alan
f_b	Basınç dayanımı
f_c	Çekme dayanımı
f_e	Eğilme dayanımı
f_k	Kayma dayanımı
f_m	Yığma yapıda ortalama basınç gerilmesi
h_s	Hacimce su emme katsayısı
I	Enjekte edilebilirlik değeri
k	Kompasite
K_k	Kılcal su emme katsayısı
K_a	Flatjack/açılan bölge alan oranı
K_m	Flatjack kalibrasyon faktörü
m	Ağırlık
p	Porozite
P	Kuvvet
P_y	Yatay kuvvet
Q_i	Emilen su miktarı (kılcallık)
t	Zaman
V	Hacim
V_{ses}	Ses geçiş hızı
V_v	Boşluk hacmi
W	Kütle
σ	Gerilme
σ_b	Basınç gerilmesi
σ_c	Çekme gerilmesi
E	Elastisite modülü
ε	Şekil değiştirme
β	Birim ağırlık
γ	Özgöl ağırlık
ρ	Yoğunluk
Δl	Boy değişimi
λ	Narinlik

KISALTMA LİSTESİ

ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standards
CL	Kalsiyum Esaslı Hava Kireci
ÇEKÜL	Çevre ve Kültür Değerlerini Koruma Derneği
DL	Dolomit Esaslı Hava Kireci
EEC	European Economic Community
EN	European Standard
FL	Tasarlanmış Kireç
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
GEEAYK	Gayrimenkul Eski Eserler ve Anıtlar Yüksek Kurulu
HL	Hidrolik Kireç
ICCROM	International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property
ICOMOS	International Council on Monuments and Sites
İTÜ	İstanbul Teknik Üniversitesi
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
NHL	Doğal Hidrolik Kireç
ODTÜ	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
RILEM	Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux
SEM-EDS	Scanning Electron Microscopy/Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy
SEM-EDX	Scanning Electron Microscopy/Energy-Dispersive X-ray Analysis
SPAB	Society for the Protection of Ancient Buildings
TAÇ	Türkiye Anıt Çevre Turizm Değerlerini Koruma Vakfı
TS	Türk Standardları
TSE	Türk Standardları Enstitüsü
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UV	Ultraviyole
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
XRD	X-ray Diffraction
XRF	X-ray Fluorescence
YTÜ	Yıldız Teknik Üniversitesi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1	Yapılardaki harçların içerisinde bağlayıcı olarak kullanılan kireçler [24]	11
Şekil 2. 2	Tuğla duvar planları [31] (a) Yarım sıra tuğla duvar, (b) Bir sıra tuğla duvar, (c) Bir buçuk sıra tuğla duvar, (d) İki sıra tuğla duvar	16
Şekil 2. 3	Sık kullanılan duvar örgü biçimleri [32,33] (a) Yığma örgü, (b) Dizi örgüsü, (c) Amerikan örgüsü, (d) Flaman örgüsü, (e) Flaman haç örgüsü, (f) Flaman çapraz örgü, (g) Bahçe duvarı örgüsü, (h) İngiliz örgüsü, (i) İngiliz haç örgüsü	18
Şekil 3. 1	Tarihi yığma yapılarda hasarlara neden olan etkenler	20
Şekil 3. 2	Yığma duvarda kesme ve eğilme etkisiyle oluşan çatlaklar [36].....	22
Şekil 3. 3	Simav depreminde Halil Ağa Camii'nde oluşan deprem çatlakları, 2011 [37].	23
Şekil 3. 4	Sudan kaynaklı bozulmalar, Ağa Hamamı, İstanbul [41]	25
Şekil 3. 5	Ankara Sultan Alaaddin Camii avlusundaki namazgahtaki tuğlalarda oluşan tuzlanma, 2011 [37]	26
Şekil 3. 6	Çankırı Ulu Camii payanda yüzeylerinde ufalanma, 2011 [37].....	26
Şekil 3. 7	Rüzgâr ile taşınan bitkilerden kaynaklanan bozulmalar [41] (a) Haydar Paşa Medresesi, İstanbul, (b) Yetimhane, Büyükağa, İstanbul	28
Şekil 3. 8	Kerpiç malzemede termit hasarı, Abydos, Mısır (Fotoğraf: Görün Arun) [41]	29
Şekil 3. 9	Tarihi yapı cephesine yazı yazma ve afiş yapıştırma nedeniyle oluşan bozulmalar, (a) Köprülü Medresesi, İstanbul [41] , (b) Gülhane Parki'nde tarihi bir çeşme, İstanbul, 2010 [37]	33
Şekil 3. 10	Çevre kirliliği nedeniyle yüzey kararması ve malzeme yapısının bozulması, Zeynep Sultan Cami, İstanbul [41]	36
Şekil 3. 11	Malzeme neminin belirlenmesi [55]	41
Şekil 3. 12	Sertlik ölçüm deneyleri (a) N tipi schmit çekici testi uygulaması [46], (b) P tipi schmit çekici testi uygulaması [56]	42
Şekil 3. 13	Ultrases ölçüm deneyi [46]	43
Şekil 3. 14	Ultrases ile ses geçiş sürelerinin ölçümü (a) Doğrudan ölçüm (b) Dolaylı ölçüm [57]	43
Şekil 3. 15	Ultrases ile (a) çatlak derinliğinin (b) çatlak yönünün araştırılması [46]	44
Şekil 3. 16	Ultrasonik ölçüm ile çatlak derinliğinin araştırılması; ölçüm noktaları (t1,t2) ve çatlak derinliği (c) [9]	44
Şekil 3. 17	İnfrared tomografi yöntemi ile oluşan görüntü [58]	45

Şekil 3. 18	Tek plak ile ölçüm alınarak yük altında yerinde basınç deneyi yapılması (a) [46], (b) [9]	46
Şekil 3. 19	Çift plak ile ölçüm alınarak yük altında yerinde elastisite modülünün belirlenmesi (a) [46], (b) [60]	47
Şekil 3. 20	Yerinde yük altında kayma deneyi yapılması [37]	48
Şekil 3. 21	Yerinde kayma deneyi [1]	48
Şekil 3. 22	Endoskopik incelemeler - harç [35]	49
Şekil 3. 23	Bir binanın temellerinin altındaki tünel çalışmaları sırasında oluşan hareketlerin kaydı [35]	50
Şekil 3. 24	Penetrasyon testi [35]	50
Şekil 3. 25	Özgül ağırlık deneyi- YTÜ malzeme laboratuvarı, 2013 (a) Öğütülmüş harç, (b) Le Chetelier şişesi (Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	53
Şekil 3. 26	Numunelerin havada ve suda tartılması - YTÜ malzeme laboratuvarı, 2013 (Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	54
Şekil 3. 27	Kılcal su emme deneyi [60]	55
Şekil 3. 28	Çelik plakalar arasına konan numunenin düşey yük altında kırılması - YTÜ malzeme laboratuvarı, 2013 (Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	56
Şekil 3. 29	Çelik eğilme aparatına konulan numunelerin eğilme dayanımının belirlenmesi - YTÜ malzeme laboratuvarı, 2013 (Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	57
Şekil 3. 30	Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen model deneyleri [15]	58
Şekil 3. 31	Harç numunesine HCl eklenmesi, manyetik karıştırıcıda karıştırılması ve filtre kağıdından süzülmesi - YTÜ malzeme laboratuvarı, 2013 . (Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	59
Şekil 3. 32	Granülometri deneyi - YTÜ malzeme laboratuvarı, 2013 (Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	59
Şekil 4. 1	Enjeksiyon sonrası Menander Evi, bahçesi ve duvar resmi, Pompeii, İtalya (Fotoğraf: Peter Unger) [90]	72
Şekil 4. 2	Hadrian Duvarı'nın genel görünümü ve test numuneleri, Smeaton Projesi, 1994 [91]	73
Şekil 4. 3	Dafni Manastırı'nın genel görünümü ve mozaik örneği, 2007 [5,96]	76
Şekil 4. 4	Model duvarlar üzerinde basınç ve diyagonal basınç deneyleri [5,96]	76
Şekil 4. 5	Duvar morfolojisi araştırılmadan yapılan yanlış şerbet enjeksiyonunun sonucu [126]	80
Şekil 4. 6	Yerinde (in-situ) şerbet enjeksiyonu [131]	82
Şekil 5. 1	Yerinde (in-situ) şerbet enjeksiyonu öncesi izlenmesi gereken adımlar	86
Şekil 5. 2	Toz halindeki G1 ve G2 malzemelerinin renk farkları (a) G1 (b) G2 (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	87
Şekil 5. 3	G1 ve G2 malzemelerinin gronülometri eğrisi	89
Şekil 5. 4	Mekanik karıştırıcı ile enjeksiyon şerbeti üretilmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	90
Şekil 5. 5	Suyun sıcaklığının ölçülmesi ve enjeksiyon şerbetine süper akışkanlaştırıcı eklenmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	91
Şekil 5. 6	G1 malzemesi ile üretilen şerbetin ayrışması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	93

Şekil 5. 7	G2 malzemesi ile üretilen şerbetlerinin kıvamları (a) G1-1 şerbeti, (b) G1-02 şerbeti, (c) G1-06 şerbeti (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	95
Şekil 5. 8	(a) Akış konisi deneyi, (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı) (b) Akış konisi ölçüleri [136].....	97
Şekil 5. 9	Akış Konisi deneyi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	98
Şekil 5. 10	(a) Marsh hunisi deneyi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı), (b) Marsh hunisi ölçüleri [137].....	99
Şekil 5. 11	Marsh Hunisi deneyi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	100
Şekil 5. 12	Terleme Deneyi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	101
Şekil 5. 13	Kum kolonu deneyi, deney seti (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	103
Şekil 5. 14	Kum kolonu deneyi [142]	104
Şekil 5. 15	Kum kolonu deneyi için; (a) Silis esaslı dere kumunun elenmesi, (b) Yeniden yapılandırılmış 1.25-2.50 mm boyutlarındaki kum (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	105
Şekil 5. 16	(a)Kumun tüpe doldurulması, (b) Enjeksiyon şerbetinin metal kaba dökülmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	106
Şekil 5. 17	(a) Enjeksiyon şerbetinin kolonda ilerlemesi, (b) Kum kolonu deneyinin yapılışı (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	107
Şekil 5. 18	G1 şerbetinin 28 gün kür koşullarına bekledikten sonraki durumu (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	108
Şekil 5. 19	G2 şerbetinin kalıba dökülmüş ve kalıptan çıkarılmış halleri (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	108
Şekil 5. 20	G2 malzemesinin eğilme deneyi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	109
Şekil 5. 21	G2 malzemesinin basınç deneyi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	110
Şekil 5. 22	G2 malzemesinin kılcal su emme deneyi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	112
Şekil 5. 23	G2 malzemesinin Qi - Vti grafiği	113
Şekil 5. 24	Silindir enjeksiyon deneyi için kalıp ölçüleri, kesit ve plan [149].....	114
Şekil 5. 25	Silindir enjeksiyon deneyi, deney seti [149]	115
Şekil 5. 26	Silindir enjeksiyon deneyi için tuğlaların kırılması ve elenmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	115
Şekil 5. 27	Farklı boyutlarda tuğla ve harç kırıkları (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	116
Şekil 5. 28	Enjeksiyon öncesi, sadece tuğla kırıkları kullanılan ilk seri silindirler (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	116
Şekil 5. 29	Enjeksiyon öncesi, tuğla ve harç kırıkları kullanılan ikinci seri silindirler (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	117

Şekil 5. 30	Enjeksiyon öncesi, silindirleri ön ıslatma işlemi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	117
Şekil 5. 31	(a) Grout besleme hunisi, pompası ve motoru, (b) Silindire şerbet enjekte edilmesi, (c) Şerbet enjekte edilmiş silindir (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	118
Şekil 5. 32	(a) Kalıpta bekletilen silindir numunesi, (b) Silindir numunesinin kalıptan çıkarılması, (c) Kalıptan çıkarılmış silindir numunesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	120
Şekil 5. 33	Kalıptan çıkan silindirlerin 28. günde üst yüzeyleri (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	120
Şekil 5. 34	Silindirlere yapılan tek eksenli basınç deneyi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	121
Şekil 5. 35	Silindirlerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri	122
Şekil 5. 36	Silindirlerde oluşan çatlaklar (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	123
Şekil 5. 37	Duvar geometrisi, ön görünüş ve yan görünüş.....	124
Şekil 5. 38	Duvar geometrisi, planlar (A ve B kesitleri)	124
Şekil 5. 39	Harç Üretimi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	125
Şekil 5. 40	(a) Ahşap panel ve beton dökülmüş metal ayak, (b) Harçlar için kalıp hazırlanması, (c) Harç kalıpları (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	127
Şekil 5. 41	Tuğlaların duvar üretimi için hazırlanması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	127
Şekil 5. 42	Alçı hazırlanması ve tuğla eğiminin su terazisi ile ölçülmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	128
Şekil 5. 43	Duvar örümü (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	128
Şekil 5. 44	Duvarın nemli örtü ile örtülmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	129
Şekil 5. 45	(a) Duvarın alçı ile sıvanması, (b) duvarın su terazisi ile ölçülmesi, (c) Harç kalıplarının sökülmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	130
Şekil 5. 46	Laboratuvar ortamında bekleyen duvarlar (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	130
Şekil 5. 47	Deney düzeneği ve duvarın düzeneğe yerleştirilmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	131
Şekil 5. 48	Yük ve LVDT yerleşimleri.....	132
Şekil 5. 49	Duvar yüklemesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	133
Şekil 5. 50	(a) Yükleme öncesi A1-1 duvarı, (b) Yükleme sonrası A1-1 duvarı (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	134
Şekil 5. 51	A1-1 duvarı yanal yük - yatay yer değiştirme grafiği	134
Şekil 5. 52	(a) Yükleme öncesi A1-2 duvarı, (b) Yükleme sonrası A1-2 duvarı (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	135
Şekil 5. 53	A1-2 duvarı yanal yük - yatay yer değiştirme grafiği	136

Şekil 5. 54	(a) Yükleme öncesi B-1 duvarı, (b) Yükleme sonrası B-1 duvarı (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	137
Şekil 5. 55	B-1 duvarı yanal yük - yatay yer değiştirme grafiği.....	137
Şekil 5. 56	(a) Yükleme öncesi B-2 duvarı, (b) Yükleme sonrası B-2 duvarı (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	138
Şekil 5. 57	B-2 duvarı yanal yük - yatay yer değiştirme grafiği.....	139
Şekil 5. 58	Enjeksiyon deliklerinin açılması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	140
Şekil 5. 59	Kompresör ile boşluklara ve çatlaklara hava basılması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	140
Şekil 5. 60	Boşlukların ve çatlakların ıslatılması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	141
Şekil 5. 61	Şerbet enjeksiyonu ile duvarın onarılması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	142
Şekil 5. 62	Enjeksiyon şerbetinin uygulama noktasının üzerindeki delikten çıkışı (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	142
Şekil 5. 63	Enjeksiyon şırıngası ile rötüş yapılması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	143
Şekil 5. 64	Laboratuvar koşullarında depolanan, onarılmış duvarlar (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	144
Şekil 5. 65	Duvarların deney düzeneğine yerleştirilmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	145
Şekil 5. 66	(a) Onarım öncesi A1-1 duvarı yüklemesi sonucu oluşan çatlaklar, (b) Onarım sonrası A1-1 duvarı yüklemesi sonucu oluşan çatlaklar (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	146
Şekil 5. 67	A1-1 duvarına ait yanal yük-yatay yer değiştirme eğrileri	147
Şekil 5. 68	(a) Onarım öncesi A1-2 duvarı yüklemesi sonucu oluşan çatlaklar, (b) Onarım sonrası A1-2 duvarı yüklemesi sonucu oluşan çatlaklar (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	148
Şekil 5. 69	A1-2 duvarına ait yanal yük-yatay yer değiştirme eğrileri	148
Şekil 5. 70	(a) Onarım öncesi B-1 duvarı yüklemesi sonucu oluşan çatlaklar, (b) Onarım sonrası B-1 duvarı yüklemesi sonucu oluşan çatlaklar (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	149
Şekil 5. 71	B-1 duvarına ait yanal yük-yatay yer değiştirme eğrileri	150
Şekil 5. 72	(a) Onarım öncesi B-2 duvarı yüklemesi sonucu oluşan çatlaklar, (b) Onarım sonrası B-2 duvarı yüklemesi sonucu oluşan çatlaklar (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	151
Şekil 5. 73	B-2 duvarına ait yanal yük-yatay yer değiştirme eğrileri	151
Şekil 5. 74	Hidrolik kireç esaslı duvarlara (A1-1, A1-2) ait yanal yük-yatay yer değiştirme eğrileri	152
Şekil 5. 75	Hava kireci esaslı duvarlara (B-1, B-2) ait yanal yük-yatay yer değiştirme eğrileri	153
Şekil 5. 76	Çatlak mikroskobu ile okuma alınması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı).....	153
Şekil 5. 77	A1-1 Duvarı ön yüzeyi, enjeksiyon öncesi yükleme deneyi çatlak haritası	154

Şekil 5. 78	A1-1 Duvarı ön yüzeyi, enjeksiyon sonrası yükleme deneyi çatlak haritası	154
Şekil 5. 79	A1-1 Duvarı arka yüzeyi, enjeksiyon öncesi yükleme deneyi çatlak haritası...	155
Şekil 5. 80	A1-1 Duvarı arka yüzeyi, enjeksiyon sonrası yükleme deneyi çatlak haritası..	155
Şekil 5. 81	A1-2 Duvarı ön yüzeyi, enjeksiyon öncesi yükleme deneyi çatlak haritası	156
Şekil 5. 82	A1-2 Duvarı ön yüzeyi, enjeksiyon sonrası yükleme deneyi çatlak haritası	156
Şekil 5. 83	A1-2 Duvarı arka yüzeyi, enjeksiyon öncesi yükleme deneyi çatlak haritası...	157
Şekil 5. 84	A1-2 Duvarı arka yüzeyi, enjeksiyon sonrası yükleme deneyi çatlak haritası .	157
Şekil 5. 85	B-1 Duvarı ön yüzeyi, enjeksiyon öncesi yükleme deneyi çatlak haritası..	158
Şekil 5. 86	B-1 Duvarı ön yüzeyi, enjeksiyon sonrası yükleme deneyi çatlak haritası.	158
Şekil 5. 87	B-1 Duvarı arka yüzeyi, enjeksiyon öncesi yükleme deneyi çatlak haritası	159
Şekil 5. 88	B-1 Duvarı arka yüzeyi, enjeksiyon sonrası yükleme deneyi çatlak haritası....	159
Şekil 5. 89	B-2 Duvarı ön yüzeyi, enjeksiyon öncesi yükleme deneyi çatlak haritası..	160
Şekil 5. 90	B-2 Duvarı ön yüzeyi, enjeksiyon sonrası yükleme deneyi çatlak haritası.	160
Şekil 5. 91	B-2 Duvarı arka yüzeyi, enjeksiyon öncesi yükleme deneyi çatlak haritası	161
Şekil 5. 92	B-2 Duvarı arka yüzeyi, enjeksiyon sonrası yükleme deneyi çatlak haritası....	161
Şekil 5. 93	A1-1 duvarı enjeksiyon öncesi ve sonrası çatlak haritalarının karşılaştırılması	162
Şekil 5. 94	A1-2 duvarı enjeksiyon öncesi ve sonrası çatlak haritalarının karşılaştırılması	162
Şekil 5. 95	B-1 duvarı enjeksiyon öncesi ve sonrası çatlak haritalarının karşılaştırılması .	163
Şekil 5. 96	B-2 duvarı enjeksiyon öncesi ve sonrası çatlak haritalarının karşılaştırılması .	163
Şekil 5. 97	Ultra-ses ölçümünün yapılması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	164
Şekil EK-B.1	19. Yüzyıl tuğla yapı örnekleri ve tuğla detayları, Cunda-Balıkesir, 2016 (Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)	164

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1	Tuğlaların ortalama mekanik özellikleri [19,20]..... 8
Çizelge 2. 2	Harman tuğlasının fiziksel ve mekanik özellikleri [10] 9
Çizelge 2. 3	Kalsiyum kirecinin, karakteristik değerler olarak verilen kimyasal gerekleri [24] 13
Çizelge 2. 4	Doğal hidrolik kirecin, karakteristik değerler olarak verilen kimyasal gerekleri ve basınç dayanımları [24] 14
Çizelge 3. 1	Çatlak Sınıflandırması [38]..... 24
Çizelge 3. 2	Genel çalışma programı [1] 37
Çizelge 3. 3	Tarihi yağma yapılarında yerinde (in-situ) uygulanan deneyler 40
Çizelge 3. 4	Çatlak hareketlerini ölçmek için kullanılan geleneksel yöntemler [37] . 41
Çizelge 3. 5	Tarihi yağma yapılarında laboratuvar ortamında yapılan deneyler..... 51
Çizelge 4. 1	Kireç esaslı enjeksiyon şerbetinin avantajları ve dezavantajları 70
Çizelge 4. 2	Şerbet enjeksiyonu öncesi, sırası ve sonrasında istenilen durumlar [130]. 81
Çizelge 5. 1	Malzemelerin kimyasal bileşimi 88
Çizelge 5. 2	Malzemelerin fiziksel özellikleri 88
Çizelge 5. 3	G1 şerbeti için tekrarlanan üretimler..... 92
Çizelge 5. 4	G2 şerbeti için tekrarlanan üretimler..... 95
Çizelge 5. 5	G1-14 ve G2-06 enjeksiyon şerbetlerinin birim ağırlıkları 96
Çizelge 5. 6	G1 ve G2 enjeksiyon şerbetleri ile yapılan akışkanlık deneyleri sonuçları ve standard değerleri 100
Çizelge 5. 7	G1 ve G2 enjeksiyon şerbetleri ile yapılan terleme deneyleri sonuçları ve standard değerleri..... 102
Çizelge 5. 8	Kum kolonu deneyinde kullanılan kumun granülometri eğrisi 105
Çizelge 5. 9	G1 ve G2 enjeksiyon şerbetleri ile yapılan kum kolonu deneyleri sonuçları ve standard değerler 107
Çizelge 5. 10	G2 malzemesi ile yapılan mekanik deneyler ve özgün malzeme özellikleri ile karşılaştırılması 111
Çizelge 5. 11	G2 malzemesi ile özgün malzemelerin kılcallık katsayılarının karşılaştırılması..... 113
Çizelge 5. 12	Silindir enjeksiyon deneyi sonuçları 119
Çizelge 5. 13	Silindirlerin basınç dayanımı ve elastisite modülü 122
Çizelge 5. 14	1 litre harç üretiminde kullanılan malzeme miktarları ve kodları..... 126
Çizelge 5. 15	Harman tuğlası ve harçların mekanik özellikleri 126
Çizelge 5. 16	Dolu yüzeylerde ultrases ölçümleri..... 165

Çizelge 5. 17	Çatlak etrafında yapılan ultrases ölçümleri.....	165
Çizelge Ek-A.1	G1 ve G2 enjeksiyon şerbetlerinin karıştırma prosedürleri ve taze birim ağırlık sonuçları	184
Çizelge Ek-A.2	G1 ve G2 enjeksiyon şerbetlerinin akışkanlık (akış konisi, marsh hunisi) deneyleri sonuçları	185
Çizelge Ek-A.3	G1 ve G2 enjeksiyon şerbetlerinin hacim sabitliği (terleme) ve penetrasyon (kum kolonu) deneyleri sonuçları	186
Çizelge Ek-A.4	G2 enjeksiyon malzemesi ile üretilen numunelerin kılcal su emme deneyi sonuçları	187



**TARİHİ YIĞMA YAPILARIN ONARIMINDA KULLANILAN ENJEKSİYON
MALZEMESİNİN (GROUT) PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ
VE 19. YÜZYIL TUĞLA YIĞMA YAPILARDA ÖRNEKLENMESİ**

Enise Yasemin GÖKYİĞİT ARPACI

Mimarlık Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nabi YÜZER

Eş Danışman: Yrd. Doç. Dr. Dilek EKŞİ AKBULUT

Tarihi yapıların değeri, zamanının ve bulunduğu yerin yapı teknolojisini simgeleyen tüm bileşenlerinin bütünlüğündedir. Bu nedenle, mimari mirasın korunması ve onarımı konularında yapılan ve yapılacak çalışmalar çok büyük öneme sahiptir.

"Tarihi yığma yapıların onarımında kullanılan enjeksiyon malzemesinin (grout) performans değerlendirmesi ve 19. Yüzyıl tuğla yığma yapılarda örneklenmesi" başlıklı bu çalışmada; tarihi yapıların onarımda yaygın olarak kullanılan kireç esaslı hazır enjeksiyon şerbetlerinin reolojik ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinin ve özgün malzeme özellikleriyle karşılaştırılmasının yanı sıra bu malzemeler ile onarılmış bir sıra tuğla yığma test duvarlarının enjeksiyon öncesi ve sonrası mekanik performansının değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Tezin birinci bölümünde; konu ile ilgili çalışmalardan yararlanılarak literatür özeti verilmiş, tezin amacı ve hipotez tanımlanmıştır.

İkinci bölümde; tarihi yığma yapılarda kullanılan malzemeler ve elemanlar kısaca anlatılmış, deneysel çalışmalar sırasında üretilecek model duvar morfolojisinin tanımlanabilmesi için tez kapsamında ele alınan hidrolik kireç ve hava kireci esaslı harç, harman tuğlası ve bu malzemeler ile üretilen yığma duvarlar açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde; tarihi yığma yapılarda oluşabilecek hasarlar ve nedenleri sıralanmış, tarihi yığma yapılarda hasar tespiti yapılabilmesi için yerinde (in-situ) ve laboratuvar ortamında uygulanan deneysel çalışmalar açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde; tarihi yapıların korunmasına, onarımına ve sağlamlaştırılmasına yönelik yasal çalışmalara yer verilmiş, özgün malzemenin korunmasına ilişkin yasa maddeleri açıklanmıştır. Ayrıca, tarihi yığma yapılarda uygulanan onarım tekniklerine kısaca değinilerek, tarihi yapıların onarımı sırasında uygulanan enjeksiyon malzemesinin (grout) özellikleri açıklanmış, yöntem tanımlanmış, zaman içerisinde yöntemin gelişimi ve enjeksiyon uygulaması öncesi, sırası ve sonrasında dikkat edilmesi gereken durumlar açıklanmıştır.

Beşinci bölümde, bu tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalar açıklanmış, sonuçlar değerlendirilmiş ve irdelenmiştir. İlk olarak yerinde (in-situ) şerbet enjeksiyonu ile onarım yapmadan önce izlenmesi gereken adımlar belirlenmiştir. Deneyler iki farklı ticari kireç esaslı enjeksiyon şerbeti (grout) ile sınırlı tutulmuştur. Toz halindeki her bir enjeksiyon malzemesinin fiziksel gözlemi ve mineralojik analizi açıklanmıştır. Bir sonraki adımda enjeksiyon şerbetlerinin karıştırma prosedürleri ve beklenen özellikleri (akışkanlık, hacim sabitliği, penetrasyon) sağlaması için yapılan ön deneyler (akış konisi, marsh hunisi, terleme ve kum kolonu) yer almıştır. Daha sonra benzer özellikleri sağlayan ve 28 gün belirli kür koşullarında bekleyerek sertleşen enjeksiyon malzemesinin yapılan mekanik (eğilme ve basınç) ve fiziksel (kılcal su emme) deneyleri ve deney sonuçları açıklanmış, özgün malzeme ile uyumluluğu irdelenmiştir. Model duvarların bir simülasyonu olan ve iki farklı seride üretilen (tuğla ve tuğla-harç) silindir numuneleri ile silindir enjeksiyon deneyi gerçekleştirilmiş, enjeksiyon şerbetinin enjekte edilebilirliği ölçülmüştür. Ardından 28 gün laboratuvar ortamında bekletilen silindirler üzerinde tek eksenli basınç deneyi uygulanıp silindirlerin basınç dayanımı ve elastisite modülleri belirlenmiş, deneyler ve deney sonuçları açıklanarak irdelenmiştir. Enjekte edilebilirliği sağlanan enjeksiyon şerbeti (grout) ile onarım yapmak üzere hidrolik kireç esaslı harç ile harman tuğlası ve hava kireci esaslı harç ile harman tuğlasından, her birinden ikişer toplamda dört adet olmak üzere, özgün malzeme özelliklerine bağlı kalınarak, tek sıra model yığma duvarlar üretilmiş, üretim aşamaları açıklanmıştır. 28 gün laboratuvar koşullarında bekleyen duvarlara sabit düşey yük altında yanal yük verilmiş, yük altında duvarların yer değiştirmesi belirlenmiştir. Hasar gören duvarlar kireç esaslı hazır enjeksiyon şerbeti ile onarılmış ve 28 gün laboratuvar ortamında bekledikten sonra tekrar aynı koşullarda yüklemeye tabi tutulmuştur. Enjeksiyon öncesi ve sonrası duvarların yük-yer değiştirme ölçümleri karşılaştırılmış, çatlak oluşma anı göz önünde bulundurulduğunda duvarlarda %33 ile %97 arasında yük artışı gözlemlenmiş, tüm deneyler ve sonuçları açıklanarak irdelenmiştir. Son olarak enjeksiyonun görsel olarak performansını değerlendirebilmek için enjeksiyon öncesi ve sonrası çatlak haritaları çıkarılmış ve ultrases deneyi ile enjeksiyonun kalitesi incelenmiştir.

Altıncı bölümde ise tez çalışması kapsamında ulaşılan sonuçlar verilmiş, daha sonra yapılacak benzer çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tarihi yapı, yığma yapı, onarım, enjeksiyon yöntemi, kireç esaslı enjeksiyon şerbeti, hidrolik kireç, hava kireci, harman tuğlası, model duvar



**EVALUATING THE PERFORMANCE OF GROUT USED FOR CONSOLIDATION
OF HISTORICAL MASONRY BUILDINGS AND SAMPLING ON
THE 19th CENTURY BRICK MASONRY BUILDINGS**

Enise Yasemin GÖKYİĞİT ARPACI

Department of Architecture

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Nabi YÜZER

Co-Adviser: Asst. Prof. Dilek Ekşi AKBULUT

The value of a historical building stems from its entire components which characterise the construction technology of the era and the location that the building was constructed. Therefore, recent or future studies about the conservation and consolidation of architectural heritage have great importance.

This study entitled "Evaluating the performance of grout used for consolidation of historical masonry buildings and sampling on the 19th century brick masonry buildings", aimed to investigate both rheological and mechanical properties of hydraulic lime grout and compare them with the properties of original materials, and also to examine mechanical performance of brick masonry walls before and after the grout injection.

In the first section of this study, literature summary is given by reviewing the existing studies on the topic, also the purpose and the hypothesis of the study are defined.

In the second section, materials and components used in the historical masonry buildings are briefly explained and the hydraulic and air lime based mortars, traditional blend brick and the masonry walls constructed with these materials in the scope of this study are described in order to define the morphology of the model walls that will be produced during the experimental studies.

In the third section, the damages that occur in historical buildings and the causes of them are listed and the experimental studies carried out in-situ and in the laboratory for the purpose of damage assessment in the historical masonry buildings are explained.

In the fourth section, the legal studies involving the protection, repair and strengthening of the historical masonry buildings are discussed, and the legal articles regarding the protection of original materials are explained. In addition to that, the consolidation techniques of historical masonry buildings are briefly mentioned and the characteristics of injection material and the technique used for consolidation of historical masonry buildings are explained. Also, the improvements in the course of time regarding the material, and the points that should be taken into consideration before, during and after the grout injection are explained.

In the fifth section, experimental studies carried out in the scope of this thesis and the examination of them are included. Firstly, the steps that should be followed before starting in-situ consolidation with grout are determined. Experimental studies in this thesis are limited to two different commercially sold hydraulic lime grouts. Then, physical observation and mineralogical analysis of pulverized grouts are explained. In the next step the mixing procedure of each grout and the preliminary tests (flow cone, marsh funnel, bleeding, sand column) that are performed to provide limit values (fluidity, stability, penetrability) are included. Afterwards, mechanical (bending and compression) and physical (capillary absorption) tests with the grouts that provide limit values are performed after a 28-day curing period during which the grouts are hardened in specific conditions. Tests and the test results are explained together and also the compatibility between the original material and the grout is examined. Cylinder injection test is performed with cylinder specimens produced in two different sets (brick or brick and mortar) as the simulation of model walls. By this way, the injectability of the grout is measured. After 28-day curing period of the cylinders, uniaxial compression tests are performed on the cylinders. Thus, the compressive strength and the modulus of elasticity of the cylinders are determined. In order to make consolidation with the grout that passed the injection test, two-wythe masonry test walls were constructed with two different mortars (hydraulic lime and air lime based mortar) and traditional blend brick in accordance with the original materials. In this context, a total of four masonry walls were produced; two walls for each type of mortar and construction processes of the walls are explained. After 28-day curing period of the walls at the laboratory conditions, the walls are tested under a combination of constant vertical with incrementally increasing lateral loading and lateral displacements are determined. Damaged walls are repaired with the commercially sold hydraulic lime grout. After 28-day curing period of repaired walls, walls are re-loaded with the same loading schedule. Load-displacement measurements before and after the injection are compared and if the main crack formation is considered, the lateral load with the grout injection of the test walls is increased at the range of 33% - 97%. Finally, in order to analyze the performance of the grout visually, crack maps are prepared and, in order to evaluate the quality of the grout injection, ultrasonic velocity test is performed before and after the consolidation of the walls.

In the sixed section, the conclusions of this thesis are given, and suggestions are made for other similar studies.

Keywords: Historical building, masonry structure, consolidation, grout injection, lime based grout, hydraulic lime, air lime, traditional blend brick, test wall



1.1 Literatür Özeti

Yüzyıllardır doğa ve/veya insanlar tarafından oluşturulan tarihi yapıları kültürel ve doğal miras olarak korumak ve sonraki nesillere aktarılmasını sağlamak tüm insanlığın ortak görevlerinden biridir.

Geçmişte, bir yapının korunması ve bakımının yapılması için yapının işlevsel değeri etkili olmuştur. Yapının bakımı kullanıcılar tarafından yapılmış, kullanıcının kararına bağlı olarak onarılmıştır. Ancak günümüzde tarihi yapıların, anıtların, çevrelerin yaşaması rastlantılara bırakılmamakta, ulusal ve evrensel kültürün bir bileşeni ve uygarlık belgesi olarak korunmaları amaçlanmaktadır [1].

"Kültürel ve doğal mirasın korunması kavramının gelişmesi ile bu konuda uzmanlık alanları ortaya çıkmış, konu ile ilgili ölçütler belirlenmiş, yasal düzenlemeler yapılmıştır. Bu amaçla, dünyada 20. yüzyılın başlarından itibaren örneğin; 1931 yılında Carta Del Restauro [2] ve 1964 yılında Venedik Tüzüğü [3] gibi yasal sorumluluklar getirilmiş, temel ilkeler belirlenmiştir. Bu ilkelere göre; onarım uzmanlık gerektiren bir iştir ve amacı anıtın estetik ve tarihi değerini ortaya çıkarmak ve korumaktır. Bunun sağlanması için, onarımda, özgün malzeme kullanılmalı, güvenilir belgelere saygı duyulmalı ve bu belgelere bağlı kalınmalıdır. Eksik kısımlar tamamlanırken yenilenen kısım bütün ile bağdaşmalı ancak onarım sanatsal ve tarihi tanıklığı yanıltmamalı, özünden ayırt edilebilir nitelikte olmalıdır" [1].

Tarihi yapıların bilinçli olarak korunması, doğru bir şekilde onarılması ve sağlamlaştırılması gereklidir. Tarihi yapılarda, bir ya da birden fazla nedenle meydana

gelen hasarların onarımı ve yapının sağlamlaştırılması sırasında öncelikle yapının hasara uğramasına neden olan faktörler ortadan kaldırılmalı, daha sonra yapıdaki hasar türüne göre onarım için uygun yöntem belirlenip uygulaması yapılmalıdır.

Doğal afetler, atmosfer etkisi, yapıların bulunduğu zemin özellikleri, hatalı yapı malzemelerinin kullanımı, yapı tasarımındaki hatalar, savaşlar, bitkiler - hayvanlar, yangınlar gibi çeşitli nedenlerle tarihi yapılarda bozulmalar ve hasarlar gözlemlenmektedir. Bu hasarların onarımı sırasında özgün malzeme özellikleri deneyler ile belirlenmeli, onarımda kullanılacak yeni malzemenin özgün malzemeye benzer özellikler göstermesi sağlanmalıdır.

Şerbet enjeksiyonu (grouting), tarihi yapıların onarım ve restorasyonunda veya mimari elemanlarda sürekli boşlukların bulunduğu durumlarda çatlakların doldurulmasında kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Yöntemin genel amacı çatlakların doldurulması, tarihi yapının mekanik dayanımının artırılması ve mimari elemanlarda sürekliliğin sağlanmasıdır [4].

Miltiadou ve diğ. (2007) [5] ürettikleri şerbetleri tarihi bir yapının onarımda kullanmış, yığma taş model duvarlar üzerinde uygulamanın ve üretilen malzemenin uygunluğunu değerlendirmişlerdir. Uranjek ve diğ. (2011) [6] ise, farklı ticari enjeksiyon malzemeleri ile, yığma taş model duvarlar üzerinde tahribatlı ve tahribatsız deneyler yaparak uygulamanın kalitesini incelemişlerdir. Ancak ticari amaçla üretilen hazır enjeksiyon malzemelerinin özgün malzeme ile uygunluğu incelenmemiş, tuğla duvarlar üzerinde uygulama kalitesinin değerlendirilmesi için hiç bir çalışma yapılmamıştır.

Şerbet enjeksiyonunun (grouting) sıklıkla onarımlarda kullanılmasına karşın malzeme üzerinde yapılan deneyler yeterli değildir. Özellikle, ticari amaçla üretilen enjeksiyon malzemeleri hakkında çalışmalar çok kısıtlıdır. Ticari amaçla üretilen enjeksiyon malzemelerinin kullanımı ve uygulama yöntemi üretici firmaya bağlı kalınarak gerçekleştirilmektedir. Enjeksiyon malzemelerinin uygulama kalitesi hakkında firmalar garanti vermekte ancak, ürünlerin teknik kılavuzlarında ve reçetelerinde ürün kompozisyonları hakkında yeterli teknik bilgi bulunmamaktadır. Enjeksiyon şerbetinin (grout) özgün malzeme ile uyumluluğu test edilmemekte, malzemenin gerekli ön

testleri yapılmamakta (ön koşullar sağlanmamakta) , şerbet enjeksiyonu doğrudan tarihi yapıya uygulanmaktadır.

Oysa ki, şerbet enjeksiyonu geri dönüşü olmayan bir yöntemdir. Gerekli deneyler ve analizler yapılmadan, bilinçsiz uygulanan enjeksiyon tarihi yapılarda onarım sağlamanın aksine öngörülemeyen hasarlara neden olabilir.

1.2 Tezin Amacı

"Tarihi ve geleneksel alanların, tüm insanlığın günlük çevrelerinin bir parçası ve bu alanların tarihin yaşayan temsilcileri olduğu, toplumların farklılığına uyum sağlayabilmek için gerekli olan hayati çeşitlilik arka fonunu oluşturduğu ve böylece değer kazandıkları ve insani bir boyut edindikleri" [7] göz önünde bulundurulursa, geçmişle günümüz arasında köprü oluşturan mimari mirasın korunması, onarımı ve sağlamlaştırılması konularında yapılan ve yapılacak çalışmalar çok büyük öneme sahiptir. Tarihi binanın değeri sadece dış görünümünde değil, zamanının ve bulunduğu yerin yapı teknolojisini de simgeleyen tüm bileşenlerinin bütünlüğündedir.

Kültürel mirasın bir parçası olan tarihi yapılar zaman içerisinde çeşitli nedenlerle hasara uğramaktadır. Tarihi yapıları korumak ve sonraki nesillere aktarılmasını sağlamak için, oluşan hasarları onarmak ve yapıyı sağlamlaştırmak gerekebilmektedir. Tarihi yapılarda, bir ya da birden fazla nedenle meydana gelen hasarların onarımı ve yapının sağlamlaştırılması sırasında öncelikle yapının hasara uğramasına neden olan faktörler ortadan kaldırılmalıdır. Daha sonra yerinde ve laboratuvarda yapılan hasarlı ve hasarsız testlerle yapıdaki hasar türüne bağlı olarak onarım için uygun yöntem belirlenmelidir. Ancak belirlenen yöntemin uygulaması yapılmadan önce, çeşitli ön deneyler ve laboratuvar çalışmaları ile özgün malzeme ile uyumluluğu araştırılmalıdır.

Bu çalışma kapsamında incelenen ve tarihi yığma yapıların onarımında kullanılan enjeksiyon yöntemi (grouting) geri dönüşü olmayan bir yöntem olduğu için tarihi yapıya uygulaması yapılmadan önce standartlarda yer alan ön koşullar sağlanmalıdır. Kimyasal, fiziksel ve mekanik deneyler ile özgün malzemeyle uyumluluğu araştırılmalı; mekanik performansı değerlendirilmelidir.

Bu çalışmanın amacı tarihi yapıların onarımında yaygın olarak kullanılan kireç esaslı hazır enjeksiyon şerbetlerinin reolojik, mekanik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesinin ve özgün malzeme özellikleriyle karşılaştırılmasının yanı sıra bu malzemeler ile onarılmış bir sıra tuğla yığma test duvarlarının enjeksiyon öncesi ve sonrası mekanik performansının değerlendirilmesidir.

1.3 Hipotez

Tarihi yapılar; coğrafi bölge özelliklerine, yapım dönemlerine, özgün malzeme özelliklerine, malzeme hazırlama yöntemlerine ve özgün yapım tekniklerine göre çok önemli farklılıklar göstermektedir. Dolayısıyla tek bir malzemeyi birbirinden farklı özelliklere ve hasarlara sahip her türlü yapıya uygulamak özgün malzeme ile uyum göz önüne bulundurulduğunda doğru bir onarım biçimi değildir. Tarihi yapıların onarımı sırasında sıklıkla kullanılan hazır şerbet enjeksiyonunun gelişigüzel her türlü yapıda uygulanmasının önüne geçilmesi de dünya mirasını koruma bakımından büyük önem taşımaktadır [4].

Koruma alanında yapılan bilimsel çalışmalarda (yasa, tüzük, vb.) belirtildiği gibi; onarım sırasında bir tek malzemeyi her türlü özgün malzeme ile beraber kullanmak yerine, her yapının özgün malzeme özellikleri ve uygulama yapılabilecek malzeme özellikleri tek tek incelenerek, onarım sırasında özgün malzemeyle benzer özellikler gösteren malzemelerin seçilmesi, ön deneylerinin yapılması, hatta belki de yeniden üretilmesidir.

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada; ilk olarak, ticari enjeksiyon şerbetinin reolojik ve mekanik özelliklerinin analiz edilmesi; daha sonra, şerbet enjeksiyonunun performansını değerlendirebilmek için, ile 19. yüzyılda kullanılan tuğlalardan bir tip referans alınarak, özgün yapı malzemesine uygun bir sıra tuğla yığma model duvarlar üretilmesi ve bu duvarların düşey ve yanal yükler altında test edilmesinin yanı sıra; yükleme sonrası oluşan çatlakların şerbet enjeksiyonu ile onarılması; enjeksiyon öncesi ve sonrası yük-yer değiştirme davranışının, düşey ve yanal yükler altında test edilerek değerlendirilmesinin yapılması öngörülmüştür. Böylece, ticari enjeksiyon şerbetinin özgün malzeme ile uyumluluğu da araştırılmış olacaktır.

Bu çalışma; tarihi yığma yapılarda kullanılan malzemeler ve taşıyıcı elemanlar, hasarlar ve nedenleri, uygulanan hasar tespit yöntemleri ve onarım metotlarını içeren, deneysel çalışmaları destekleyici literatür çalışmaları ile tarihi yapıların onarımı için kullanılan iki farklı ticari enjeksiyon şerbetinin karışım prosedürünün oluşturulması, ön deneyleri, gerekli fiziksel, mekanik ve mineralojik deneyleri ile malzeme özelliklerinin analiz edilmesi ve enjeksiyon şerbetinin performansının değerlendirilebilmesi için; laboratuvar ortamında İngiliz örgü biçimiyle, 19. yüzyılda kullanılan tuğlalara uygun harman tuğlası ve hidrolik kireç ya da hava kireci esaslı harçlarla örülmüş tek sıra tuğla yığma model duvarların üretilmesi ve bu duvarların düşey ve yanal yükler altında test edilmesinin yanı sıra; yükleme sonrası oluşan çatlakların şerbet enjeksiyonu ile onarılması; enjeksiyon öncesi ve sonrası (28. gün) duvarların yük-yer değiştirme davranışının, düşey ve yanal yükler altında test edilerek enjeksiyon şerbetinin performansının değerlendirilmesi, çatlak haritalarının çıkarılması, ultrases ölçümü ile değerlendirmenin kontrolünün yapılması ve sadece tuğla ya da tuğla-harç karışımları ile üretilen silindir enjeksiyon deneyleri ile analizlerin desteklenmesini içeren deneysel çalışmalar ile sınırlandırılmıştır.

TARİHİ YIĞMA YAPILARDA KULLANILAN MALZEMELER VE TAŞIYICI ELEMENLER

20.yy'ın ortalarına kadar önemli bir yapı teknolojisi olan yığma kâgir yapılar yüzyıllarca ayakta kalabilmişlerdir. Ağır ve rijit yapılar olan tarihi yığma yapıların dayanımı; yığma blokların basınç dayanımına bağlıdır. Çekme gerilmeleri malzemenin yüksek basınç dayanımı ve bloklar arasındaki sürtünme dayanımı ile karşılanan tarihi yığma yapıların düşey ve yatay yüklere dayanımı; kullanılan malzeme dayanımına, yığma blokların birleştirme şekline ve geometrisine bağlıdır [8]. Tarihi yığma yapılarda kullanılan malzemeler ve taşıyıcı elemanlar yapım sistemlerini belirlerler.

Yapı malzemeleri, kullanıldıkları yapıların davranışlarında belirleyici bir rol oynarlar. Tarihi yığma yapılarda kullanılan harç, tuğla ve taş gibi malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin anlaşılması, bu yapılarda koruma, onarım, sağlamlaştırma vb. çalışmaların bilimsel yöntemlerle yapılabilmesi için önem taşımaktadır. Tarihi yığma yapılarda kullanılan malzemeler, kullanılış yer ve amacına göre;

- Taşıyıcı malzemeler (taş, tuğla, kerpiç, beton...)
- Koruyucu malzemeler (taş, tuğla, ahşap, beton, bitüm, polistren...)
- Süsleyici malzemeler (taş, tuğla, ahşap, cam, alçı...)

olarak sınıflandırılabilir [9].

Tarihi yığma yapılarda en çok taşıyıcı sistem malzemesi olarak; ahşap, doğal taşlar, kerpiç, tuğla, harç ve beton kullanılmıştır. Bu malzemeler küçük boyutta olduğu için oldukça plastik, eğrilikli yapılar yapılabilmektedir. Yığma yapıları oluşturan malzemeler;

genel olarak dış etkilere dayanıklı, sünekliği az, gevrek, basınca dayanımlı, çekmeye karşı çok zayıf malzemelerdir [8].

Bu çalışma kapsamında tarihi yığma yapı malzemesi olarak tuğla ve harçlar ele alınmıştır.

2.1 Tarihi Yığma Yapı Malzemesi Olarak Tuğla

Bir çeşit gözenekli seramik olan tuğlalar, çok eski çağlardan beri insanların farklı amaçlar için ürettiği ve kullandığı malzemelerdir. Arkeologlar, insan yapımı seramiklerin günümüzden 24000 yıl öncesinde var olduğunu işaret etmektedir [9]. Akad ve Babilliler duvar kuruluşunda, kanalizasyon sisteminde ve yazı tabletlerinde pişmiş toprak malzemeyi geniş anlamda kullanmışlardır [10].

Tuğla, killi toprağın ve balçığın suyla yoğrulup kalıplanmasından sonra kurutulup yüksek sıcaklıklarda fırınlarda pişirilmesiyle elde edilen bir yapı malzemesidir [11,12,13]. Yüzer ve Ekşi-Akbulut'a [9] göre tuğlaların pişirme sıcaklığı 800-1000 °C, Arun'a [8] göre ise 600 – 1200°C 'dir.

Bayraktar'a [14] göre tuğlaların puzolanik özellik göstermesi için pişirme sıcaklığı 700 – 900°C arasında olmalı ve bünyelerinde puzolanik özellik sağlayacak miktarda kil mineralleri bulunmalıdır. Ancak, her tuğla puzolan özelliğe sahip değildir ve puzolanik özelliği olmayan tuğlaların dayanımı düşüktür. Bu nedenle, yeni tekniklerle üretilen veya geleneksel ocaklarda pişirilen tuğlaların mutlaka puzolanik özellikte olup olmadığı kontrol edilmeli, puzolan özelliğe sahip olmayan tuğlaların tarihi yapıların onarım ve sağlamlaştırılmasında kullanılmamasına özen gösterilmelidir [14].

Fırın teknolojisinin bulunmadığı yerlerde, bazı tarihi yapılarda kullanılan tuğlaların doğrudan güneş ısısı altında üretilmiş olanlarına da rastlanmaktadır [15]. 1830'lardan sonra ise basınca daha dayanıklı olduğu için pişmiş tuğla, pişmemiş tuğlanın yerini almaya başlamıştır [16]. Sıcaklık arttıkça gözeneklerin azaldığı bilinmektedir. Gözenekli ve gözeneksiz pişmiş toprak malzemeler, dokusu, sertliği, mukavemeti ve su emmesi açısından birbirinden farklı özellikler gösterir [10].

Tuğlaların dayanımı kullanılan kilin cinsine, yapım yöntemine ve pişirildiği sıcaklığa bağlıdır [16]. Tuğlanın hammaddesinde kil (kaolin, illit, vs), kuvars, feldspat az miktarda

demir ve magnezyum bulunmaktadır. Su ile yoğrulan bu karışım 600–900°C ısıtılırsa kil minerallerin mevcut yapıları bozulmakta ve amorf alümine silikatlar oluşmaktadır. Kil mineralleri bünye özelliklerine göre farklı puzolanik sıcaklık özelliğine sahiptirler [14].

Tuğlaların donmaya karşı dayanımı, tuğla yüzeyinin pul pul olmamasından anlaşılmaktadır. Su geçirimsizliği önemli olmakla birlikte, ısı geçirgenliği diğer yapı malzemelerine kıyasla oldukça yüksektir. Genellikle pişmiş toprak malzemeler, kimyasal ve mikroorganizma etkilerine karşı dayanıklıdır [10].

Yapıda kullanılan fabrika tuğlasının ortalama basınç dayanımı 6-10 kPa dır. Tuğla porozitesi (boşluk hacmi/tuğla hacmi) %25 in üzerinde ise basınç dayanımı giderek azalır. Tuğlaların ortalama mekanik özellikleri Çizelge 2.1 de verilmiştir.

Çizelge 2. 1 Tuğlaların ortalama mekanik özellikleri [19,20]

Basınç Dayanımı (f_b , Mpa)	Çekme Dayanımı (f_c , Mpa)	Kayma Dayanımı (f_{kv} , Mpa)	Elastisite Modülü (E , Mpa)
10-30	2.7 -5.0	10-20	15.000- 30.000

Tuğlaların boyutları kullanıldıkları döneme göre değişiklik gösterir. Örneğin, Osmanlı mimarlığında endüstrileşme öncesi tuğlalar tam tuğla, yarım tuğla ve battal tuğla olarak üç farklı boyutta üretilmişlerdir [17]. Genel olarak tuğlalar, taşıyıcı eleman oluşturmak için tam, yarım, çeyrek vb boyutlarda kullanılır ve taşıyıcı eleman taşıyacağı düşey yüke göre 1, 1.5 ya da 2 sıra olarak örülür [8]. Tuğla, yapıya derzleri şaşırtmalı biçimde, yataylığı, köşe teşkili ve duvar bağlantıları konusunda özen gösterilerek uygulanmalıdır [10].

Tuğla, yığma yapı duvarlarında taşıyıcı malzeme olmanın yanı sıra geleneksel Türk evlerinde ahşap karkas içinde dolgu malzemesi olarak da yer almıştır. Avrupa mimarisi içinde de tuğla kendine yaygın bir kullanım alanı bulmuştur.

Modern tuğlaların kullanımı Osmanlı Devletinde 19.yüzyılın ilk çeyreğinde ithal fabrikasyon tuğla kullanımı ile başlamıştır [18]. 19. yüzyılda ve 20. yüzyılın başında ise İstanbul'da fabrikasyon tuğla üretimi yapan bir kısım imalathanenin varlığı bilinmektedir [16].

Bu çalışma kapsamında üretilen duvarlarda 19.yüzyıl fabrikasyon tuğlaları boyutları açısından referans alınarak (EK-B) dolu harman tuğlası kullanılmıştır. TS EN 771-1:2011+A1 [21] e göre: "Harman tuğlası kil, killi toprak ve balçığın ayrı ayrı veya birlikte yoğrulup gerektiğinde su, kum, öğütülmüş tuğla ve kiremit tozu ve benzerleri ile karıştırılarak şekillendirildikten sonra kurutulup genellikle harman yerinde ocaklarda pişirilmesi yolu ile elde edilen ve duvar yapımında kullanılan bir malzemedir." Harman tuğlasının fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2.2 de verilmiştir.

Çizelge 2. 2 Harman tuğlasının fiziksel ve mekanik özellikleri [10]

HARMAN TUĞLASI	FİZİKSEL ÖZELLİKLER	MEKANİK ÖZELLİKLER	
	Birim Ağırlık (ρ , g/cm ³)	Basınç Dayanımı (f_b , Mpa)	Elastisite Modülü (E , Mpa)
Dolu	1.8	3-5	5000
Düşey delikli	1.4	3-5	5000

2.2 Tarihi Yığma Yapılarda Kullanılan Harçlar

İlk harç uygulamaları tarihte kil harçları olarak karşımıza çıkmaktadır [10]. Romalılarla birlikte, kireç harcı kullanılmaya başlanmış, daha sonra, kum kireç karışımının içine pişmiş kil veya puzolan denilen volkanik tüfün karıştırılması ile su karşısında sertleşen bir bağlayıcı elde edilmiştir. Tarihi yığma yapılarda özellikle, Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı mimarisinde ise horasan harcı kullanılmıştır [22]. Horasan harcı; genel olarak "yapay puzolanik malzeme kullanılarak hazırlanan kireç harcı" olarak tanımlanabilmektedir [23].

"Harçlar ve sıvalar, agrega denilen ince daneli malzemelerin matris denilen bir bağlayıcı hamur ile bir araya getirilmesi sonucu elde edilen plastik şekil vermeye elverişli kompozit malzemelerdir" [9].

Yığma yapıda harçlar; taş, tuğla, kerpiç gibi yapı bileşenlerini birbirlerine bağlarlar. Böylece harç bileşene gelen basınç yüklerini dağıtarak, yığma yapı elemanının bir bütün olarak davranmasına yardımcı olur.

Harçların basınç dayanımı; taş, tuğla gibi yapı bileşenleri ile kıyaslandığında daha sınırlı olsa da aslında bu dayanım bir harç için yeterlidir ki günümüzde bir çok tarihi yapının

yıkımında güçlük çekilmektedir. Yıkım sırasında taşın, tuğlanın kırıldığı ancak harcın taş ya da tuğladan ayrılmadığı gözlemlenmiştir [1].

Harç içerisinde kullanılan agreganın cinsi, dane boyu, granülometrisi, bağlayıcının cinsi, miktarı ve su/bağlayıcı oranı, işçilik ve bakım harcın basınç dayanımını etkilediği ve doluluğun, harca dayanım, geçirimsizlik, dış etkilere karşı dayanıklılık gibi birçok özellik kazandırdığı bilinmektedir. Doluluğun sağlanması için granülometri şartlarına uyulması, işlenebilirliğin sağlanması koşulu ile su/bağlayıcı oranının düşürülmesi, rötrenin kontrol edilmesi koşulu ile bağlayıcı miktarının artırılması gerekmektedir. Kireç ve melez harçların yüksek aderansa (bağlayıcının uygulandığı yüzeyin malzemesine, pürüzlülüğüne ve nemliliğine bağlı olarak harcın yüzeye yapışma gücü) sahip olduğu söylenebilir [1].

Bağlayıcının cinsine göre hidrasyon nedeni ile harçta kimyasal reaksiyonlar meydana gelebilir. Karma suyunun bünyesinden ayrılması ile harçlarda hacim değişikliği görülür ve rötre çatlakları oluşabilir. Bu çatlaklar geçirimsizliği artırıcı ve dayanımı düşürücü niteliktedir. Sıcaklık derecelerinin yükselmesi harçların katılaşmasını hızlandırmakta, düşmesi ise geciktirmektedir. Güneş ve rüzgâr etkisi ile meydana gelen buharlaşma, hidrasyonun tamamlanmasını engellemektedir. Bu olumsuz etkiyi önlemek için yüzeylerin rutubetli ortamda tutulması faydalı olmaktadır [1].

Tarihi yığma yapıları oluştururken, harçlarının hazırlanması sırasında harcın fiziksel özelliklerini geliştirmek ve karbonatlaşmayı hızlandırmak amacıyla harca kan, yumurta, peynir, gübre, Arap zamkı, hayvan tutkalı, bitki suları, kazein gibi organik ve inorganik maddeler katılabilmektedir [9]. Bu çalışma kapsamında oluşturulan harçlar su, bağlayıcı ve agregaları içermektedir. Herhangi bir katkı maddesi kullanılmamıştır.

2.2.1 Tarihi Yığma Yapılarda Kullanılan Harç İçerisindeki Bağlayıcılar

Bilinen en eski bağlayıcılar, Asya'da kullanılmışlardır. Bağlayıcılar, su ile karıştırıldıklarında ya da havada plastik özellik kazanan inorganik ya da organik kökenli çok ince taneli toz malzemelerdir. Bağlayıcılar,

Kökenine göre;

- Organik kökenli bağlayıcılar (zift, katran, çeşitli tutkallar vb.)

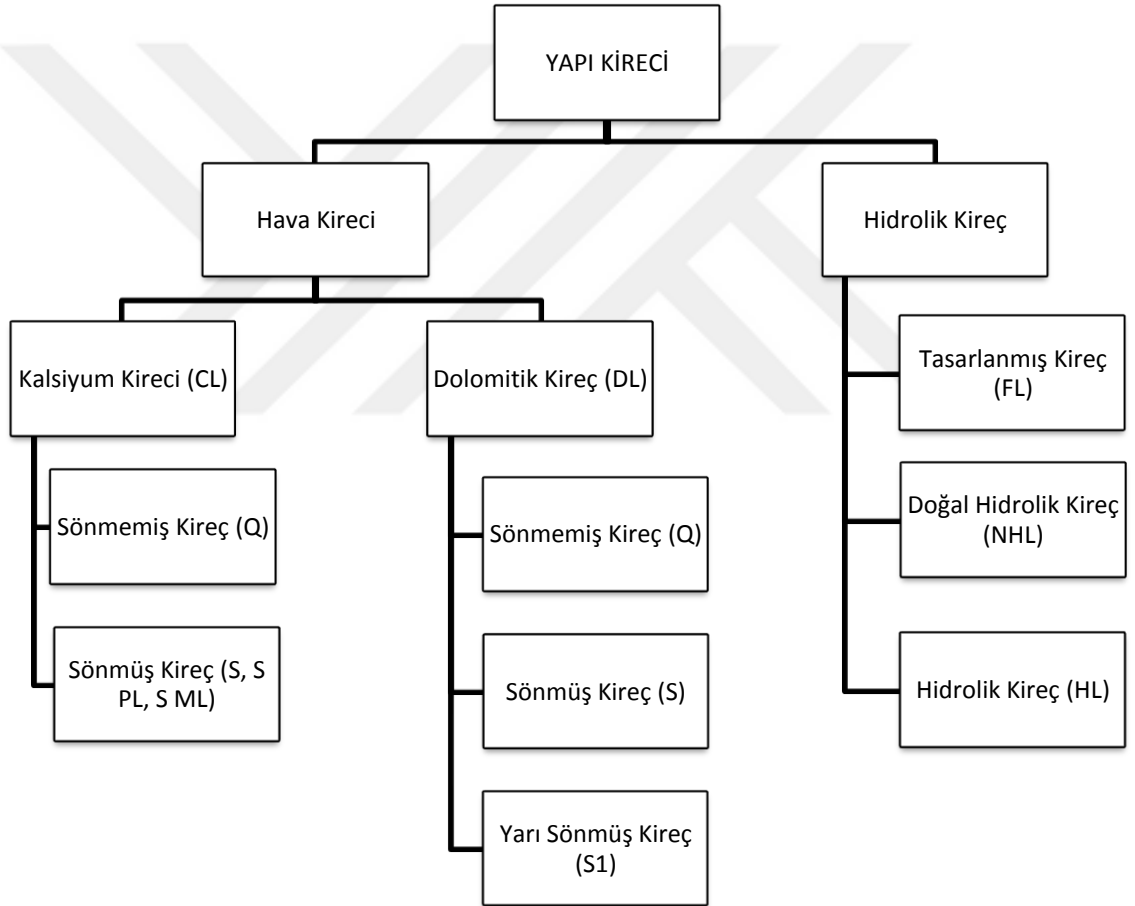
- İnorganik kökenli bağlayıcılar (alçı, hava kireci, kireç+puzolan karışımları, hidrolik kireç, vb.)

Katılaşmasına göre;

- Havada katılaşanlar (hava kireci ve organik kökenliler)
- Su içinde katılaşanlar (kireç+puzolan karışımları, hidrolik kireç)

olarak sınıflandırılabilirler.

TS EN 459-1'e [24] göre yapılardaki harçların içerisinde bağlayıcı olarak kullanılan kireçler Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Q : Kuru toz veya topak halinde sönmemiş kireç

S : Kuru toz hâlinde sönmüş kireç

S1 : Kuru toz hâlinde yarı sönmüş kireç

S PL : Kaymak kireç

S ML : Kireç sütü

Şekil 2. 1 Yapılardaki harçların içerisinde bağlayıcı olarak kullanılan kireçler [24]

Bağlayıcılardan; yeterli dayanıma sahip olması, dağınık fazı (agregaları) homojen olarak birleştirmesi, ara yüzde sürekliliği sağlaması, gelen yükü esas taşıyıcı olan dağınık faza aktarması ve atmosfer etkilerine karşı dayanıklı olması beklenir. İnorganik bağlayıcılarda bu özellikler; bağlayıcının cinsine, pişirme sıcaklığına ve inceliğine bağlıdır. Pişirme sıcaklığı ve incelik arttıkça bağlayıcılık özelliği artar [9].

Tarihi yapılarda harç ve sıvaların dayanımlarını artırmak için bağlayıcı ve agreganın dışında puzolanik özellikte katkı maddelerinin kullanıldığı bilinmektedir.

Tarihi Yapılarda Kullanılan Harç İçerisindeki Bağlayıcı Olarak Hava Kireci

Hava kireci çok eski çağlardan beri kullanılan bir bağlayıcıdır. Eski Babilliler, Mısırlılar, Fenikeliler, Hititler ve Persler tarafından yapıda bağlayıcı olarak kullanılmıştır [10].

Kirecin hammaddesi, kireç taşı, tebeşir, kavkı gibi doğal oluşmuş kalsiyum karbonat veya dolomitik kireç taşı ve dolomit gibi doğal oluşmuş kalsiyum magnezyum karbonat esaslı taşlardır [10,24].

Atmosferdeki karbondioksit ile reaksiyona girerek havada sertleşen hava kireci, kalsiyum kireci (CL) ve dolomitik kireç (DL) olmak üzere iki alt gruba ayrılır [24]. Kalsiyum kireci beyaz, dolomitik kireç esmer renklidir [10].

Kireç (2.1a ve 2.1b) reaksiyon denklemlerinde görüldüğü gibi 900-1000°C sıcaklıkta pişirilir [9].



Elde edilen toz haldeki maddeye (CaO, MgO) "sönmemiş kireç" denir.

Sönmemiş kireç (kalsiyum oksit, CaO), su ile karıştırılınca, (2.2a ve 2.2b) reaksiyon denklemlerinde görüldüğü gibi hidrate [kalsiyum hidroksit, Ca(OH)₂] olur, bağlayıcılık özelliği kazanır. Hidrate kirece "sönmüş kireç" denir [9].



Sönmüş kireç, havadan karbondioksit alarak (2.3) reaksiyon denkleminde görüldüğü gibi karbonatlaşır ve katılaşır [9].



Söndürülmüş kirecin bekletilme süresi uzadıkça, plastik özelliği ve su tutma kapasitesi artmaktadır. Roma döneminden beri, söndürülmüş kireç uzun yıllar hava ile temas etmeden bekletildikten sonra kullanılmaktadır. Bekleme sürecinde kireç kristallerinin (portlandit) boyutları küçülmekte ve havanın karbondioksiti ile reaksiyona girecek yüzey alanı artarak karbonatlaşma daha hızlı gerçekleşmektedir [9].

Hava kireçlerinin diğer bir özelliği de suda erimesidir (1lt suda 1.3 g). Suyu ve dış ortam etkilerine karşı dayanıklı olmayan hava kireci harcının dayanımının ve dayanıklılığının artırılması için kirece; tuğla tozu, volkan tüfü, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, pirinç kapçığı, buğday sapı vb. puzolanik özelliği olan malzemeler katılır [10].

Kirecin kalitesine ve sönmemiş kirecin reaktifliğine yumru büyüklüğü, gözenekliliği, gözeneklilik dağılımı gibi fiziksel özellikleri ve kalsiyum karbonat kristallerinin büyüklüğü etki eder. Bunların yanı sıra su/kireç oranları, sönmemiş kirecin saflığı, parçacık büyüklüğü, pişirme sıcaklığı, karıştırma, söndürmede kullanılan suyun saflığı da kirecin özelliklerini etkileyen etkenlerdir [25].

Bu çalışmanın deneysel bölümünde kullanılan hava kireci, TS EN 459-1 [24] e göre "sönmüş kireç biçimindeki kalsiyum kireci" olarak tanımlanan CL 80-S tip hava kirecidir.

TS EN 459-1 [24] e göre kalsiyum kirecinin, karakteristik değerler olarak verilen kimyasal gerekleri Çizelge 2.3'te verilmiştir.

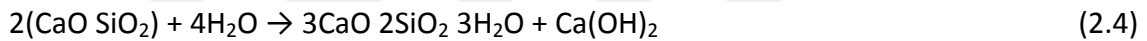
Çizelge 2. 3 Kalsiyum kirecinin, karakteristik değerler olarak verilen kimyasal gerekleri [24]

Kalsiyum Kireci Tipi	Kütlece yüzde (%) olarak verilen değerler				
	CaO + MgO	MgO	CO ₂	SO ₃	Serbest kireç
CL 90	≥ 90	≤ 5	≤ 4	≤ 2	≥ 80
CL 80	≥ 80	≤ 5	≤ 7	≤ 2	≥ 65
CL 70	≥ 70	≤ 5	≤ 12	≤ 2	≥ 55

Tarihi Yapılarda Kullanılan Harç İçerisindeki Bağlayıcı Olarak Hidrolik Kireç

Hidrolik kireç; Eriç'e [10] göre bilinen en eski bağlayıcılardan biridir, Roma döneminde bulunmuş ve su içi inşaatlarında kullanılmıştır. Postacioğlu'na [26] göre ise 18. yüzyıl'ın ikinci yarısından itibaren "marn" denilen killi kirecin 1000-1200°C gibi hava kirecine göre daha yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile hidrolik kireç elde edilmiştir.

Esas olarak kalsiyum hidroksit, kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminatlardan oluşan hidrolik kireç, bileşiminde %10 dan fazla kil bulunan killi kalkerin (CaCO_3 2SiO_2 AlO_3 $2\text{H}_2\text{O}$ Fe_2O_3) 1100 – 1200 °C sıcaklıklarda pişirilmesi ve öğütülmesi ile elde edilir. Pişirme sonucu, ağırlıklı olarak 2CaO SiO_2 (C_2S) karma oksidi ve sönmemiş (CaO) kireç oluşur. Bu karma oksidin hidratasyonunun reaksiyon denklemi (2.4) sonucu oluşan hidrate ürün (C-S-H), suya karşı dayanıklıdır, sudan etkilenmez ve havanın yanı sıra su içinde de katılaşma özelliği gösterir [9,24].



Hidrolik kireç; doğal hidrolik kireç (NHL), tasarlanmış kireç (FL) ve hidrolik kireç (HL) olmak üzere üç alt gruba ayrılır [24].

Doğal hidrolik kireç (NHL), kil veya silis içeren kireç taşlarından üretilir, ilave herhangi diğer katkı maddeleri içermez. [24].

Bu çalışmanın deneysel bölümünde kullanılan hidrolik kireç, TS EN 459-1 [24] e göre "doğal hidrolik kireç" olarak tanımlanan NHL 3.5 tip hidrolik kireçtir.

TS EN 459-1 [24] e göre doğal hidrolik kirecin, karakteristik değerler olarak verilen kimyasal gerekleri ve basınç dayanımları Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2. 4 Doğal hidrolik kirecin, karakteristik değerler olarak verilen kimyasal gerekleri ve basınç dayanımları [24]

Doğal Hidrolik Kirecin Tipi	Kütlece yüzde (%) olarak verilen değer		Basınç Dayanımı (MPa)	
	SO_3	EN 459-2 [27] ye göre $\text{Ca}(\text{OH})_2$ olarak serbest kireç	7 Günlük	28 Günlük
NHL 2	≤ 2	≥ 35	-	≥ 2 ila ≤ 7
NHL 3.5	≤ 2	≥ 25	-	≥ 3.5 ila ≤ 10
NHL 5	≤ 2	≥ 15	≥ 2	≥ 5 ila ≤ 15

2.2.2 Tarihi Yığma Yapılarda Kullanılan Harç İçerisindeki Agregalar

Harç üretiminde ilk olarak kullanılan agrega malzemeleri toprağın kendisi olmuştur. Daha sonraları Mısır'da ve Horasan'da pişmiş toprak malzeme artıkları, Roma'da iri taş parçaları agrega malzemesi olarak kullanılmıştır [10].

Agregalar, mineral kökenli taneli malzemelerdir ve harcın dağılık fazını oluştururlar. Harcın işlenebilmesinde ve dayanımında en önemli etkenler; dane boyutu, biçimi ve dağılımıdır. Harçlarda en büyük dane boyutu 2-4mm olacak şekilde silika veya kalker esaslı kum ya da pişmiş kil kırıntıları kullanılır [9].

Bu çalışma kapsamında harç üretimi sırasında TSE EN 196-1 [28]e uygun olan silis esaslı CEN Standard Kumu kullanılmıştır. CEN Standard Kumunun TS EN 196-1' de tarif edilen tane büyüklüğü dağılımı Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Çizelge 2. 5 CEN standard kumu tane büyüklüğü dağılımı [28]

Kare Göz Açıklığı (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Elekte Kalan Yığılımlı (%)	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1

2.3 Tarihi Yığma Yapıların Taşıyıcı Duvarları

Tarihi yığma yapılarda taşıyıcı duvarlar, yapıdan gelen yükleri temele ileten elemanlardır. Hem düşey hem de yatay yükleri taşıyan tarihi yığma yapıların taşıyıcı duvarlarının bu yükleri karşılayabilmesi için bir bütün halinde çalışması gerekmektedir. Kuru (harçsız) birleşim yapılabildiği gibi duvarların bütünlüğünü sağlamak için duvar yapımında kullanılan tuğla ve taş malzemeler harç, kenet, hatıl vb. elemanlarla da bağlanmışlardır [8,29].

Kuru (harçsız) birleşim taş duvarların üst üste sıralanması ve bindirmeli örülmesi ile yapılır. Harçsız, herhangi bir kenetleme yapılmamış taş duvarlarla iki kat, bindirmeli ya da metal kenetlerle birleştirilmiş taş yapılarla 10 kat kadar yüksekliğinde yapılar yapılabilmektedir [8].

Taşıyıcı elemanları oluşturan taş, tuğla ya da kerpiç blokların çeşitli kalınlıkta harç ile bağlanması durumunda; taş ve tuğlalar, kireç harcı ya da çimento takviyeli harçla, kerpiç bloklar ise kil ile suyun karışımı olan kerpiç harcıyla birleştirilir.

Harçlı birleşimle oluşturulan kagir duvarlarda zayıf harç kullanılması, yanal yükler altında kagir blokların harç boyunca kaymasını sağlayarak kırılmasını önler [8,30]. Bu nedenle yüksek dayanımlı çimento harçlarının tarihi yığma yapıların onarımında kullanılması önerilmemektedir.

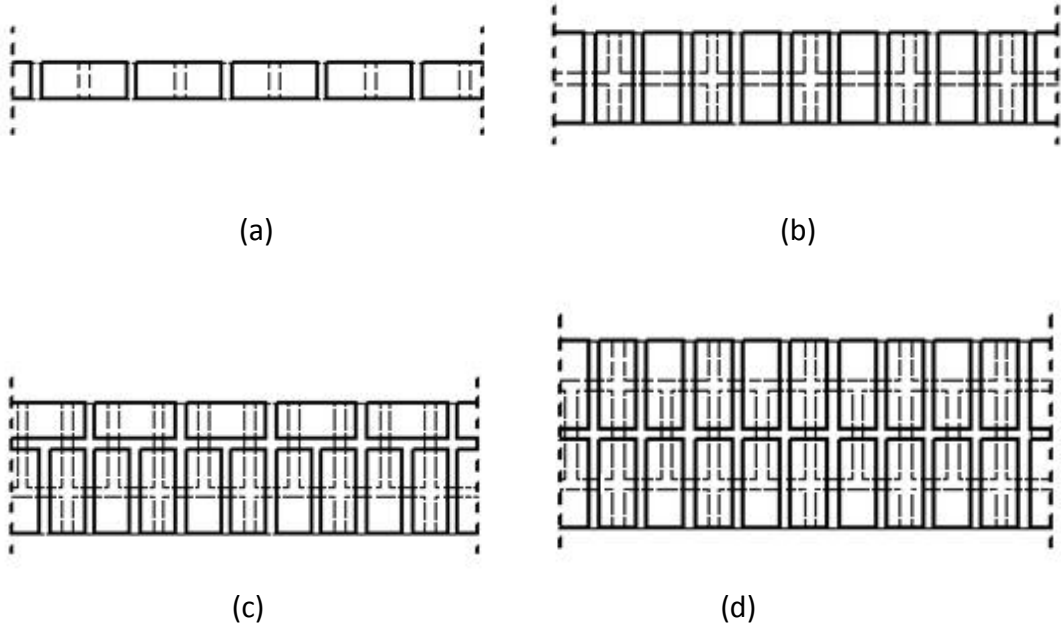
Yığma yapılarda duvar davranışı ve taşıyabileceği yük, duvar yüksekliğinin kalınlığına oranına (λ) narinliğine bağlıdır.

Duvar kalınlığı; $\lambda < 6$ ise kalın, $\lambda = 6-8$ ise orta, $\lambda > 8$ ise ince olarak adlandırılır.

Duvar kalınlığı ve narinliği (yükseklik/kalınlık) duvarların yatay kuvvetlere dayanımında etkilidir. Narinliği; 10'u geçmeyen tuğla duvarların ve 5'i geçmeyen kerpiç duvarların depremde iyi davrandığı gözlemlenmiştir [8].

Kalın bir kagir duvar dolu duvarsa tek cidarlı, dış duvar yüzleri arası boş ise iki cidarlı, dış duvar yüzleri arası moloz taş ve harçla dolu (sandık duvar) ise üç cidarlı olabilir. Tuğlalar, taşıyıcı eleman oluşturmak için tam, yarım, çeyrek vb boyutlarda kullanılır ve taşıyıcı eleman taşıyacağı düşey yüke göre 1, 1.5 ya da 2 sıra olarak örülür [8].

Bu çalışma kapsamında tek sıra tuğla duvarlar üretilmekle beraber yarım, bir, bir buçuk ve iki sıra tuğla duvar planları Şekil 2.2'de verilmiştir.

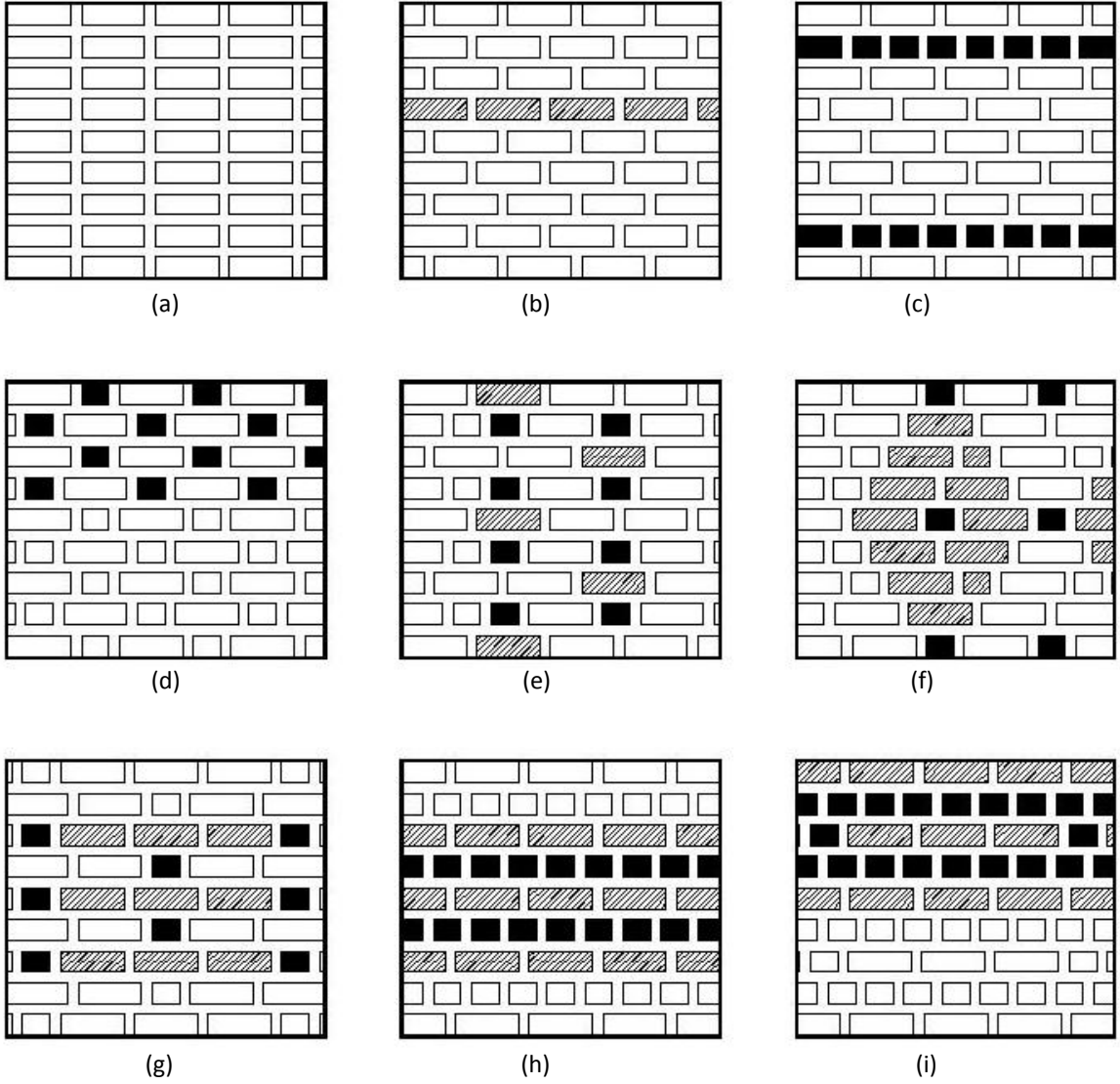


Şekil 2. 2 Tuğla duvar planları [31] (a) Yarım sıra tuğla duvar, (b) Tek sıra tuğla duvar, (c) Bir buçuk sıra tuğla duvar, (d) İki sıra tuğla duvar

Yığma yapı elemanlarını oluşturan blokların cinsi, birbirleri ile bağlanma şekli (kuru, harçlı vb.) ve narinliği olduğu gibi geometrik ilişkisi (örgü biçimi) de yapı davranışında önemlidir. Taş ve tuğla bloklar ile örülen duvarlarda kâgir bloklar yatay olarak dizilmeli, iki tabakanın derzleri üst üste gelmemeli, duvar yüksekliği boyunca düşey derz 45° açı yapmamalıdır. Zayıf dayanımlı taşlarla oluşturulan duvarlarda taşların açılı ya da taş ve tuğlanın alması dizildiği görülmüştür [8]. Duvarlar, düşey yükler altında duvarın şişip açılmasını önlemek ve duvarın burkulma boyunu azaltmak amacıyla belli seviyelerde uygun hatıllarla bağlanmalıdır [8].

Bu çalışma kapsamında üretilen duvarlarda İngiliz örgü biçimi kullanılmakla beraber sık kullanılan duvar örgü biçimleri Şekil 2.3'te verilmiştir.





Şekil 2. 3 Sık kullanılan duvar örgü biçimleri (a) Yığma örgü¹, (b) Dizi örgüsü², (c) Amerikan örgüsü³, (d) Flaman örgüsü⁴, (e) Flaman haç örgüsü⁵, (f) Flaman çapraz örgü⁶, (g) Bahçe duvarı örgüsü⁷, (h) İngiliz örgüsü⁸, (i) İngiliz haç örgüsü⁹ [32,33]

¹ Birleşim derzleri düşey olarak aynı hizada üs üste yerleştirilmiş dizi tuğlalarından oluşur.

² Genellikle boşluklu ve kaplama duvarlarda kullanılır, üst üste binen dizi tuğlalarından oluşur.

³ Dizi tuğlalarından oluşan her beş veya altı sırada bir bağ tuğlalarından oluşan sıra yer alır.

⁴ Her sırada birbirini takip eden bağ ve dizi tuğlalarından oluşur.

⁵ Değişimli bağ ve dizi tuğlalarından oluşan sıraların alt ve üstüne bağ sıraları örülerek yapılır.

⁶ Sıraların baklava örüntüsü oluşturulacak şekilde kaydırıldığı bir tür Flaman haç örgüsüdür.

⁷ Her sıra bir bağ ve üç dizi tuğlasından oluşacak şekilde örülür.

⁸ Birbirini izleyen sıralardan biri dizi, diğeri bağ tuğlalarından oluşacak şekilde örülür.

⁹ Bağ sıraları arasına bir bağ ve üç dizi tuğlasından oluşturulmuş bir sıra örülmesi ile oluşturulur.

TARİHİ YIĞMA YAPILARDA OLUŞAN HASARLAR, NEDENLERİ VE HASAR TESPİT YÖNTEMLERİ

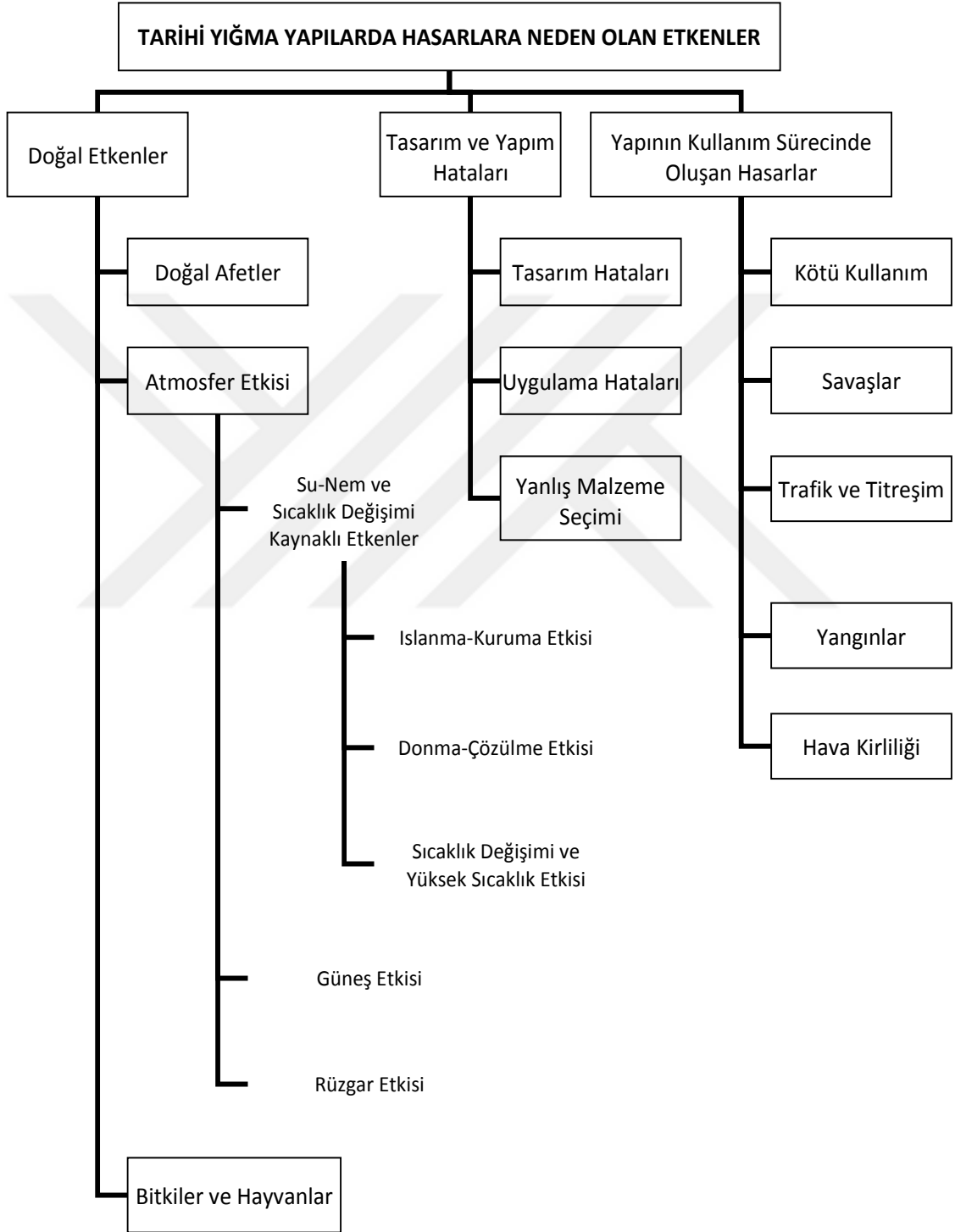
Yüzyıllardır ayakta kalabilmiş olan tarihi yığma yapılar çeşitli nedenlerle yapının fonksiyonu, yapım tekniği, yörenin şartları ve sonradan gördüğü onarımlara bağlı olarak bozulmalara uğrayabilir, hasar görebilir ve ömürlerini tüketebilirler. Hasarlar, malzeme, yapı bileşeni veya yapı elemanının karakteristik performansını olumsuz yönde etkileyen etken ve etkenler grubudur [34]. Kültürel değere sahip bu eserlerde oluşan hasarlar tespit edildikten sonra nedenleri araştırılıp, mümkünse ortadan kaldırılmalı ve kontrol altına alınarak aynı hasarların oluşmasının önüne geçilmeli; gerektiğinde ise mümkün olduğunca az müdahale ile onarılmalıdır [1].

3.1 Tarihi Yığma Yapılarda Hasarlara Neden Olan Etkenler

Her yapıya doğa kuvvetleri ya da insandan kaynaklanan yükler etkir. Yapıya düşey yatay ya da açılı etkiyen bu dış yükler, yapı elemanlarında çekme, basınç, eğilme, kayma ve burulma gibi gerilmeler oluşturur. Etkiyen yükler yığma malzemenin yığma dayanımını aştığında zayıf bölgeleri gösteren çatlaklar ortaya çıkar. Çatlaklar, çekme yönlerine dik başlar, sonra farklı yönlerle doğru ilerler. Yapıda oluşan hasarlar ya da kusurlar, yapı elemanının yük taşıma kapasitesini, kalıcılığını (durabilite) ve görünüşünü etkiler [8].

Tarihi yığma yapılarda en çok hasar gören malzemeler, yapıda kullanılan harç ve sıvalardır. Harç ve sıvaların onarımında da diğer tarihi yapı malzemelerinde olduğu gibi özgün malzemeye uyumlu yeni harç ve sıvalar üretebilmek çok önemlidir. Bunun için, orijinal harç ve sıvaların üretiminde kullanılan malzemeler ve zaman içerisinde görmüş oldukları değişimler ile bozulma nedenlerinin bilinmesi gerekmektedir [9].

Tarihi yapılarda zamana bağlı olarak; yer çekimi, doğal afetler, atmosferik etkiler, bitkiler-hayvanlar gibi doğal etkenler ve tasarım ile yapım hatalarının yanı sıra kötü kullanım, savaşlar, trafik-titreşim, yangınlar, hava kirliliği gibi kullanım sürecinde oluşan etkenler sonucunda hasarlar oluşur (Şekil 3.1).



Şekil 3. 1 Tarihi yığma yapılarda hasarlara neden olan etkenler

3.1.1 Doğal Etkenler

Uzun yıllar içerisinde yapılar doğanın değişik etkileri altında yıpranır ve sürekli bakımı sağlanamazsa ciddi hasarlar oluşur [34]. Doğal oluşumlar yok edilemez ve yapılar daima bu etkilere açıktır. Ancak doğa olaylarının ve doğal oluşumların yapılara etki biçimi, etki hızı ve nedenleri araştırılarak önlemler alınabilir ve yapıya olan olumsuz etkileri önemli derecede azaltılabilir.

Tarihi yapılar yapılarında hasarlara neden olan doğal etkenler tarihi yapıyı iç ortamdan ve dış ortamdan etkileyerek yapı bileşenlerinde ve malzemelerinde bozulmalara neden olmaktadır [1].

Doğal etkenler; yer çekimi, doğal afetler ve su-nem ile sıcaklık değişimi, güneş ve rüzgâr gibi atmosfer etkilerinin yanı sıra bitkiler ve hayvanlar olarak sıralanabilir.

Hasarlara Neden Olan Doğal Afetler

Büyük oranda veya tamamen insanların kontrolü dışında gerçekleşen, mal ve can kaybına neden olabilecek tehlikeli ve genellikle büyük çaplı olaylar olarak tanımlanabilecek doğal afetler; tarihsel süreç içinde yerleşik düzende yaşayan birçok medeniyetin ve bu medeniyetlerde üretilen kültürel, mimari, sembolik, dini yapıların yok olmasına neden olmuşlardır [1].

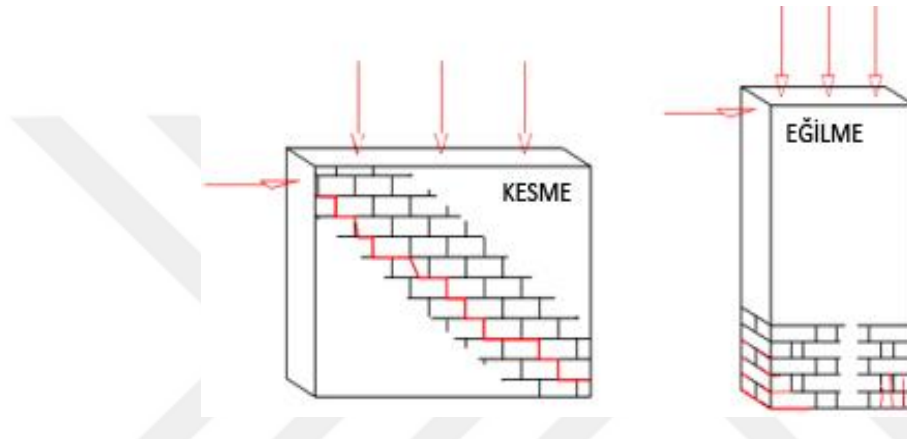
Doğal afetlerin; toprak kayması, yanardağ patlaması, sel, tayfun vb. gibi çeşitlilik göstermesinin yanında Türkiye’de en sık görülen doğal afet depremdir.

Deprem hareketi, yer kürede birikmiş olan büyük enerjinin yeryüzü kabuğu tabakalarındaki ani kırılmalarla açığa çıkmasıdır [35].

Türkiye gibi deprem kuşağı üzerinde bulunan ülkelerde tarih boyunca depremlere maruz kalmış bir çok kültürel miras halen deprem riski ile karşı karşıyadır. Her ne kadar risk altında olsalar da, bu tarihi yapılar daha önce birçok depreme direnç gösterdikleri için yapı sistemlerinin depreme dayanıklı olduğu söylenebilir. Yine de en değerli tarihi yapı alanlarından başlanarak, deprem riskine göre mikro bölgeler dikkate alınmalı, bunun için tarihi yapıların dokümantasyonları yapılmalı, rölöveleri çıkarılmalı ve belirli bir program içinde düzenli kontrolleri yapılmalıdır.

Deprem kuvvetleri duvara düzlemi doğrultusunda ya da düzlemine dik etkir. Deprem sırasında yığma kâgir yapılarda karşılaşılan başlıca hasarlar; duvarların düzlemi dışında devrilmesi, duvarların ayrılması, döşemelerin duvarlardan ayrılıp yıkılması ve duvar düzlemi içerisinde kesme çatlaklarının oluşması olarak sıralanabilir [8].

Yapıdaki çatlakların oluşum nedenlerinin bilinmesi onarım ve sağlamlaştırma kararlarının doğru alınması bakımından çok önemlidir. Çatlak yerleri ve yapı üzerindeki dağılımı, yapıdaki gerilme dağılışı ile çatlak oluşumunun nedeni hakkında fikir verecektir (Şekil 3.2) [36].



Şekil 3. 2 Yığma duvarda kesme ve eğilme etkisiyle oluşan çatlaklar [36]

Çatlaklar ortaya çıkarken duvardaki sürtünme, duvar düzlemi içindeki yer değiştirmeleri sınırlar. Ayrıca, duvarı oluşturan harcın zayıf olması, malzeme kırılması yerine harcın kırılmasıyla enerji sönümlenmesini sağlar. Çatlaklar oluşurken dinamik karakteristikler değişir; doğal frekans azalır, yer değiştirmeler artar. Eğer titreşim periyodu uzarsa yapının rijitliği azalır. Tekrarlayan yer sarsıntıları sayesinde diyagonal çatlaklar büyür ve yüzey, çatlakların kesişmesiyle bağımsız kırık duvar parçaları haline dönüşür. İnce duvarlarda diyagonal çatlaklar boyunca bu kırık bloklar kayıp duvar düzlemi dışına düşer. Uzun duvarların düzlemi dışındaki hareketi; duvar tabanında yatay, kesişen duvarlar boyunca düşey ya da diyagonal çatlaklar oluşturur. Döşemeye, çatıya, iç ve dış duvarlara iyi bağlanmamış duvarlar için tehlike oluşturan duvarın düzlemi dışında yer değiştirmesi; iki ya da üç cidarlı duvarın dış yüzeyinde ayrışma, birbirine iyi bağlanmamış dik duvarlarda ayrılma, herhangi bir yatay bağ elemanı olmayan duvarlarda devrilme ile sonuçlanır [8].



Şekil 3. 3 Simav depreminde Halil Ağa Camii'nde oluşan deprem çatlakları, 2011 [37]

Bu çalışma kapsamında incelenen tuğla yığma duvarlarda ise kullanılan malzemeler çok gevrek olduğu için küçük şiddetli depremlerde bile yapılarda önemli çatlaklar oluşabilir. Çatlakların yönü, biçimi ve genişliği yığma yapının dış duvarlarındaki pencere ve kapı boşluklarının yerine ve miktarına, duvardaki düşey gerilme ve gelen yatay deprem kuvvetine bağlıdır [38].

İlk aşamada kılcal olarak yalnızca sıvada oluşan çatlaklar, daha sonraki aşamada duvarın içine kadar işleyebilir. Çatlaklar genişleyip yayıldıkça duvar malzemeleri ezilip parçalanır ve duvardan parçalar ayrılıp dökülür [38].

Kılcal çatlaklar (0.3 mm kadar) genellikle pek göze batmaz. Daha büyük çatlaklar (0.3 mm-1.0 mm) da göze batmayabilir. 1-2.0 mm boyutundaki çatlaklar tuğla, beton bloklar, pencere denizlik ve hatıllarını çatlatabilir. 2.0 mm'yi aşan çatlaklar oturanları psikolojik bakımdan rahatsız etmeye başlar. 2.0 mm-5.0 mm'lik çatlaklar eğer dış sıvalarda oluşmuş ise yapı içine hava akımı olabilir. Kapı ve pencereler sıkışır ya da kapanmayabilir. 5-15 mm'lik çatlaklar olması halinde pencere camları çatlayıp parçalanabilir. Sıvalar dökülmeye, tuğlalar parçalanmaya başlar. Yığma kâgir kemerler yıkılabilir. Borular kopar, kırılır. 2.0 mm aşan çatlaklar yapıda önemli mimari hasarın başlangıcı olarak nitelenebilir. Öte yandan 25 mm' yi aşan çatlaklar ise yapının taşıyıcı sisteminin önemli bir tehlike içinde bulunduğu işaretler [38]. Bayülke'nin yığma yapıda oluşan çatlakların değerlendirmesi için oluşturduğu çatlak sınıflandırması Çizelge 3.1 de verilmiştir.

Çizelge 3. 1 Çatlak Sınıflandırması [38]

Çatlak Sınıfı (mm)	Konut	İşyeri	Fabrika	Taşıyıcı Sisteme ve Yapının Kullanışı Etkisi
<0.1	Önemsiz			Yok
0.1-0.3	Çok az	Çok az	Önemsiz	Yok
0.3-1.0	Az	Az	Çok az	Estetik açıdan; yapı dış cephe elemanlarının yıpranması hızlanır.
1.0-2.0	Az ile orta	Az ile orta	Çok az	
2.0-5.0	Orta	Orta	Az	Yapının kullanılabilirliği tehlikeye düşer, üst limite doğru yapının güvenliği de riske girebilir.
5.0-15.0	Orta ile ağır	Orta ile ağır	Az	
15.0-25.0	Ağır ile çok ağır	Orta ile ağır	Orta	
>25.0	Çok ağır ile tehlikeli	Ağır ile tehlikeli	Ağır ile tehlikeli	Yapının tehlikeli olma durumunun giderek artması

Bu değerlendirmeden gidilerek yığma yapılarda duvarlarda 2 mm'ye kadar olan çatlakların hasarsız ya da hafif hasarlı bir yapıya karşılık olduğu; 2-25 mm arasındaki çatlakların da yapının kullanım amacını tehlikeye düşürebilecek nitelikte ve orta hasara karşılık olduğu; 25 mm' yi aşan çatlakların da yapıyı ağır hasar bölgesine doğru soktuğu kabul edilebilir [38].

Hasarlara Neden Olan Atmosfer Etkisi

Her yapı gibi tarihi yığma yapılar da uzun yıllar boyunca sıcaklık değişimi, yağış, rüzgâr, bağıl nem, güneş radyasyonu gibi çeşitli atmosfer etkilerine maruz kalırlar. Bu etkiler zaman içerisinde yapının yıpranmasına, dış ortamdaki malzemelerin eskimesine ve servis ömürlerinin azalmasına neden olur. Dış ortamda kullanılan malzemelerin servis ömrünü tahmin edebilmek, malzemenin maruz kaldığı hasarların etki süreleri ya da miktarlarının bilinmesi ile mümkündür. Dış ortamda kullanılan malzemeler, atmosferik olayların karmaşık etkisinde kalırlar. Olaylar ve bunların etkileri mevsimlere ve bölgelere göre değişir [39].

Önemli atmosfer etkileri su-nem, ve sıcaklık değişimi, güneş ve rüzgara bağlı etkiler olarak sınıflandırılabilir.

Tüm yapılar gibi tarihi yığma yapılar da zaman içerisinde su ve nemin etkisiyle hasara uğramaktadır. Su hem katı (kar, buz, buzul), hem sıvı (yağmur, sel, birikinti suyu, göl, denizler), hem de gaz (su buharı olarak atmosferde ve malzeme boşluklarında) halleri ile yapıyı içten ve dıştan etkilemektedir [1].

Su, gözenekli yapı malzemelerinde, nemlenme, ıslanma, çiçeklenme, erime, çatlama vb. olaylar sonucunda hasarlara neden olmanın yanı sıra oksijen ile bir araya geldiğinde kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi ve yapıda bozulmaların görülmesine neden olabilir [40].

Yağmur ile ıslanan ve daha sonra kuruyan yığma yapıların dış cephelerindeki harçlar, sıcaklık değişimlerinin de etkisiyle hacim değişimine uğrarlar. Bu tekrarlı hacim değişimleri harçlarda ve sıvalarda çatlamalara neden olmaktadır. Zaman içerisinde oluşan çatlaklardan içeri giren su ve nem, yapı malzemeleri ve elemanlarında bozulmalara neden olabilmektedir [1].



Şekil 3. 4 Sudan kaynaklı bozulmalar, Ağa Hamamı, İstanbul [41]

Tarihi yapı malzemelerinde su emme; malzemenin su ve su buharı ile ilgili özelliklerine bağlı olarak dayanımların yitirilmesi, parçalanması hatta don etkisi ile dağılma, eriyebilen tuzların yüzeye sürüklenmesi ile çiçeklenmeler, yüzey erozyonları, nem içeriğindeki değişiklikler ile boyutsal hareketler, yüzeysel dekorasyonlarda erime gibi hasarlarla sonuçlanır [42].

Burada alınması gereken önlem gelen suyun kesilmesi veya içinde eriyici maddeler bulunmayan veya az bulunan maddelerin seçimi ve/veya kapilarite katsayısı küçük olan malzeme seçimidir [43].

Ankara Sultan Alaaddin Camiinin avlusunda yer alan tuğla namazgah minberine bitişik sur duvarlarından süzülen su, yağmur ve kar nedeniyle oluşan nem ve tuzdan kaynaklı tuzlanma Şekil 3.5'te görülmektedir [37].



Şekil 3. 5 Ankara Sultan Alaaddin Camii avlusundaki namazgahtaki tuğlalarda oluşan tuzlanma, 2011 [37]

Çankırı Ulu Camiinin taş payandalarında don olayının tekrarlaması sonucu taşın direncinin azalması ile ortaya çıkan parçalanma ve ufalanmalar Şekil 3.6'da görülmektedir [37].



Şekil 3. 6 Çankırı Ulu Camii payanda yüzeylerinde ufalanma, 2011 [37]

Taş, tuğla, kiremit, harçlar ve sıvalar gibi malzemeler gözenekli oluşları nedeni ile su ve gazı geçirirler. Sıcaklığın 0°C'nin altına düşmesi ile gözeneklerden giren su donar ve genişleme dolayısıyla hacmi 1/11 oranında artar. Böylece boşluk cidarlarında yaklaşık 16 MPa seviyesinde dayanılması güç bir basınç oluşur [1]. Bu olay, çekme gerilmeleri

doğurur. Çekme dayanımı düşük ve gevrek olan bu malzemeler tekrarlı donma çözülme etkisinde hasara uğrarlar. Hasarın engellenmesi, geciktirilmesi ya da en aza indirilmesi için yapı sudan korunmalıdır [40]. Özellikle boşluklu kaplama malzemelerinde ve çözünen tuzlar içeren sıva ve harçlarda parçalanma ve bozulmalar daha fazla olur.

Harçlar taş ya da tuğladan daha geçirimli malzemeler olduğu için suyun etkileriyle daha fazla karşılaşılır, yüzeye yakın bölümlerde erozyon meydana gelir. Ancak onarımlarda gözenekli blok malzemenin arası geçirimsiz harçla doldurulursa buharlaşma etkileri blok malzemenin yüzeyinde görülür, bu da yapı elemanında daha fazla hasarın oluşmasını sağlar. Kâgir elemanlarda harçlar su köprülerini oluştururlar, eleman bütününde kalın tabakalar halinde kullanılmış olmaları ve kurumalarıyla daha fazla deformasyona sebep olur, ayrıca nem ve ısı geçişi açısından elemanın homojen bir sistem olarak çalışmasını engeller. Yapıya işleyen su, buharlaşırken malzeme bünyesindeki tuzları çözüp buharlaştığı için yüzeye biriktirir ve sıvalara hasar verip duvarı giderek daha fazla yağmurdan etkilenir hale getirir. Kireç ve horasan harcı ile yapıların inşa edildiği dönemlerde, su yapılarında kullanılan harca yumurta akı, zeytinyağı ve kan gibi organik maddelerin katıldığı bilinmektedir. Protein esaslı bu maddelerin kireç ile suda çözünmeyen kompleks bağlar kurduğu sanılmaktadır. Böylece yapı malzemelerinin bünyelerine su almaları engellenmeye çalışılmıştır. Ancak yapı malzemeleri nemlendiklerinde bu organik maddeler bitki ve bakteriler için besin oluşturduğundan daha ciddi hasarların oluşmasına neden olmuşlardır [42].

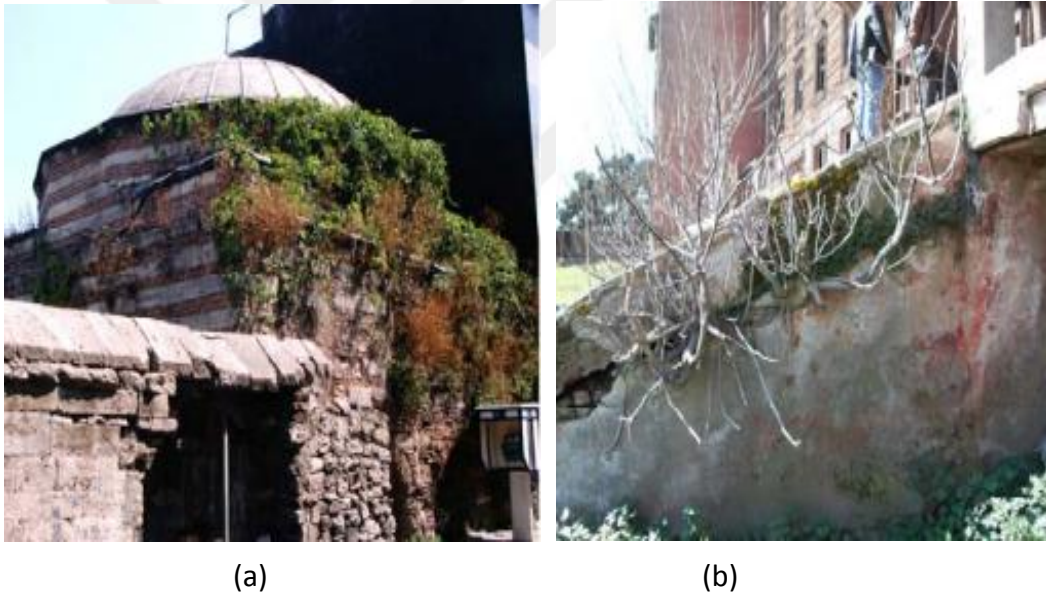
Ortamdaki sıcaklık değişimleri nedeniyle yapı elemanlarında farklı genleşmeler oluşur, bu da malzemedeki gerilmelerin doğmasına neden olur. Ayrıca sıcaklığın düşmesi ile malzeme gözeneklerinde veya yüzeyindeki su donar. Böylece fiziko-kimyasal olaylar oluşur ve biyolojik ve kimyasal hasarların hızlandığı görülür [39].

Sıcaklık farkı ile malzemelerde oluşan genleşme ve büzülme, taneler arasında farklı yönde ve büyüklükte iç basınçlar oluşturur. Bu durumun tekrarlaması ile yorulan malzemelerin bünyesinde kılcal çatlaklar oluşur. Sıcaklık değişimlerinin yenilenmesi, kılcal çatlakların gelişimini hızlandırdığı gibi yeni çatlak ve kırıkların oluşmasına da neden olur. Bu tür çatlakların artması ile malzemedeki fiziksel anlamda parçalanma ve ufalanma ortaya çıkar [37].

Ayrıca güneşten gelen ultraviyole ışınları ile gelen alfa parçacıkları organik malzemenin atomlarına çarparak, atomik yapıda bozulmalara yol açar ve malzemenin eskimesine neden olurlar [43].

Rüzgârlar da taşıdıkları malzemeyi yapı cephelerine çarparak, cephelerde aşınmaya neden olurlar. Zayıf bağlayıcı kaplamalarda etkisi kısa sürede görülen rüzgâr gücünün, daha çok taş yapı malzeme ile kaplı yapılarda, Mısır'da olduğu gibi, uzun süreler sonucunda zararlı aşındırıcı etkisi görülmektedir. Rüzgâr, özellikle deniz tuzu ve kumlarla birlikte etkiğinde hızlı ve ciddi yüzey aşınmalarına neden olabilmektedir [1].

Ayrıca rüzgarın etkisiyle çatılara, duvar oyuklarına ve boşalmış derzlere tohumlar yerleşebilmektedir. Böylece bir çok bakımsız binanın cephesinde, üstünde incir, aylandız gibi ağaçların kök salıp geliştiğini gözlemlenmektedir [34]. Sarmaşıklar ve diğer bitkiler duvar gibi elemanlara tutunarak burada yaşam ortamı edinir (Şekil 3.7) [41].



Şekil 3. 7 Rüzgâr ile taşınan bitkilerden kaynaklanan bozulmalar (a) Haydar Paşa Medresesi, İstanbul, (b) Yetimhane, Büyükkada, İstanbul [41]

Hasarlara Neden Olan Bitkiler Ve Hayvanlar

Tarihi yapıların su ve nemle karşı karşıya kalması, bazı bakteriler için uygun üreme şartlarının sağlanmasına neden olur. Bu bakteriler, insanlar üzerinde çeşitli hastalıklara, yapılarda ise görüntü kirliliğine neden olmaktadır [44].

Pencere kenarları, çatılar ve kat silmelerinde özellikle akıntısı ters yönde olan çıkıntılarda tozlar birikir ve çeşitli sebepler ile bunlar nemlenir, buralara önce yosunlar ve likenler yerleşir. Çok küçük boyutta olan bu bitkiler sonraları yüzeydeki topraktan cepheye geçerek çatlakların ilerlemesine neden olur, küçük tohumlu bitkiler yerleşir. Bu bitkilerin kökleri binaya zarar verir. Bu kökler, yapıda gerilmeler oluşturur. Bunu önlemek için temizlik ve sürekli bakım gerekir [1].

Tarihi yapılara zarar veren bir diğer etken de hayvanlardır. Özellikle kuşlar, böcekler ve farelerin anıtsal nitelikli yapılara zararları bulunmaktadır. Martılar çatıda avlarını yedikleri için, bu sırada çatı örtüsünün delinmesine ve yapının su almasına neden olabilmektedir. Güvercinlerin ise cami camlarını kırarak içeriye girdikleri, minare boşluklarına yuva yaptıkları ve gübreleri ile yapıyı kirlettikleri görülmektedir [34]. Kuşların pisliklerindeki asitler, fizyo-kimyasal korozyon ürettikleri gibi bu pisliklerin kendileri bakteri kaynağıdır ve bitkiler tarafından gübre olarak kullanılırlar [37].

Kerpiç yapıyı oluşturan malzemede kullanılan doğal içerikler de böcek ve canlıların yerleşmesi ve yaşaması için uygun bir ortam hazırlar (Şekil 3.8).



Şekil 3. 8 Kerpiç malzemede termit hasarı, Abydos, Mısır (Fotoğraf: Görün Arun) [41]

3.1.2 Tasarım ve Yapım Hataları

Tarihi yığma yapılarda hasarlara neden olan tasarım ve yapım hataları genel olarak; yapının zemin özelliklerine uygun olarak tasarlanmamış olması, strüktür tasarımındaki hatalar, hatalı malzeme kullanımı, kötü işçilik ve hatalı detay uygulamaları olarak sınıflandırılabilir.

Tasarım Hataları

Tarihi yapılarda yapım alanındaki gelişme bilimsel bilgiden çok sezgi ve tecrübeyle elde edilmiştir. Bu nedenle güvenlik, benzer şekil ve ölçülerin tekrarlanmasıyla ve deneme-yanılma yöntemiyle sağlanmıştır. Şekil, biçim ve oranların gelişimi, hasar ve yıkıma daha az yatkın olan modellere ve deneyimlere dayanır, fakat bu yol bile riski tamamen ortadan kaldırmaz [35].

Tasarım aşamasının çok kapsamlı olması ve bu aşamada yapıyı etkileyebilecek tüm etkenlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Tasarım sırasında; iklimsel veriler, mekanik etmenler, kullanıcı gereksinimleri, ekonomik etmenlerin bilinmesi ve analizlerinin yapılması zorunludur. Ayrıca tasarımcının yeterli malzeme bilgisine sahip olması da göz önünde bulundurulmalıdır [44].

Yapının taşıyıcı sisteminde ilk tasarımdan gelen boyutlandırma hataları varsa örneğin; duvar, ayak, payanda gibi düşey yükleri karşılayacak kesitlerde yapılmamışlarsa ciddi hasarlar ortaya çıkabilir. Kesitleri yetersiz bir duvar zamanla bel verir, aynı durum payandalarda da ortaya çıkarsa destek verdiği kemer, tonoz ve kubbede açılmalara, hatta sistemde yıkılmalara neden olabilir [45].

Ayasofya taşıyıcı sistemi hatalı tasarlanmış yapılara örnektir. Yapı ilk tasarımında alçak bir yelken tonozla örtülmüştür. Hızlıca inşa edilmiştir ve 31m açıklığındaki kubbesini destekleyecek bir payanda düzenine sahip değildir. Bu nedenle kubbenin itkisiyle yan duvarlarında açılmalar olmuş ve kubbe geçirdiği ilk depremden sonra çökmüştür [34].

Uygulama Hataları

Uygulama hataları genellikle, mesleki deneyimin doğru bir şekilde yapılmaması ve uygulayıcının yetersizliğinden, niteliksiz işçilik ve malzeme kullanımından kaynaklanmaktadır [44].

Tarihi yağma yapılarda kullanılan doğal taş, tuğla, kerpiç, harç gibi malzemelerin çekme dayanımı basınç dayanımlarına kıyasla çok düşük olduğu için; bu malzemeler basınç - çekme etkisinde deformasyon yetenekleri çok düşük ve gevrek malzemelerdir. Bu nedenle deprem kuvvetlerinden veya zeminde oluşan değişikliklerden kaynaklanan

çekme gerilmelerini karşılayamazlar ve yapıların taşıyıcı elemanlarında hasarlar oluşur [46].

Küçük Ayasofya Camisi'nde temeldeki farklı oturmalarından kaynaklı yapı elemanlarında çatlaklar gözlemlenmiştir. Yeraltı suyunun yer değiştirmesi ve zemin suyu seviyesinin yüksek olmasının yanı sıra yapının yanına yapılan tren yolu sayesinde tren titreşimlerinin dinamik etkileri bozulmayı hızlandırmaktadır [47].

Tarihi yapıların ilk uygulaması sırasında da hatalara rastlanmaktadır. Yapıyı oluşturan bileşenlerin uygun malzeme ve teknikler kullanılarak bir araya getirilmesi dayanımları açısından gereklidir. Taş yapılarda bağlantı elemanı olarak kullanılan demir gibi madeni elemanların korozyona uğramasının olumsuz etkileri arasında en başta geleni, korozyona uğrayan metallerin zamanla genleşmeleri ve taşı zorlayarak basınçla patlatmalarıdır. Bu durumun ortaya çıkma nedeni metallerin korozyona karşı önlem alınmadan kullanılmasıdır. Ayrıca taşların yüzeyinde ortaya çıkan sarı-kahve rengi lekelerin nedeni, taşların montajı sırasında kullanılan lamaların oksidasyonudur [37].

Yanlış Malzeme Seçimi

Tarihi yığma yapılarda kullanılan doğal kökenli doğal taş, tuğla, kerpiç, harç gibi malzemelerin iyi nitelikli olmaması yapılardaki bozulmaları hızlandırmaktadır. Tuğla yapılarda, tuğlanın iyi pişirilmiş olması yapının dayanımını arttıran önemli bir etkindir. Kötü ve nitelsiz tuğlalarla yapılan duvarlarda hızlı aşınma, dökülme, çukur oluşumu biçiminde yüzey kayıpları, ayrışma, dağılma şeklinde hasarlar gözlenir [45]. Tuğla gibi, harcın niteliği de yapının dayanımını etkiler. Çamur ya da zayıf bir kireç harcı ile örülen duvarlarda bozulan harç çözülerek yapının dağılmasına neden olur [34].

Malzeme seçiminde malzemenin nitelikli olması kadar özgün malzemeyle uyumlu olması da önemlidir. Özgün malzemelere uygun olmayan malzeme kullanımı tarihi yapılarda geri dönüşü olmayan hasarlara neden olmaktadır.

Örneğin, restorasyon sırasında onarımda kullanılan harç ve sıvalara bağlayıcı olarak yüksek oranda portland çimentosu katılması sıkça başvurulan bir yöntemdir. Portland çimentosu su ile kolaylıkla reaksiyona girerek işlenebilirliği kolay, priz süresi kısa olan plastik bir karışım oluşturmaktadır. Ancak portland çimentosu;

- Yapı malzemelerine suda çözülebilir tuzlar yükler ve özgün malzemelerin bozulmasını hızlandırır [48].
- Çimento katkılı harç ve sıvaların yoğunluğu ve ısı iletkenlik katsayıları yüksek olduğu için yoğuşmaya yol açarak eski eserin rutubetinde artışlara neden olur. Ayrıca birlikte kullanılmaları durumunda ısı karşısında oluşan farklı basınçlar, elemanlardan zayıf olanın tahrip olmasına yol açar [37].
- Çimento katkılı harç ve sıva ürünlerinin gözenekleri çok küçük olduğundan yapının içerdiği veya herhangi bir yolla oluşan suyun buharlaşması zorlaşır. Böylece hem düşük sıcaklıkta, hem de yüksek sıcaklıkta gerilim oluşacağı için onarım için kullanılan sıvaların yapıdan kolayca kopmasına yol açar veya yapının rutubetinde artışlar olur [48].

Tarihi yapıların onarımı sırasında ortaya çıkan özgün malzeme ile uyumlu malzeme kullanımı sorununu gidermek için çimento katkılı kireç veya sentetik reçineler bağlayıcı olarak karışımların içerisinde kullanılmıştır. Ancak sentetik katkı maddelerinin kısa süreli zararlarının yanı sıra yapıya uzun sürede verebileceği zararların araştırılması gerekmektedir. Organik katkı maddelerinin kullanımında ise özgün malzemelerle teması durumunda, iklimsel ve biyolojik değişikliklerle biyolojik organizmaların üremesine yol açması büyük olasılıktır. Bu biyolojik bozulmalar karınca, sinek, böcekler, mikroorganizmalar, likenlerle ortaya çıkabilir [1].

Ayrıca bozulmaların asıl kaynağı araştırılıp belirlenmeden sadece bozulmaları ortadan kaldırmaya yönelik yapılan müdahaleler de bozulma sürecinin hızlanmasına ve yeni bozulmaların meydana gelmesine neden olabilir [41].

3.1.3 Yapının Kullanım Süreci İçinde Oluşan Hasarlar

Tarihi yığma yapılarda kullanım süreci içinde oluşan hasarlar insan kaynaklı hasarlardır. Kötü kullanım, savaşlar, trafik ve titreşim, yangınlar ve hava kirliliği gibi nedenler bu başlık altında sayılabilir.

Ayrıca kentsel dönüşüm sırasında tarihi yapıların çevresine inşa edilen yüksek yapıların tasarımı sırasında tarihi yapıların göz önünde bulundurulmaması; inşa edilen yeni binaların tarihi yapının aldığı güneşi kesmesi, hatta cephelerini sağır hale getirmesi gibi

nedenlerle tarihi yapılarda iklimlendirme ve aydınlanma sorunları çıkarmakta hatta rutubetlenmeye neden olmaktadır. Yeni yapılan yollar ve inşaatlar sırasında oluşan sarsıntılar ise tarihi yapılarda beklenmeyen titreşimlere yol açmaktadır. Bu durumda da yeni oluşacak hasarlar kaçınılmazdır.

Yapılarda Kötü Kullanım Sonucu Oluşan Hasarlar

Kötü kullanım, yapının harap olma sürecini hızlandıran önemli bir etkidir. Tarihi yapılarda bilinçsizce yapılan değişiklikler, taşıyıcı sistem düzeninde aşırı yükleme veya süreksizliklere neden olmaktadır. Tarihi yapıların yük sisteminin değişmesi veya yapıda yapılacak değişiklikler ile yapı çevresinde yapılan kazılar ve etrafında bırakılan çukurlar, yapılarda temel oturmalarına neden olabilir [45].

Ayrıca tarihi yapılara yine kullanıcılar tarafından yapılan amaçlı veya amaçsız yerinden sökme, yerinde tahrip etme, yüzeyleri herhangi bir biçimde kazıma, yüzeylere yazı yazma ve afiş yapıştırma, terk etme veya bilinçsiz onarım gibi eylemler de yapılara önemli hasarlar vermektedir (Şekil 3.9).



(a)



(b)

Şekil 3.9 Tarihi yapı cephesine yazı yazma ve afiş yapıştırma nedeniyle oluşan bozulmalar, (a) Köprülü Medresesi, İstanbul [41] , (b) Gülhane Parkı'nda tarihi bir çeşme, İstanbul, 2010 [37]

Savaşlar Nedeniyle Oluşan Hasarlar

Savaşlar da tarihi yapıların hasar görmelerine hatta yok olmalarına neden olan önemli etkenlerdendir. Örneğin; dünyada pek çok yapının harap olmasını sağlamış I. ve II. Dünya Savaşlarının yanı sıra uzun yıllardır devam eden Ortadoğu Savaşları nedeniyle Beyrut, Bağdat ve Şam gibi çok önemli tarihi kentler yok olmuştur.

Tarihi yapılar ayrıca kasıtlı olarak tahrip etmek, yıkmak olarak tanımlanan eylemler anlamına gelen vandalizm sayesinde de ağır hasarlar almaktadır. Vandal eğilimi olan insanlar tarihi yapılara; duvarlara yazı yazmak, geceleri barınak olarak kullanmak, hırsızlık, cam vb yapı elemanlarını kırmak, kundaklamak gibi ciddi hasarlar verirler [41]. Vandalizm siyasi nedenlerle bir devlet tarafından ya da halk tarafından gerçekleştirilebilmektedir. Örneğin; Bosna Savaşı sırasında (1992-1995) Bosna'da Osmanlı dönemi izlerini taşıyan camiler yok edilmiştir [34].

Trafik Ve Titreşim Nedeniyle Oluşan Hasarlar

Tarihi yapılar inşa edildiği zaman oluşturulan sokak dokusu insan ve at arabası trafiğine göre düzenlenmiştir. Günümüzde bu yollar araba, kamyon, tren vb. ağır taşıt trafiğine açılmıştır. Bu durum tarihi kent yolları çevresindeki yapılarda, titreşimler ve temellere yapılan baskı nedeni ile hasarlara yol açmaktadır [34].

Küçük Ayasofya Camii'ndeki tren titreşimlerinin yapıya etkisi olduğu gibi, Yedikule Kapısı ve Topkapı Sarayında Bab-ı Hümayun taşıt trafiğinden zarar gören geçitlerdir [47].

Ayrıca günümüzde yeterli araştırma yapılmadan, hızla yapılan kentsel dönüşüm nedeniyle doğasında hız olmayan tarihi yapıların yakınına yapılan yolların ve inşaatların yarattığı titreşimler de tarihi yapılarda hasarlara neden olmaktadır.

Yangınlar Nedeniyle Oluşan Hasarlar

Yangınlar nedeniyle yapı malzemelerinin kimyasal yapısında değişimler meydana gelir. Malzemenin molekül yapısı bozulur ve karbonlaşma olayı görülür. Yanma sonucu karbon dioksit (CO₂), karbon monoksit (CO), kükürt dioksit (SO₂) ve kükürt trioksit (SO₃) gibi birtakım zararlı gazlar da açığa çıkar [1].

İnorganik malzemelerden taş ve organik malzemelerden ahşap gibi malzemelerde molekül yapısının değişimi genelde kristal suyunun kaybolmasıdır. Malzemenin ısı iletkenlik katsayısı ısının iç yapıda hızla iletilmesi sonucunu ortaya çıkaracağından, oluşacak deformasyonlarda önemli bir etken olur. Isısal deformasyonlar ve erime sonucu malzemedede parçalanma ve büyük oranda değişimler görülür [43].

Yangından kaynaklanan aşırı sıcaklık da malzemelerde felakete varan sonuçlar yaratabilir. Alevle yanan taş malzemelerin yüzeylerinde hızla bir hacim genişmesi oluşur. Fakat ısı, taşın iç yüzüne aynı hızla nüfuz etmez ve taşların içi soğuk kalır. Bu durumda malzemenin direncini aşan iç gerilmeler oluşur. Sonuçta taşlarda kabarma ile plak ve parça halinde kopmalar gözlemlenir [49].

Türkiye'deki tarihi yapılar, çoğunlukla ahşap, taş ve ahşapla taş bir arada kullanılarak yapılmıştır. Zamanla mukavemetleri zayıflayan ve haşereler tarafından zarara uğratılan ahşap yapılar, yangın dayanımı en düşük yapılardandır. Genellikle tarihi yapılardaki yangınlar, ısıtma ve aydınlatma sistemlerinden kaynaklanmakta veya restorasyon çalışmaları sırasında yapılan hatalardan meydana gelmektedir [50].

Hava Kirliliği Nedeniyle Oluşan Hasarlar

Çoğunlukla bacalardan, otomobil egzozlarından, vapur ve tren bacalarından salınan CO₂ ve SO₃ gazları, yağmurlu ve sisli havalarda karbonik asit (H₂CO₃) ve sülfürik asit (H₂SO₄) e dönüşür ve asit yağmurlarına neden olur. Asit yağmurlarının tüm yapılarda olduğu gibi tarihi yapıların cephelerinde ve cephe malzemelerinde de aşındırıcı etkisi vardır. Asit yağmurlarının yanı sıra hava kirliliğine neden olan duman, toz, kükürt dioksit vb. zararlı gazlar rüzgarın etkisiyle tarihi yapı malzemelerinin üzerinde birikebilir. Bu kir tabakası suyun da etkisiyle tarihi yapıların bozulmasını hızlandırır [51]. Zamanla, oluşan bu tabaka, eleman yüzeyinden ayrılarak düşer ve malzeme kaybına neden olur. Bu olaya kapak atma denir [41].

Islanan yüzeylerdeki bezemeler asidin aşındırıcı etkisiyle ayrıntılarını yitirmektedir. Arada sırada ıslanan cephelerde ise kara, geçirimsiz bir tabaka oluşur (Şekil 3.10). Cephelerde biriken kurum mimari ayrıntıların algılanmasını engellemekte, bu kir tabakası altında kalan taşlar özelliklerini yitirerek erimekte [45].



Şekil 3. 10 Çevre kirliliği nedeniyle yüzey kararması ve malzeme yapısının bozulması, Zeynep Sultan Cami, İstanbul [41]

3.2 Hasar Tespit Yöntemleri

Tarihi yapıların özgünlüğünü yitirmemesi için, yapıların onarım ve sağlamlaştırılması sırasında müdahalenin minimum düzeyde tutulması esastır. Onarım sırasında özgün malzeme özellikleri belirlenmeli, ön araştırmalardan laboratuvar analizlerine kadar bilimsel araştırma ve malzeme incelemesi uzmanlar tarafından yapılmalıdır.

Restore edilecek binaların incelenmesi, hasar nedenlerinin araştırılması ve belirlenmesi, disiplinler arası çalışmaları gerektirmektedir. Bu nedenle mimarların restorasyon sırasında yapı fiziği, zemin, strüktür, kimya ve malzeme bilimi gibi alanlarda uzmanlar ile birlikte çalışması gerekir [34].

Ekşi-Akbulut ve Aköz tarafından, tarihi yapılarda koruma, onarım ve güçlendirme uygulamalarından önce inceleme ve tespit çalışmalarının sistemleştirilmesi, kolaylaştırılması, verilerin toplanması ve değerlendirilmesi için her yapıya uygulanabilir çalışma adımlarını içeren bir çalışma programı oluşturulmuştur (Çizelge 3.2) [1].

Çizelge 3. 2 Genel çalışma programı [1]

Çalışma Grubu	Çalışma Adımları	Açıklaması
1. EKİP	Yapı Kimliğinin Tespiti Süre: gün/ay	Adı/Orijinal Adı
		Adresi
		İşlevi; Orijinal İşlevi / Günümüzdeki İşlevi
		Mimar / Yaptıran Kişi veya Kuruluş
		Yapım Yılı / Dönemi
		Şu Andaki Durumu
		Yapının Geçmişi (onarım, yenileme, eklenti)
2. EKİP	Yapıya Ait Doküman Elde Edilmesi Süre: gün/ay	a) Literatür ve görsel bilgi edinilmesi
		b) Plan, kesit, görünüş, fotoğraf elde edilmesi
		c) İnceleme ve tespitler için gerekli kurum ve kuruluşlardan gerekli iznin alınması
		d) Çalışma için ilgili (sorumlu) kişi ile ilişki kurulması
		e) Rölöve çıkarılması
		f) Restitüsyon projesinin hazırlanması
3. EKİP	Yapıda Tespit Çalışması Süre: gün/ay	a) 2. adımda elde edilen bilgiler ışığında yapının planında
		b) Elde edilen veya oluşturulan dokümanlar ile yapının yerinde karşılaştırılması bir önceki adımda yapılan çalışmanın yerinde denetlenmesi, karşılaştırılması
		c) Elemanların son durumunun gözlem ve fotoğraf yolu ile incelenmesi var ise hasar tespiti
		d) Hasarın zaman içinde ölçüm ve gözlem ile incelenmesi
		e) Hasar mekanizmalarının belirlenmesi
		f) Son durumun elde edilen bilgiler ile karşılaştırılması
		g) 3a çalışmasından yararlanılarak yapılacak gözlem, ölçüm ve deneyler için çalışma tablosu oluşturulması
		h) Her bir elemanda kullanılan malzemelerin tespit edilmesi, görünen boyutların ölçülmesi, çatlak ve hasarların belirlenmesi, gerekli yerlerden detay fotoğrafları alınması
3. EKİP	Süre: gün/ay	i) Yerinde tahribatsız ölçümler yapılması ve e adımı hazırlanmış olan tablolara işlenmesi
		j) Gerekli olan ve izin alınabilen bölgelerden numune alınması
4. EKİP	Laboratuvar Çalışması Süre: gün/ay	a) Yapıdan alınacak örnek ve numunelerin deneye hazırlanması
		b) Fiziksel, Mekanik, Kimyasal deneyler
		c) İç yapı incelemesi
		d) Laboratuvar sonuçları ile yerinde yapılan ölçümler arasında istatistiksel ilişki araştırılması, bağıntı elde edilmesi
		e) Elde edilen istatistiksel bağıntılar kullanılarak numune alınamayan ancak tahribatsız ölçüm yapılan elemanlara ait malzeme özelliklerinin hesaplanması / belirlenmesi
5. EKİP	Malzeme Seçimi Süre: gün/ay	a) Onarım ve / veya güçlendirme için gerekli olan malzemelerin önerilmesi amacı ile deneysel çalışma yapılması, yapıya uygun olan malzemelerin seçilmesi
		b) Yapıda uygulanan malzemelerin yapım aşamasında yerinden numune alınarak kontrol edilmesi, orijinale uygunluğunun denetlenmesi
6. EKİP	Yapıda Koruma Onarım Sağlama	a) Proje hazırlanması : Restorasyon Projesi
		b) İhale işlemleri
		c) Koruma onarım ve sağlama uygulama uygulaması
		d) Orijinal malzemeye, projesine uygunluğunun ve kalitesinin denetlenmesi

Tarihi bir yapının onarım veya sağlamlaştırılmasına başlamadan önce; binanın genel özellikleri, çatlakların varlığı, hareketlerin işaretleri, eğilme, malzeme bozulmaları, yapılan restorasyonlar, yeniden yapımlar vb. yapının mevcut durumunun tespiti yapılmalıdır [37].

Tespit sırasında ilk olarak yapının tarihi araştırması yapılmalı, kimlik bilgileri toplanmalıdır. Yapımı ilgilendiren dokümanlar, yapının geçirdiği onarımlar, deprem, yangın ve sel gibi afetler araştırılmalıdır. Yapıya ait mimari dokümanlar ve fotoğraflar elde edilmelidir.

Yapının var ise projesi temin edilmeli, daha sonra yapının mevcut durumu ile karşılaştırılarak yapının mimari ölçümleri ve detaylarını belgelendiren rölöve projesi ve bugünkü durumunun değerlendirilerek var olan kayıp kısımlarının ya da olası eklentilerinin belirlenerek özgün halinin saptandığı restitüsyon projesi hazırlanmalıdır [1].

Yapıda kullanılan malzemeler, yapım teknikleri ve strüktürel sistemin ayrıştırılarak projeler üzerinde gösterilmesi gerekmektedir. Yapıda belirlenen hasarlı bölgeler projelere işlenmeli, fotoğraflanarak numaralandırılmalıdır [8].

Taşıyıcı sistemin ve bozulmaların incelenmesi sadece çatlakların yeri konusunda değil, çatlakların genişliği, kenarları arasındaki yer değiştirmelerin yönü, uzunluğu, derinliği vb. konularda da bilgi vermelidir. Taşıyıcı sistem deformasyonunun durumu; şakül sapması, oturma, çökme vb. konular incelemenin önemli bir parçasıdır. Eğer hareket hala devam ediyorsa, belli bir süre içinde çatlaklardaki değişiklikleri, deformasyon ve hareketleri izlemek gereklidir [35].

Ayrıca onarım ve restorasyon öncesi yapıda yük dağılımı ve zemin etüdlerinin de yapılması gerekmektedir. Yapının temel geometrisi ve temel malzemesinin belirlenmesi için yapı zemininde jeolojik ve geoteknik incelemelerin yapılması da gereken çalışmalar arasındadır [37].

Yapıyı oluşturan malzemelerin (taş, tuğla, ahşap, harç, sıva vb.) analizleri yapılarak yerinde ve laboratuvar çalışmalarıyla bu malzemelerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmelidir.

Özgün malzeme özellikleri belirlendikten sonra onarım sırasında kullanılması planlanan malzemenin de malzeme özellikleri belirlenmeli, özgün malzeme ile karşılaştırılarak uyumluluğu araştırılmalıdır.

Bütün bu araştırmalardan sonra yeni kullanım biçiminin belirlenmesi olan restorasyon projesi çizilmeli, uygulama için uzman ekipler görevlendirilmelidir.

Onarım aşamasında da üretilen malzemelerden numuneler alınmalı, deneyler yapılmalı ve özgün malzemeye uygunluğu ve kalitesi denetlenmelidir. Koruma, onarım ve sağlamlaştırma uygulaması yapıldıktan sonra da mutlaka yapının orijinaline ve projesine uygunluğu kontrol edilmeli ve kalite denetimi yapılmalıdır [1].

Yapı ile ilgili bilgiler, dokümanlar elde edildikten, yapının hasar durumu belirlendikten ve çalışma programları ve farklı disiplinlerden çalışma ekipleri oluşturulduktan sonra, zemin, taşıyıcı elemanlar ve malzeme ile ilgili incelemeler yapılmalıdır.

3.2.1 Yerinde (in-situ) Uygulanan Deneyler ve Numune Alınması

Tarihi yapıdaki özgün malzeme özelliklerini belirlemek için ilk olarak yapıya zarar vermeyen, yerinde tahribatsız ve az tahribatlı deneyler yapılır. Mümkünse yapıdan numune (karot vb.) alınır ve incelenmek üzere laboratuvara gönderilir. Yapıdan numune alınması sırasında, tahribatsız ölçümlerin yapıldığı bölgelerde, karot alınacak yerler belirlenir TS EN 12504-1 [52] e göre belirlenir. Bu bölgelerden en fazla 50mm çapında karot numuneleri çıkarılır ve kodlanarak, laboratuvara götürülmek üzere korumaya alınır [1].

Yerinde yapılan deneyler ayrıca, taşıyıcı sistemde ve malzemede herhangi bir değişiklik oluşmadan (örnekleme sırasında veya laboratuvar ortamına alınırken) incelemeyi mümkün kılar.

Yapı ile ilgili yerinde yapılan deneyler; elemanlarda yüzey sıcaklığı ve nemin araştırılması, sertlik ölçümü, ultrases, radyoaktif yöntemler, infrared tomografi, yerinde basınç deneyi, yerinde kayma deneyi, endoskopi, gevşeme testleri, monitörizleme, çekme testleri ve duvar harçlarının performans testi olarak incelenebilir (Çizelge 3.3).

Çizelge 3. 3 Tarihi yapıya yapılar da yerinde (in-situ) uygulan an deneyler

YÖNTEMİN ADI	KULLANIM AMAÇLARI
Elemanlarda Yüzey Sıcaklığı ve Nemin Araştırılması	Hasara neden olan sürecin açıklanması ve dolayısı etkin koruma ve restorasyon metoduna karar verilmesi [54]
Sertlik Ölçümü	Malzemenin kökeni hakkında bilgi edinmek ve farklı iki numunenin aynı malzemeye ait olup olmadığını anlamak [46]
Ultrases Ölçümü	Mikro çatlaklar , restorasyon yöntemlerinin etkililiği gibi konularda bilgi sağlamak ve çatlak derinliği ve yönünü belirlemek [35]
Georadar Yöntemi	Malzemenin gözle ve karotla belirlenemeyen fiziksel özelliklerini belirlemek [37]
Infrared Tomografi Yöntemi	Yüzeye yakın hasarlı bölgeler ile farklı malzeme, bozulma ve oyukların dağılımını tanımlamak [46]
Yerinde Basınç Dayanımı	Elemana uygulanan kuvveti ölçmek [46]
Yerinde Elastisite Modülünün Belirlenmesi	Elemana uygulanan kuvvet ile oluşan gerilme ve gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirmeyi ölçmek
Yerinde Kayma Dayanımı	Yığıma yapılarıdaki taş ya da tuğla ile harç arasındaki kayma dayanımını belirlemek [37]
Endoskopi Testi	Malzeme ve iç yapıdaki değişiklikler, kullanılan harcın kalınlığı ve durumu, duvar içi bünyesindeki çatlakların durumu ve yönleri, önceden yapılan müdahaleler hakkında bilgi edinmek [35]
Monitör-İzleme Testleri	Bir taşıyıcı sistemi izlemek; çatlakların genişlemesi veya azalması, eğime açısındaki değişiklikler, deformasyonlar vb. durumlarda oluşan değişiklikleri kontrol etmek [35]
Penetrasyon Testi	Harçların mukavemetini hesaplamak [35]

Yapıda çatlak oluşumu, yapının o bölgesindeki dayanımın sona ermesi ve serbest hareketin başlaması demektir. Çatlak genişliği, yapıda hareketli yük ve sıcaklık değişimine bağlı olarak artıp azalabildiği için önemli olan çatlak gelişiminin uzun zaman içindeki davranışdır. Çatlak genişliğinin uzun zaman içindeki değişiminden çatlağın sabit ya da gelişen çatlak olduğuna karar verilebilir [53].

Çatlakların hareketli olup olmadıkları veya hareket miktarları değişik yöntemlerle ölçülebilmektedir (Çizelge 3.4)

Çizelge 3. 4 Çatlak hareketlerini ölçmek için kullanılan geleneksel yöntemler [37]

Çatlakların Alçıyla Sıvanması	Çatlak alçı ile sıvanır. Çatlak üzerindeki alçının kırılması yapıdaki hareketlerin devam ettiğini göstermektedir.
Cam Levhalar Kullanılması	Alçıyla çatlak üzerine yerleştirilen cam levhanın kırılması çatlağın hareketliliğini, zemindeki oturmanın devam ettiğini gösterir.
Kayan Yüzeyler Arasındaki Skala Yöntemi	İki cam arasına yerleştirilmiş ölçülü bir skala hareketin ölçüsü ve yönünü tespit etmeye yardımcı olur.
Mikrometre ile Ölçüm	Çatlağın iki tarafına iki lama monte edilir. Lamaların aralarındaki uzaklık sürekli ölçülür.

Elemanlarda Yüzey Sıcaklığı ve Nemin Araştırılması

Tarihi yapılarda görülen pek çok hasarda yapının bulunduğu bölgenin iklim ve mikro iklim koşulları etkilidir. Yapının bulunduğu ortamın mikro iklim koşulları ile yapı malzemesinin sıcaklık ve nemi, hasara neden olan sürecin açıklanmasında ve dolayısı ile etkin koruma ve restorasyon yöntemine karar verilmesine yardımcı olmaktadır (Şekil 3.11). Bu amaçla yapılan tahribatsız ölçümlerin yaz ve kış dönemleri için tekrarlanmasında yarar vardır [54].



Şekil 3. 11 Malzeme neminin belirlenmesi [55]

Sertlik Ölçümü

Malzemelerin en önemli mekanik özellikleri, süneklik, elastisite, dayanım, tokluk ve sertliktir. Sertlik, bir malzemenin yüzeyine batırılan sert bir cisme karşı gösterdiği dirençtir, cismin dayanımı hakkında bir fikir verir; ancak dayanım ya da süneklik belirli bir karakteristiği tam olarak ifade etmez. Sertliğin belirlenmesi ile malzemenin kökeni hakkında bilgi edinilir, farklı iki numunenin aynı malzemeye ait olup olmadığı anlaşılır.

Sertlik deneylerinin yapılması kolaydır, deneyde malzeme tahrip edilmez. Sertlik değerinden malzemenin iç yapısına bağlı özelliklere geçilebilmesi için cismin homojen olması, yüzey özelliklerinin iç yapıdan farklı olmaması gerekir [46].



(a)

(b)

Şekil 3. 12 Sertlik ölçüm deneyleri (a) N tipi schmit çekici testi uygulaması [46], (b) P tipi schmit çekici testi uygulaması [56]

Seramik bünyeli, gözenekli yapı malzemelerinde sertliğin belirlenmesi için çoğunlukla geri sıçramanın ölçülmesi prensibine dayanan N tipi veya P tipi Schmit çekicinden yararlanılır (Şekil 3.12). Bunlardan, N tipinde, bir bilye, P tipinde ise bir pandül, arkasında bulunan yay yardımı ile yüzeye fırlatılır. Bilye veya pandül taş cismin yüzeyine çarptıktan sonra geri sıçrar, geri sıçrama ne kadar büyükse sertlik o kadar yüksektir. Elemanın yüzeyindeki sıva veya kaplama kaldırıldıktan sonra değişik noktalara en az 10 vuruş yapılmalı, maksimum vuruş değeri ile minimum vuruş değeri arasındaki fark 10'dan küçük olmalıdır [26].

Ultrases Ölçümü

Ultrases ölçümü en önemli tahribatsız deneylerden biri olup taşıyıcı sistemin arasından iletilen eksenel ses dalgasının hızının ölçülmesidir. Bu hız rijitlik, homojenlik ve malzemenin yoğunluğuna bağlıdır. Bu testler bozulmayı ilgilendiren mikro çatlaklar vb. konularda ve restorasyon yöntemlerinin etkililiği gibi konularda bilgi sağlar [35].

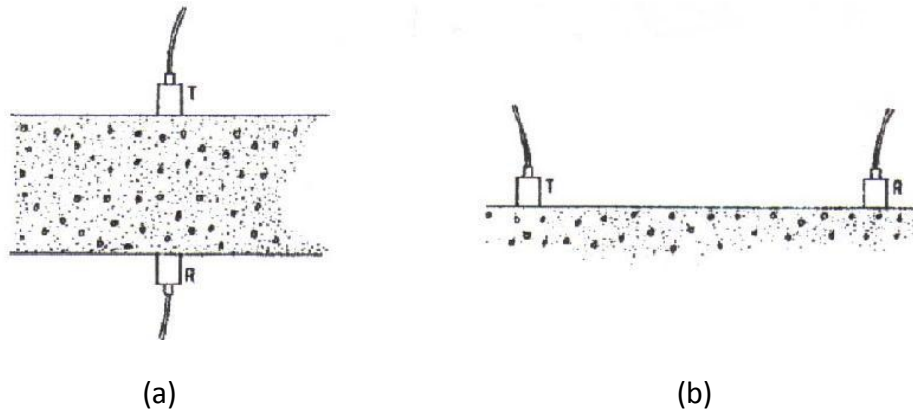
Sesin sağlıklı genç kulak tarafından duyulabilen titreşimi; 16–16000 Hz arasındadır [1]. Frekansı 16.000'in üzerinde olan ve insan kulağı tarafından duyulamayan ultrases

dalgaları katı, sıvı ve gaz içinde belirli bir hız ile yayılır. Ultrases deney tekniğinde, ses dalgaları cisme boşluk bırakılmaksızın temas ettirilen piezoelektrik transduser ile gönderilir ve aynı özellikteki transduser yardımı ile alınır. Alıcı ve verici probalar arasındaki ses dalgalarının iletim süresi ve hızı zaman ölçer devre ile ölçülür (Şekil 3.13) [26].



Şekil 3. 13 Ultrases ölçüm deneyi [46]

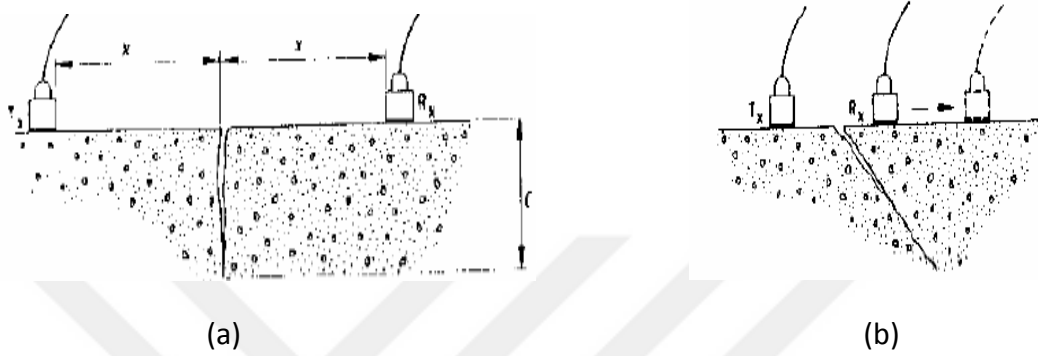
Ultrases ölçüm aleti ile şekil 3.14'te görüldüğü gibi karşılıklı yüzeylerde doğrudan veya aynı yüzden dolaylı ölçüm yapılarak ses geçiş süresi (t , μs) ölçülür ve ölçüm yapılan uzaklığın (L , mm) ses geçiş süresine (t , μs) oranlanması ile ses geçiş hızı (V , mm/ μs) hesaplanır [1].



Şekil 3. 14 Ultrases ile ses geçiş sürelerinin ölçümü (a) Doğrudan ölçüm (b) Dolaylı ölçüm [57]

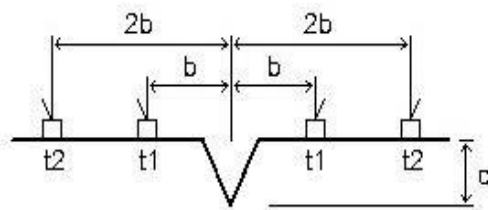
Ses geçiş hızı ile mukavemet arasında doğru orantılı bir ilişki vardır. Boşluklu bir malzemede ses geçiş hızının bilinmesi malzemenin içerdiği boşluk miktarı hakkında bilgi verir. Malzemenin içinde bulunan boşlukların, mukavemeti olumsuz olarak etkilediği

bilinmektedir. Cismin yoğunluğu düşük ise ve/veya bünyesinde çatlaklar var ise ses dalgalarının yayını ve dolayısıyla ses geçiş hızı düşük olur. Cismin boşlukları az ve dayanımı yüksek ise ses geçiş hızı da yüksek olur. Bu yolla yapıyı tahrip etmeden tanımak ve özellikleri hakkında bilgi edinmek mümkün olsa da bu deney dayanımın belirlenmesi için tek başına yeterli değildir; diğer ölçümler ile birlikte değerlendirilmelidir [1].



Şekil 3. 15 Ultrases ile (a) çatlak derinliğinin (b) çatlak yönünün araştırılması [46]

Ultrases ölçümü ile çatlak derinliği ve yönü de araştırılabilir. Çatlak derinliğinin ve yönünün araştırılması amacıyla çatlak bölgelerinde şekil 3.15'te görüldüğü gibi belirlenen noktalarda, probların yeri değiştirilerek ses geçiş süreleri ölçülür, gerekli hesaplar yapılarak çatlağın derinliği ve yönü belirlenir [46]. Ultrasonik ölçüm ile çatlak derinliği Şekil 3.16 ve (3.1) bağıntısı ile hesaplanır [9].



Şekil 3. 16 Ultrasonik ölçüm ile çatlak derinliğinin araştırılması; ölçüm noktaları (t1,t2) ve çatlak derinliği (c) [9]

$$c = b \times \sqrt{\frac{(4t_1^2 - t_2^2)}{(t_2^2 - t_1^2)}} \quad (3.1)$$

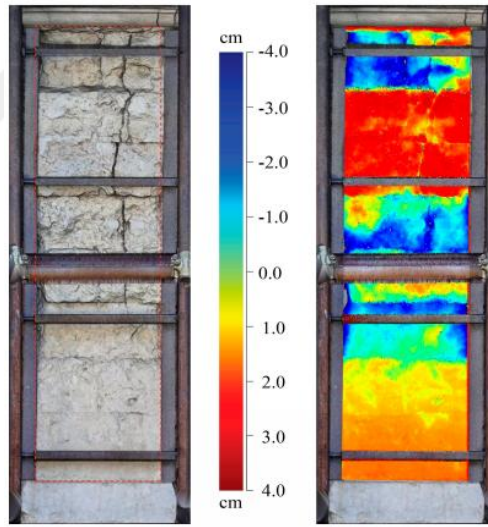
Georadar Yöntemi

Georadar yöntemi malzemelerin bilinmeyen özelliklerinin belirlenmesi için geliştirilmiş tahribatsız bir yöntemdir.

Verici bir anten araştırma yapılacak yüzeye elektromanyetik dalgalar gönderir. Gönderilen dalgaın bir kısmı geri yansır bir kısmı ise kırılarak yoluna devam eder. Yansıyarak geri gelen dalgalar alıcı bir anten tarafından alınır ve veri kaydetme cihazına aktarılır. Böylece ortamdaki fiziksel süreksizliklerin varlığına bağlı olarak bilinmeyen özellikler belirlenebilir [37].

İnfrared Tomografi Yöntemi

İnfrared (kızılötesi) tomografi yöntemi, kızılötesi ışınlar ile yüzey sıcaklığı ölçülerek; yüzeye yakın hasarlı bölgelerin, farklı malzemelerin, bozulma ve oyukların belirlendiği tahribatsız bir yöntemdir (Şekil 3.17) [58].



Şekil 3. 17 İnfrared tomografi yöntemi ile oluşan görüntü [58]

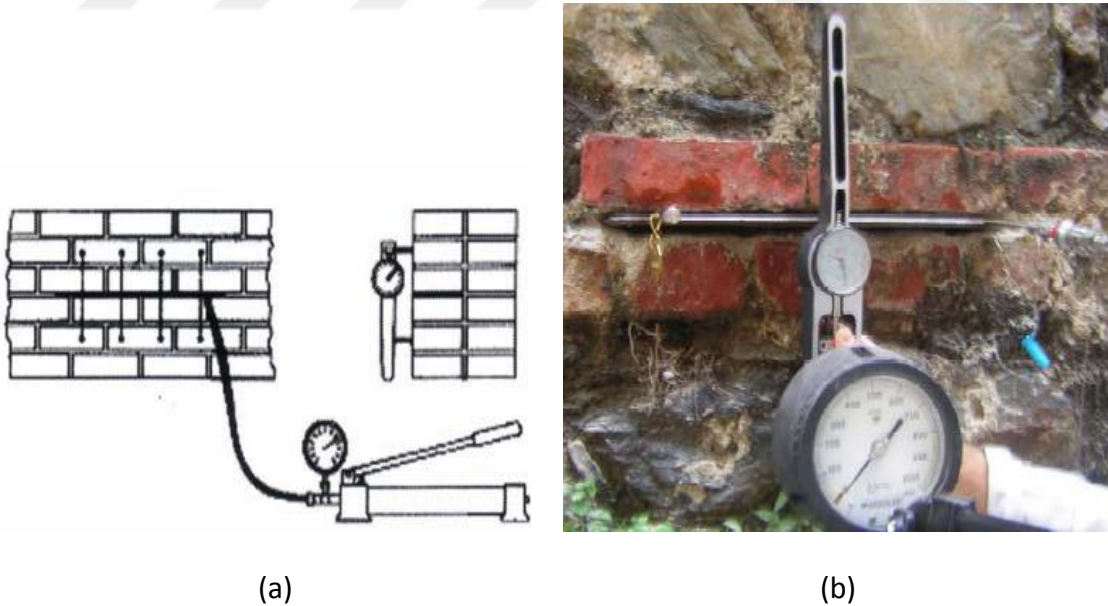
Bu tekniğin esası; yüzeyin, sıcaklığına bağlı olarak belirli bir yoğunlukta elektromanyetik radyasyon yaymasına dayanır. Eğer elemanda dışarıdan içeriye ya da içeriden dışarıya bir ısı akışı varsa, kusurlu bölgelerin çevresindeki malzeme farklı termal iletkenlik gösterir. Bu durum ısı akışını etkiler ve bu farklılık nedeni ile yüzey sıcaklığı sabit değerde olmaz. İnfrared tomografi yöntemi sırasında, yüzey sıcaklığı ölçülerek kusurlu

bölge belirlenir. Yüzey sıcaklığının belirlenmesinde video kamera sistemine benzer şekilde çalışan infrared tarayıcılar kullanılmaktadır [46].

Yerinde Basınç Dayanımının Belirlenmesi

Yığma yapılarda yerinde Basınç Dayanımının belirlenmesi için ASTM C 1196-92 [59] ye göre flatjack deneyi uygulanır. Yığma yapılarda uygulanan flatjack deneyinde; basınç uygulayan bir kompresör, basınç ölçer, basınç kuvvetini yüzeye uygulamaya yarayan plaklar, deplasmanı ölçmeye yarayan komparatör ve komparatörü tespit etmeye yarayan pimlerden oluşan bir düzenek kullanılır (Şekil 3.18) [46].

Deney sırasında ilk olarak ölçüm yapılacak bölgeler belirlenir, kuvvet uygulanacak bölgelerde boy değişimi ölçümü yapılmak üzere bölgenin alt ve üst kısımlarına 3'er adet pim yerleştirilir, komparatör ile pimler arasındaki uzaklık ölçülür. Daha sonra kırıcı yardımı ile plakanın (flatjack) girebileceği şekilde harç kaldırılır ve yüzeyler düzeltilir. Harç boşaltıldıktan sonra komparatör ile tekrar ölçüm yapılır ve plaka, açılan bölgeye yerleştirilir. Hidrolik pompa kullanılarak plaka aracılığı ile duvar elemanına yük uygulanır, belirli yük aralıklarında boy değişimleri ölçülür [9].



Şekil 3.18 Tek plak ile ölçüm alınarak yük altında yerinde basınç deneyi yapılması (a) [46], (b) [9]

Yapılan ölçümler doğrultusunda (3.2) denklemi ile ölçüm yapılan kodlardaki basınç gerilmesi hesaplanır [60].

$$f_m = K_m \cdot K_a \cdot P \quad (3.2)$$

Buna göre;

f_m : Yığma yapıda ortalama basınç gerilmesi (MPa),

K_m : Flatjack kalibrasyon faktörü ($K_m = P_{\text{makine}} / P_{\text{flatjack}}$),

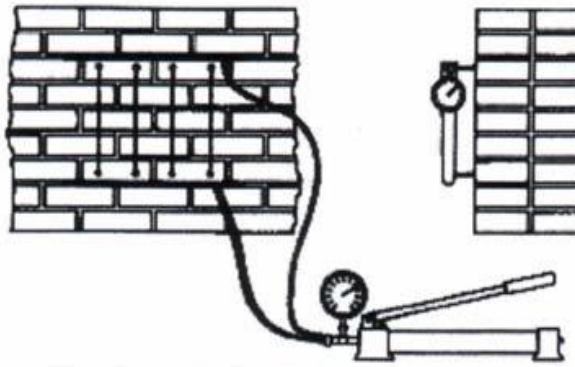
K_a : Flatjack /açılan bölge alan oranı,

P : Pimler arasında ölçülen mesafenin başlangıçta ölçülen değere gelebilmesi için gerekli olan flatjack basıncı (MPa)

Yerinde Elastisite Modülünün Belirlenmesi

Yerinde elastisite modülünün belirlenmesi için uygulanan flatjack deneyi; yığma yapılarda, elamana uygulanan kuvvetin (P , kN) ve kuvvete karşılık gelen boy değişiminin (Δl , mm) ölçülmesini sağlayan az tahribatlı bir deneydir.

Flatjack deneyinde elastisite modülünün hesaplanabilmesi çift plak ile ölçüm alınarak sağlanır (Şekil 3.19).



(a)



(b)

Şekil 3.19 Çift plak ile ölçüm alınarak yük altında yerinde elastisite modülünün belirlenmesi (a) [46], (b) [60]

Yerinde Kayma Dayanımının Belirlenmesi

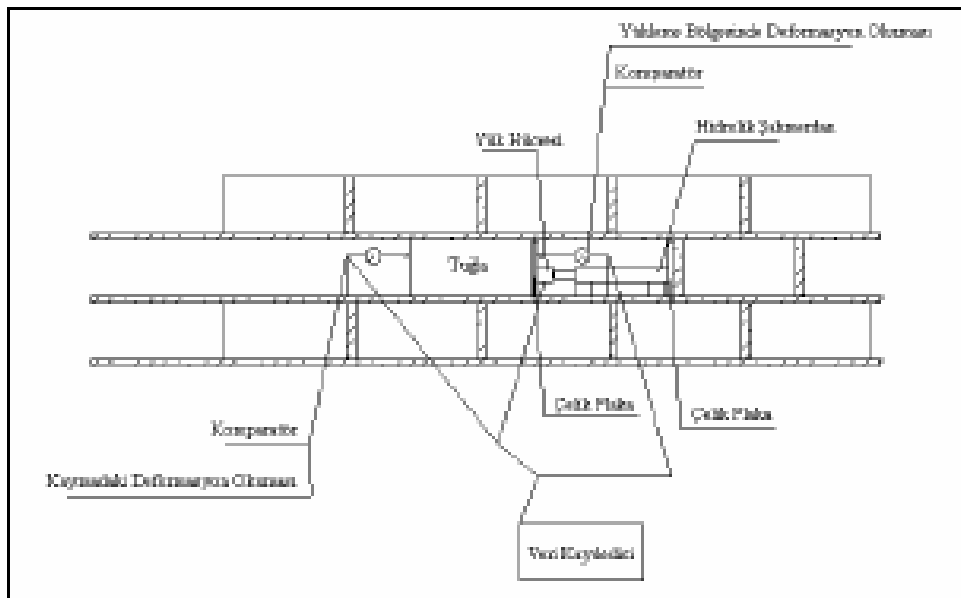
Yerinde kayma deneyi; yapıda tuğla veya taşın harç ile arasındaki kayma dayanımını belirleyen az tahribatlı bir deneydir (Şekil 3.20).

Deney seti, kuvvet uygulayan komprasör, kuvvet ölçer ve deplasmanı belirleyen transducerdan oluşur.

Ölçüm yapılacak bölgenin iki tarafı açılır. Bir taraftan yatay kuvvet (P_y , kN) uygulanır. Diğer tarafa yerleştirilen transducerın maksimum deplasmanı kaydettiği andaki kayma gerilmesi, yapıdaki kayma gerilmesi indeksi olarak belirlenir (Şekil 3.21) [60].



Şekil 3.20 Yerinde yük altında kayma deneyi yapılması [37]

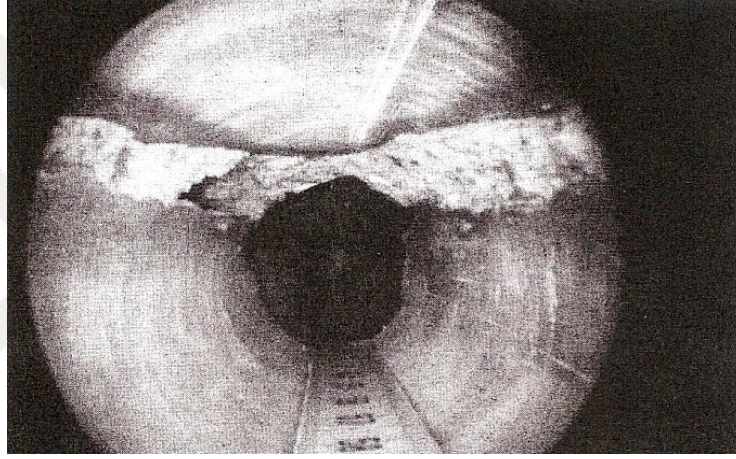


Şekil 3.21 Yerinde kayma deneyi [1]

Endoskopik Muayene Yöntemi

Endoskopik muayene yöntemi, yapı elemanının gözle görülmeyen kısımlarına ulaşarak görüntüsünün elde edilmesini sağlayan az tahribatlı bir yöntemdir. Bu yöntemle duvar kalınlığı boyunca malzeme ve iç yapıdaki değişiklikler, kullanılan harcın kalınlığı ve durumu, duvar iç bünyesindeki çatlakların durumu ve yönleri, daha önce yapılan müdahaleler hakkında bilgi sahibi olunabilir [35].

Taşıyıcı sistemin içini ortaya çıkarmak için, duvar düzlemine dik 30-40 mm çapında açılacak deliklere endoskopi cihazları yerleştirilir. Elde edilen görüntüler monitörlerle izlenerek kaydedilir veya fotoğraflanır (Şekil 3.22) [61].

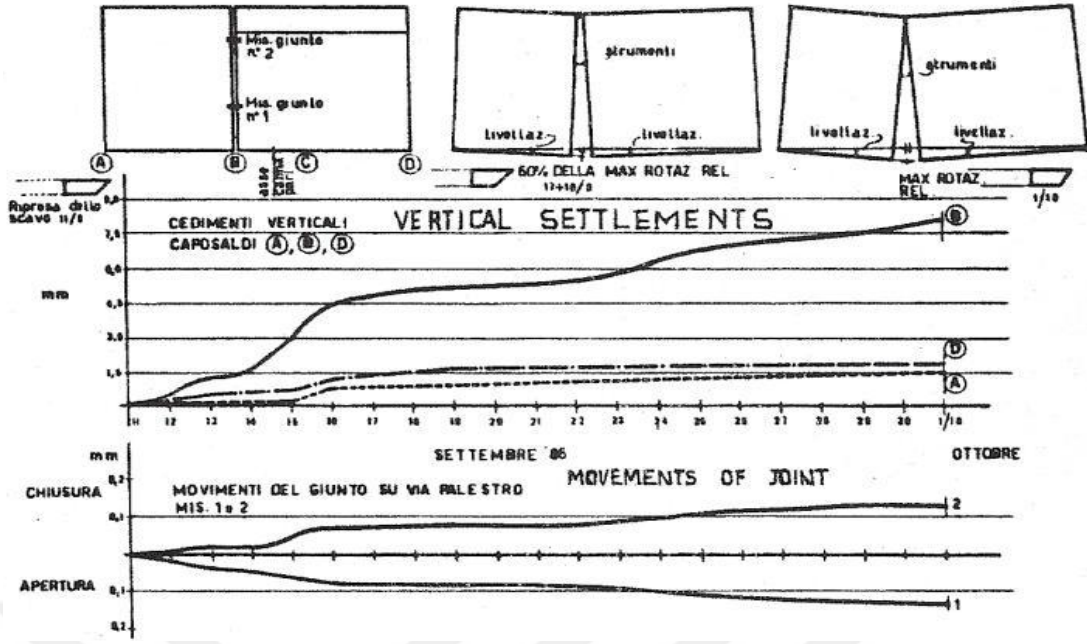


Şekil 3.22 Endoskopik incelemeler - harç [35]

Monitör-İzleme (Monitoring Systems)

Bir taşıyıcı sistemi izlemek; çatlakların genişlemesi veya azalması, eğilme açısındaki değişiklikler, deformasyonlar vb. durumlarda oluşan değişiklikleri kontrol etmek anlamına gelir. Monitör sistemi genelde merkezi bir birime bağlı sensörlerden oluşur ve sadece bilgileri kaydetmez ayrıca telefonla veya başka araçlarla bir bilgisayara iletir (Şekil 3.23) [35].

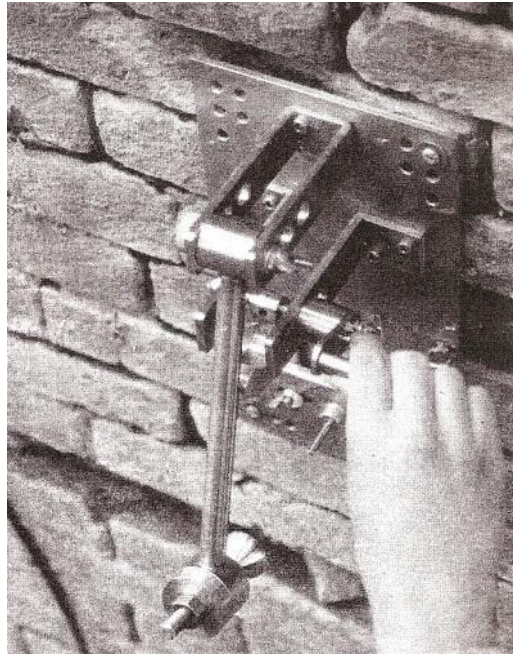
Bu testler belli sayıda sensörün, uygun yerlere yerleştirilmesine dayanır ve dinamik hareketler olduğu zaman taşıyıcı sistemin cevabını kaydetmek için elektronik bilgi elde etme birimleri kullanılır. Kaydedilen veriler taşıyıcı sistemin dinamik özelliklerini analiz etmek için kullanılabilir [35].



Şekil 3.23 Bir binanın temellerinin altındaki tünel çalışmaları sırasında oluşan hareketlerin kaydı [35]

Penetrasyon Testi (Penetration test)

Penetrasyon testi harçların mukavemetinin hesaplanmasında kullanılan bir yöntemdir. Bir çivinin içeri girmesine gösterilen direnç ölçülerek harçların mukavemeti hesaplanır. Darbelerin sayısı çivinin içeri girme derecesi ile ilişkilidir (Şekil 3.24) [35].



Şekil 3.24 Penetrasyon testi [35]

3.2.2 Laboratuvar Ortamında Yapılan Deneyler

Yapıdan numune alma işleminden sonra, alındığı yapıya, kata ve elemana göre kodlanmış numuneler laboratuvar ortamında yapılacak mekanik, fiziksel ve kimyasal deneyler için uygun hale getirilir. Laboratuvar sonuçları ile numunenin alındığı yapıya ait yerinde deney sonuçları karşılaştırılır ve bağıntı elde edilerek ölçüm yapılan elemanlara ait malzeme özellikleri belirlenir. Gerekli görülür ise malzemelerin iç yapı analizleri gerçekleştirilir ve onarım sırasında kullanılacak malzemelerin özgün malzemelerle uyumlu olması sağlanır [1].

Laboratuvar ortamında yapılan deneyler fiziksel, mekanik, fiziksel ve iç yapı deneyleri olarak ayrılmış ve Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3. 5 Tarihi yığma yapılarda laboratuvar ortamında yapılan deneyler

	YÖNTEMİN ADI	KULLANIM AMAÇLARI
FİZİKSEL DENEYLER	Birim Hacim Ağırlık	Malzemenin birim ağırlığını belirlemek [62]
	Özgül Ağırlık	Malzemenin özgül ağırlığını belirlemek [63]
	Kompasite ve Porozite	Malzemenin doluluk ve boşluk oranını belirlemek, su emme ve birim ağırlık-özgül ağırlık ilişkileri ile malzemenin iç yapısı hakkında fikir edinmek [1]
	Ağırlıkça ve Hacimce Su Emme	Malzemenin dışa açık boşluklarından emilen su miktarını ağırlıkça ve hacimce belirlemek [64]
	Kılcal Su Emme (Kapilarite)	Malzemenin kılcal boşluklarından suyun yüzey gerilimi etkisiyle yükselen su miktarını belirlemek [65]
	Renk Ölçümü	Özgün malzeme ile onarımda kullanılacak malzemenin renk uyumunu araştırmak [46]
MEKANİK DENEYLER	Basınç Dayanımı	Malzemenin düşey yükler altında mukavemetinin (kırılma dayanımının) ölçülmesi [66]
	Eğilme Dayanımı	Malzemenin çekme dayanımını dolaylı olarak belirlemek [66]
	Model Testleri	Yapı elemanlarının mekanik özelliklerini belirlemek [8]
KİMYASAL DENEYLER	Asit Kaybı	Harç numunelerinde agrega-bağlayıcı oranını elde etmek ve kullanılan agreganın dane dağılımını belirlemek [60]
	Kızdırma Kaybı	Harçların hidrolik özellikte olup olmadığını belirlemek [60]
İÇ YAPI DENEYLERİ	XRD Analizi	Malzemenin mineralojik analizini elde etmek [67]
	XRF Analizi	Malzemenin oksit cinsinden bileşenlerini belirlemek [67]
	TG-DTA Analizi	Sıcaklık değişimi ile oluşan kütle kaybından hidrolik özellikleri belirlenmesi [67]
	SEM-EDX Analizi	Malzeme kesitinden alınan fotoğraflar ile malzeme bileşenlerini belirlemek [67]
	FTIR Analizi	Dalga boyları değerlerine göre mineral grupları ve bağları belirlemek Malzeme içerisinde olabilecek tuz ve/veya organik maddeleri belirlemek [67]
	Petrografik Analiz	Malzeme kesitinden görüntü alınarak, incelenen yüzeydeki minerallerin yüzde cinsinden miktarlarını belirlemek [67]

3.2.2.1 Fiziksel Deneyler

Fiziksel deneyler sayesinde malzemenin gözenek yapısı, örneğin su ve gaz geçişi, donma çözülme dayanıklılığı, gözenek büyüklüğü gibi bilgiler edinilir. Fiziksel deneyler için hazırlanan numunelerde kılcal su emme ve ağırlıkça su emme deneyleri yapılır, deney sonuçlarından boşluklu birim hacim ağırlık (β , g/cm³), ağırlıkça su emme (a_s , %) ve hacimce su emme (h_s , %), kılcallık katsayıları (K_k , kg/m²Vs) belirlenir [68].

Birim Hacim Ağırlık

Malzemenin birim hacim kütlesini belirlemek amacıyla bu deney yapılır. Bir cismin kütlesinin (W , gr), boşluklar dahil doğal haldeki hacmine (V , cm³) oranına o cismin birim-hacim ağırlığı (β , gr/cm³) denir (3.3). Malzeme hacmi, malzeme düzgün şekilli ise boyutlarından (3.4), düzgün şekilli değil ise Arşimet prensibinden (3.5) yararlanılarak bulunur [62].

$$\beta = \frac{W}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (3.3)$$

$$V = a.b.c \quad (3.4)$$

$$V = W_{hava} - W_{su} \quad (3.5)$$

TS EN 1015-10 [62]a göre numuneler 24 saat süresince, serbest su miktarının buharlaşması amacıyla 60±5°C sıcaklıkta etüvde bekletilir. Bu süre sonunda ortam neminden etkilenmemesi amacıyla desikatörde bekletilerek numuneler ortam sıcaklığına gelince deneyler gerçekleştirilir.

Özgül Ağırlık

Bir cismin içinde boşluklarının bulunmadığı haldeki birim-hacim ağırlığına o cismin özgül ağırlığı (γ , g/cm³) denir. Bir malzemenin özgül ağırlığı ile birim-hacim ağırlığı birbirine eşitse bu malzemenin boşluksuz olduğu anlaşılır [62].



(a)

(b)

Şekil 3. 25 Özgöl ağırlık deneyi- YTÜ malzeme laboratuvarı, 2013 (a) Öğütülmüş harç, (b) Le Chetalier şişesi (Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Deney için kullanılacak malzeme belirli bir incelikte öğütülmüş olmalıdır (0,125mm altı) (Şekil 3.25a). Su ile dolu hacim ölçerde (Le Chetalier flask) (Şekil 3.25b) ilk hacim okuması yapılır (V_1 , cm³). Belirli miktar numune konulur ve 2. hacim okuması (V_2 , cm³) yapılır. İlgili formül ile (3.6) özgül ağırlık (γ , g/cm³) bulunur.

$$\gamma = \frac{W}{(V_2 - V_1)} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (3.6)$$

Kompasite ve Porozite

Kompasite ve Porozitenin hesaplanması malzemenin doluluk ve boşluk oranını belirlemek için yapılır. Elde edilen bilgiler ile su emme ve birim hacim kütlesi - özgül kütle ilişkileri ile malzemenin içyapısı hakkında fikir edinilmesi sağlanır.

Kompasite (k , %), malzemenin doluluk oranını, porozite (p , %) ise malzemenin boşluk oranını ifade eder. Porozite dışa açık, kapalı ve kılcal boşlukların tamamını ifade etmektedir. Birim ağırlık ve özgül ağırlık deneyleri sonucunda elde edilen değerler ile (3.7) denklemi kullanılarak kompasite hesaplanabilir [9].

$$k = \frac{\beta}{\gamma} \quad (3.7)$$

Bir malzemenin kompasitesi (k,%) içinde bulunan dolu kısmın hacminin (Vd, cm3) tüm hacmine (V, cm3) oranıdır. Cismin porozitesi ise boşlukların hacminin tüm hacmine oranıdır. Bu durumda bir cismin porozitesinin ve kompasitesinin toplamı tam hacmini vereceğinden bu toplam daima 1.0 değerini verecektir (3.8) [1].

$$p = 1 - k \quad (3.8)$$

Ağırlıkça ve Hacimce Su Emme

Boşluklu bir malzemenin, su içinde kalması veya su ile temas halinde olması durumunda dışa açık boşlukları oranında bir miktar su emer. Bu deneyin amacı malzemenin dışa açık boşluklarından emilen su miktarını ağırlıkça ve hacimce belirlemektir. Su emme, malzemenin mekanik özellikleri ve donma - çözölmeye karşı dayanıklılığı açısından önemlidir [64].

Cismin normal koşullar altında ve standartlarda belirtilen yöntemle boşluklarına emdiği su miktarının cismin ağırlığına oranına ağırlıkça su emme (as, %) (3.9) emdiği su miktarının cismin hacmine oranına hacimce su emme (hs, %) (3.10) denir.

$$a_s = \frac{W_s - W_0}{W_0} \% \quad (3.9)$$

$$h_s = \frac{W_s - W_0}{V} \% \quad (3.10)$$



Şekil 3. 26 Numunelerin havada ve suda tartılması - YTÜ malzeme laboratuvarı, 2013
(Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Numuneler derin bir kaba yerleştirilir ve ilk olarak yüksekliklerinin dörtte birine gelecek şekilde kap su ile doldurulur. 1 saat süresince bekletildikten sonra su numune yüksekliğinin yarısına gelecek şekilde eklenir. Sonraki 1 saatten sonra aynı işlem dörtte üçü için de tekrarlanır ve en son numuneler tamamen su altında bırakılır. 24 saatin sonunda numuneler sudan çıkarılır ve havada ve suda tartılır (Şekil 3.26) [1].

Kılcal Su Emme

Cismin alt yüzünün (tabanının) suya temas etmesi durumunda suyun kılcallık yoluyla zamana bağlı olarak yükselmesi ile saptanan bir büyüklüktür [69]. Deneyin amacı malzemenin kılcal boşluklarından suyun yüzey gerilimi etkisiyle yükselen su miktarının ve malzemenin ağırlık artışı ile kılcal su emme katsayısının (kılcallık) belirlenmesidir (Şekil 3.27) [65].

TS EN 1015-18 e göre, deney numunelerinin kuru tartımları (W , kg) alındıktan sonra, numunelerin su ile temas eden bölümleri ölçülür ve temas eden alan (A , m^2) hesaplanır. Daha sonra numuneler su içerisine konarak (Şekil 3.27) belirli dakikalarda (t_i , s), ağırlıkları (W_i , kg) belirlenir ve emilen su miktarı (Q_i , kg/m^2), (3.11) bağıntısı ile bulunur.



Şekil 3. 27 Kılcal su emme deneyi [60]

$$Q_i = \frac{W_i - W_o}{A} \text{ kg/m}^2 \quad (3.11)$$

Kılcılık katsayısını bulmak için $Q_i - v_{ti}$ grafiği çizilerek doğru eğiminden faydalanılır [1].

Renk Ölçümü

Cisimlerin fiziksel özelliklerinden biri de renktir. Onarım ve sağlamlaştırma sırasında kullanılacak yeni malzemenin özđün malzeme ile renksel özelliklerinin de uygun olması ve rengin zaman içerisinde nasıl deđiőeceđinin belirlenmesi önemlidir. Bu nedenle malzemenin renk özelliği belirli renk sistemleri aracılığı ile tanımlanmalı ve nesnel renk ölçüm yöntemleri belirlendikten sonra renk ölçümü yapılmalıdır [46].

3.2.2.2 Mekanik Deneyler

Tarihi yapılardan yeterli miktarda ve büyüklükte numune alınabilmiő ise malzemelere basınç dayanımı ve eğilme dayanımı gibi mekanik testler yapılabilir.

Ayrıca belli ölçekte yapılan yapı ya da yapı elemanı modelleri üzerinde mekanik özelliklerin belirlenmesi için de testler yapılabilmektedir.

Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı (f_b , MPa) testleri ile malzemenin düşey yükler altında mukavemetinin (kırılma dayanımının) ölçülmesi amaçlanır [66].

Düz yüzlü olmayan, standard basınç dayanımı testi uygulanamayan formdaki örneklere ise aynı amaçla nokta yükleme testi yapılır.



şekil 3. 2 Çelik plakalar arasına konan numunenin düşey yük altında kırılması - YTÜ malzeme laboratuvarı, 2013 (Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

TS EN 1015-11 [66]e göre hazırlanan numuneler basınç cihazına çelik plakalar arasına yerleştirilir. Düşey yük etkisi altında numunelerin kırılmasına neden olan maksimum yük belirlenir (Şekil 3.28). İlgili formül ile (3.12) dayanım hesaplanır [1].

$$f_b = \frac{P}{A} \text{ MPa} \quad (3.12)$$

Eğilme Dayanımı

Eğme deneyi ile malzemenin çekme dayanımı dolaylı olarak belirlenir. TS EN 1015-11 [66] e göre hazırlanan numunenin orta noktasından kuvvet uygulanır, malzemenin kırılmasına neden olan maksimum yük belirlenir (Şekil 3.29). İlgili formül ile dayanım (f_e , MPa) hesaplanır (3.13)

$$f_e = \frac{1.5xPxL}{bxd^2} \text{ MPa} \quad (3.13)$$



Şekil 3. 3 Çelik eğilme aparatına konulan numunelerin eğilme dayanımının belirlenmesi
- YTÜ malzeme laboratuvarı, 2013 (Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Modeller Üzerinde Testler

Modeller üzerindeki testler; belli ölçekte yapılan yapı ya da yapı elemanı modelleri üzerinde mekanik özelliklerin belirlenmesi ya da sarsma tablası üzerinde sismik dayanım ve onarım yöntemlerinin belirlenmesi amacıyla uygulanır [8].

Bazen yapıyı temsil edecek çeşitli ölçeklerde, orijinal malzemeye uygun malzemeler ve teknikler ile deney modelleri oluşturularak laboratuvar ortamında çeşitli dinamik ve

statik deneyler yapılır. Bu yöntemde, yapının davranışına en yakın saptamalar ve malzemelerin özellikleri, elemanların davranışları belirlenebilir [15]. Şekil 3.30 'da bu tür deneylerden örnekler görülmektedir.



Şekil 3. 30 Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen model deneyleri [15]

3.2.2.3 Kimyasal Deneyler

Tarihi yapıdan alınan ve fiziksel olarak ayrıştırıldıktan sonra toz haline getirilen numuneler, asit ve alkalide çözüldükten sonra birçok kimyasal deneyler ile bileşenleri belirlenebilir [70].

Asit Kaybı Deneyi

Asit kaybı deneyi, harç numunelerinde agrega-bağlayıcı oranını elde etmek ve kullanılan agreganın dane dağılımını belirlemek için yapılan bir deneydir.

Deneyde kullanılan standard bir ağırlık yoktur. Malzeme ne kadar fazla ise o kadar doğru sonuç elde edilebilir.

Deney, %10 seyreltilmiş HCl ile harcın manyetik karıştırıcıda karıştırılarak, 1 saat boyunca tepkimeye tabi tutulması sonucu kirecin erimesi ve geriye agreganın kalması ile başlangıç miktarı bilinen harcın agrega-bağlayıcı oranının bulunmasıdır. Elde edilen agrega filtre kağıdında süzöldükten sonra hassas terazide ölçümü yapılır (Şekil 3.31). Ancak agrega kalker esaslı olmamalıdır [9,60].

Asitle yapılan işlem sonrası numune 24 saat süresince sıcaklığı $100\pm5^{\circ}\text{C}$ olan etüvde bekletilir ve bu süre sonundaki ağırlığı belirlenir (W_1 , g). Elde edilen veriler sonucunda bağlayıcı/agrega oranı belirlenir.



Şekil 3.31 Harç numunesine HCl eklenmesi, manyetik karıştırıcıda karıştırılması ve filtre kağıdından süzülmesi - YTÜ malzeme laboratuvarı, 2013 (Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Asit tepkimesi sonrası geriye kalan agregada granülometri deneyi (elek analizi) (Şekil 3.32) ile agregada dane dağılımı belirlenebilir [9,60].



Şekil 3.32 Granülometri deneyi - YTÜ malzeme laboratuvarı, 2013 (Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Kızdırma Kaybı Deneyi

Kızdırma kaybı deneyi ile harçların hidrolik özellikte olup olmadığı belirlenir.

Şüphelenilen harç, 100, 550 ve 1050°C'ye maruz bırakılır, bu sıcaklıklar sonrasında ağırlıkları belirlenir. 100°C'nin sonunda serbest su, 550°C'nin sonunda kimyasal bağlı su çıkışından dolayı ağırlık kayıpları meydana gelecek, 1050°C'de ise CO₂ çıkışı gerçekleşecektir (3.14) [9,60].



Su kaybının CO₂ kaybına oranı ile harcın hidrolik olup olmadığı belirlenebilir:

- H₂O/CO₂ sonucu; 1-10 ise hidrolik,
- H₂O/CO₂ sonucu > 10-35 ise hidrolik değildir, denilebilir. Harcın hidrolik olmaması dayanım kazanma hızının düşük olması ve havadaki CO₂ ile birleşerek, uzun sürede dayanım kazanması anlamına gelir [9,60].

3.2.2.4 İç Yapı İncelemeleri ve Diğer Analizler

Fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenen malzemelerin, onarımda kullanılacak malzeme ile uyumunun araştırılması amacı ile taş, tuğla ve özellikle harç numunelerin mikro yapısal özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle malzemeler üzerinde malzemenin mineralojik özelliklerini elde etmek için XRD, malzemenin oksit cinsinden bileşenlerini belirlemek için XRF, sıcaklık değişimi sayesinde oluşan kütle kaybından hidrolik özelliklerini belirlemek için TG-DTA, malzeme kesitinden alınan fotoğraflar ile malzeme bileşenlerini belirlemek için SEM-EDX, dalga boyları değerlerine göre mineral grupları ve bağları belirlemenin yanında malzeme içerisinde olabilecek tuz ve/veya organik maddeleri belirlemek için FTIR, malzeme kesitinden görüntü alınarak, incelenen yüzeydeki minerallerin yüzde cinsinden miktarlarını belirlemek için ise petrografik analiz yöntemleri uygulanmaktadır [67].

TARİHİ YIĞMA YAPILARDA UYGULANAN ONARIMLAR VE ENJEKSİYON YÖNTEMİ (GROUTING)

Tarihi yığma yapılarda onarıma başlamadan önce yapının rölövesi çıkarılmalı, yapının mevcut durumu, yapıda meydana gelen hasarlar ve bozulmalar tespit edilmeli, yapının taşıyıcı sisteminin davranışı ve yük dağılımının yanı sıra özgün malzeme özellikleri belirlenmeli, yerinde araştırmalardan laboratuvar analizlerine kadar bilimsel araştırma ve malzeme incelemesi uzmanlar tarafından yapılmalıdır. Bütün bu araştırmalardan sonra onarımda müdahale minimum düzeyde tutularak, kullanılacak yöntem belirlenmelidir.

4.1 Tarihi Yığma Yapılarda Uygulanan Onarımın Tanımı ve Ana İlkeleri

Yapı sistemlerinde onarım; hasar görmüş yapısal elemanların yapıldıkları andaki mukavemetinin kazandırılması ve yapısal olmayan elemanların tamiri ile yapının hasar görmeden önceki haline kavuşturulmasıdır [71].

Yapılarda meydana gelen her türlü hasarın bir ya da birçok nedeni bulunmaktadır. Onarımda genel ilke öncelikle yapının hasara uğramasına sebep olan bu faktörleri ortadan kaldırmak ve ardından hasarlı bölgeye müdahalede bulunmaktır.

Tarihi yapıların onarımı ve koruma anlayışının geliştirilmesi çalışmalarında günümüze kadar pek çok yasa, yönetmelik, tüzük vb. hazırlanmıştır. Tarihi yapıların bilinçli korunumu ve doğru onarımı için öncelikle bu yasa ve yönetmelikler ile günümüze kadar yapılan çalışmalar incelenmelidir.

Korumaya yönelik ilk yasaların hazırlanması ve onarımların bilimsel yöntemle yapılan bir uğraşa dönüşmesi ancak 19. yüzyılda, Avrupa'da olmuştur [72]. Boito 1883'te ve sonrasında "Carta Del Restauro" olarak anılacak olan ilkeleri ortaya koymuştur.

1931'de Atina'da toplanan "Tarihi Anıtların Korunması ile İlgili Mimar ve Teknisyenlerin I. Uluslararası Konferansı'nda", korumanın genel ilkeleri de ortaya konularak onarım kuralları kabul edilmiştir. Konferansta kabul edilen "Carta Del Restauro" bildirgesindeki temel ilkeler İtalya tarafından 1932 yılında kabul edilerek "Carta Del Restauro Tüzüğü" adı altında toplanmış ve yasal bir kimlik kazanmıştır [1].

Carta Del Restauro Tüzüğü [2] ne göre;

- Restorasyon sırasında farklı kurumlar beraber çalışmalı, görüş birliğinde olmalı ve bir görüş diğerini etkisiz kılmamalıdır.
- Tarihi yapıyı oluşturan ve farklı dönemlerde yapılmış hiç bir bölüm yok edilmemelidir.
- Bilim adamlarını yanıltacak eklemeler yapılmamalıdır.
- Araştırmalar sırasında ortaya çıkan özgün malzeme korunmalıdır.
- Anıta ve geçirdiği dönemlere olduğu kadar çevresine de saygılı olunmalıdır.
- Bir anıtın taşıyıcı sistemini güçlendirmek veya kütlelerini bütünlemek için eski yapım yöntemleriyle amaca ulaşılmazsa, çağdaş tekniklerin kullanılması uygun olabilir.
- Yapılan tüm restorasyon işlemleri çizim, rapor ve fotoğraflarla belgelenmelidir.

Eski yapıların korunması ve onarımıyla ilgili ilkeler üzerinde karar vermek ve bunları uluslararası bir temele yerleştirmek amacıyla Venedik'te 25-31 Mayıs 1964 tarihleri arasında toplanan "II. Uluslararası Tarihi Anıtlar Mimar ve Teknisyenleri Kongresi", "Venedik Tüzüğü" adıyla anılan kararları almıştır [73].

Venedik Tüzüğü [3]ne göre; Onarım uzmanlık gerektiren bir iştir ve amacı, anıtın estetik ve tarihi değerini korumak ve ortaya çıkarmaktır (madde 9), Onarım kendine temel olarak aldığı özgün malzeme ile güvenilir belgelere saygıyla bağlıdır (madde 9), Geleneksel tekniklerin yetersiz kaldığı yerlerde, koruma ve inşa için bilimsel verilerle ve

deneylerle geçerliliği saptanmış herhangi çağdaş bir teknik kullanılarak anıt sağlamlaştırılabilir (madde 10).

1965 yılında, Varşova’da toplanan ICOMOS 'un (Uluslararası Anıtlar ve Sitler Konseyi) birinci genel kurulu niteliğindeki kongre hem Venedik Tüzüğü’nü uluslararası düzeyde kabul etmiş, hem de ICOMOS’un kuruluş kararını vermiştir [74].

Koruma eğitimi, gereksinimleri ve etiği konulu ICOMOS uluslararası konferansı 12 -17 Haziran 1995 tarihleri arasında Finlandiya’nın Suomenlinna ve Helsinki kentlerinde gerçekleşmiştir. Suomenlinna Kararları [75] na göre;

- Koruma, yeterli eğitim ve deneyim sahibi kişiler tarafından yapılmalı, çeşitli meslek gruplarının ortak çalışması ile gerçekleştirilmelidir.
- Uygulama öncesi bir anıtın tüm fiziksel özellikleri araştırılmalı, genel durumu değerlendirilmeli, bozulma nedenleri ve diğer sorunları incelenmelidir.
- Bu araştırmalara dayanarak yapı üzerinde yapılacak her türlü uygulamada kullanılabilecek bir temel yaklaşım getirilmeli ve kısa/uzun vadeye yayılan bir koruma planı yapılmalıdır.
- Yapılan uygulamaların bir resimli teknik raporu hazırlanmalı ve kamu arşivlerinde bulunmalıdır. Ayrıca halkın kullanımı için de bir rapor hazırlanmalıdır.
- Uygulamalar yapıya zarar vermemelidir ve gerekli olan en az müdahale ile sınırlandırılmalıdır.
- Yeni teknik ve malzemeler gerekli, testler yapılmadan ve bilimsel bir uzman görüşü almadan uygulanmamalıdır.
- Uygulamalar gelecekte yapılacak olan çalışmaları yanıltmamalı, mümkün olduğunca geriye dönülebilir, yenilenebilir ve çevresiyle uyumlu olmalıdır.

1994 yılında Japonya’nın Nara kentinde "Nara Özgünlük Belgesi" yayınlanmıştır. Bu bildirge kültürel miras çeşitliliği ve özgünlük kavramı açısından süreç içerisinde önemli yere sahiptir. UNESCO’nun “Birimizin kültür mirası, hepimizin mirasıdır” anlayışı ana ilke olarak belirlenmiştir. Bir kültür mirasının özgün olup olmadığı yargısına varabilmek için; tasarımı, biçimi, malzemesi, kullanımı, işlevi, gelenek ve yapım teknikleri, konum

ve yerleşimi, ruh ve anlatımı, ilk tasarım ve tarihsel evrimi gibi özelliklerinin değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir. [76]

1999'da Meksika'da yapılan ICOMOS'un 12. Genel Kurulunda kabul edilen Geleneksel Mimari Miras Tüzüğü [77] ne göre; Çağdaş malzeme kullanımı zorunlu olduğunda, onarım bütünü genel ifadesine uyumlu, görünüş, doku ve biçim yönünden aykırı olmayan malzemelerle yapılmalı; yapı malzemelerin birbiriyle uyumuna özen gösterilmelidir.

Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Kurumu'nun (UNESCO) 16 Kasım 1972 tarihli XVII. Genel Kurulunda, Dünya Kültürel ve Doğal Mirasının Korunmasına Dair Sözleşme'ye Türkiye Cumhuriyetinin katılması uygun bulunmuştur. Türkiye'nin taraf olduğu ilk belge olan bu sözleşme, kültürel ve doğal mirasın sadece o ülke insanlarının değil, tüm dünyanın ortak malı olduğu kavramını getirmiş ve üye ülkeleri, "Kültürel ve doğal mirasa, toplumun yaşamında bir işlev vermeyi ve bu mirasın korunmasını kapsamlı planlama programlarına dahil etmeyi amaçlayan genel bir politika benimsemeye" çağırmıştır [78].

1983 yılında 1710 sayılı Eski Eserler Yasası kaldırılmış, yerine 2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Yasası getirilmiştir. Bu yasada eski eserler deyimi yerine UNESCO tarafından benimsenen "Kültür Varlıkları" deyimi kullanılmıştır. İki yasa arasındaki en önemli fark, 2863 sayılı yasada kesin bir zaman sınırı getirilmiş olmasıdır [79].

Türkiye'nin taraf olduğu ikinci sözleşme, 1989 yılında onaylanan "Avrupa Mimari Mirasının Korunması Sözleşmesi"dir. 1985 yılında, Granada'da Avrupa Konseyine üye ülkeler tarafından kabul edilen bu sözleşmeye göre, ülkeler, mimari mirasın korunması için yasal önlemler almayı ve bu önlemler çerçevesinde her ülkeye ve bölgeye özgü yöntemlerle, anıtları, bina gruplarını ve sitleri korumayı üstlenmiş bulunmaktadır [80].

Türkiye'de, Türkiye Anıt-Çevre-Turizm Değerlerini Koruma Vakfı (TAÇ Vakfı), Turing ve Otomobil Kurumu, Bursa Eski Eserleri Sevenler Derneği, Tarihi Evleri Koruma Derneği gibi sivil toplum kuruluşları tarihi yapıların onarılmaları ve korunmaları ile ilgili olumlu çalışmalar yapmıştır. Mimarlar Odası, Tarih Vakfı, Çevre ve Kültür Değerini Koruma Derneği (ÇEKÜL), Galata Derneği, Zeyrek Koruma Derneği, Cihangir Derneği gibi

kuruluşlar da tespit işlemlerinde, arşiv ve kütüphane hizmetlerinde önemli katkılar sağlamaktadırlar. 1974 yılında ICOMOS Türkiye Milli Komitesi kurulmuştur [1,45].

30 Mayıs 2012 ve 17 Mart 2013 tarihleri arasında gerçekleştirilen Ulusal Mimari Koruma Uzmanları Toplantıları ve ICOMOS Türkiye Milli Komitesi'nin revizyonu ile son şekli verilerek 2013 yılında "ICOMOS Türkiye Mimari Mirası Koruma Bildirgesi" [81] yayınlanmıştır.

Buna göre;

- Mimari mirasın korunmasına yönelik müdahalelerde yapının özgünlüğünün tüm boyutlarıyla korunması esastır.
- Müdahaleler yapıya zarar vermemeli; tarihi belge niteliği olan izlerin yok olmasına ve değiştirilmemesine dikkat edilmeli; yapının bütünlüğü korunmalıdır.
- Herhangi bir kültürün (veya dönemin) verisi, zorunlu olmadıkça diğer bir kültürün verilerinin açığa çıkarmak için ortadan kaldırılmamalıdır. Bu konuda girişilecek eylemler, uzmanların ortak mutabakatı ile gerçekleştirilmelidir.
- Müdahaleler, daha sonra gerçekleştirilecek araştırma ve çalışmaları yanıltmamalı, özgün yapıya olabildiğince zarar vermeden kaldırılabilir ve/veya yenilenebilir tekniklerle yapılmalıdır.
- Özgün malzeme ve tekniklerle birlikte kullanılması zorunlu olan yeni malzeme ve teknikler, ilgili proje özelinde tanımlanacak testler yapılmadan ve bilimsel verilerle uygunluğu ortaya konulmadan kullanılmamalıdır.
- Uygulama sürecinde ve sonrasında yapılan müdahalelerin etkinliğini belirleyecek şekilde, ölçüme dayalı ve düzenli izleme yapılacak mekanizmalar tanımlanmalıdır.
- Mimari mirasın korunması ile ilgili olarak proje hazırlama, uygulama ve denetleme süreci, bu sisteme özgü geliştirilecek yasal çerçeve (ihale kuralları-koşulları ve fiyatlandırma sistemi) kapsamında ele alınmalıdır.
- Uygulamanın her aşaması belgelenmeli ve bu belgeler, sürecin başlangıcında hazırlanacak diğer belgelerle birlikte arşivlerde bulundurulmalıdır. Bu arşivler, telif

haklarının gerektirdiği koşullar saklı kalarak, tüm uzmanların inceleme ve kullanımına açık tutulmalıdır.

- Her kültür varlığının kendine özgü sorun ve potansiyeli olduğu göz önüne alındığında, evrensel ve ulusal yaklaşımlara uyulmak koşuluyla projelendirme ve uygulamada değişik değerlendirme ve çözümler gerekebileceği kabul edilmelidir. Bu kabulün doğal sonucu olarak, bu çok zengin ve çeşitlilik gösteren kültürel mirasın belgelenmesi, değerlendirilmesi ve uygulamaya yönelik müdahalelerin belirlenmesinde genellemelerden kaçınılmalıdır.

4.2 Tarihi Yığma Yapılarda Uygulanan Onarım Teknikleri

ICOMOS Türkiye Mimari Mirası Koruma Bildirgesi [81] ne göre Tarihi yapıya yapılacak onarımın boyutu yaklaşımları ve teknikleri müdahale ölçeği ve müdahale yaklaşımları ile müdahale teknikleri başlıkları altında incelenmiştir. Koruma müdahalelerinde özgün niteliklerin korunması ve en az müdahale esastır. Onarım sırasında müdahale ölçeği, müdahale yaklaşımları ve müdahale tekniklerinden bir ya da birkaçına bütüncül bir anlayış ile başvurulabilir.

4.2.1 Müdahale Ölçeği ve Müdahale Yaklaşımları

Müdahale ölçeği, yapılacak onarımın ve/veya bakımın boyutu hakkında belirleyici rol oynar. Bakım, basit onarım ve esaslı onarımı kapsar.

Bakım; yapının özgün şekli ile korunmasını, geleceğe aktarılmasını ve yapının yaşamını sürdürmesini amaçlayan; tasarımda, malzeme, strüktürde ve mimari öğelerde değişiklik gerektirmeyen uygulamalardır (çatı aktarımı, oluk onarımı, boya-badana vb.) [81].

Basit onarım; yapıların, taşıyıcı sistemine ve plan kurgusuna müdahale etmeden, bozulan ve eksilen malzeme ve mimari elemanlarının uzman değerlendirmesiyle, belgeleme ve irdelemeye dayalı olarak, özgün biçimlerine uygun şekilde onarılması veya tamamlanmasıdır [81].

Esaslı onarım; kültür varlıklarının bakım ve basit onarımla çözülemeyen sorunlarına yönelik, çoğu kez birkaç müdahale tekniğinin bir arada kullanıldığı, projeye dayalı

uygulamalardır. Müdahalelerin derecesi, yapıdaki hasarların niteliği ve çağdaş kullanımın gerektirdiği donatıların eklenmesi gerekliliğine göre değişir. Hasarlı, ya da eksik olan kesimlere yapılacak müdahale, yapının sunumu ve/veya kullanımıyla bağlantılı olarak malzemelerinin sağlamlaştırılmasından, yeniden yapımına doğru artar [81].

Müdahale yaklaşımları; sağlıklılaştırma-rehabilitasyon, yeniden kullanım-yeni işleve uyarlama, taşıma, anastylosis ve yeniden yapım olarak sınıflandırılabilir.

4.2.2 Müdahale Biçimleri

Müdahale biçimleri; acil koruma önlemleri, koruma, sağlamlaştırma, bütünleme, yapısal iyileştirme ve güçlendirmedir.

Tarihi yığma yapıların onarımında kullanılan enjeksiyon yöntemi ise genellikle sağlamlaştırma olmak üzere, yapısal iyileştirme ve güçlendirme sırasında da kullanılabilen bir tekniktir.

Sağlamlaştırma

Sağlamlaştırma, "kültür varlığının bozulma sürecinin engellenmesi veya yavaşlatılması amacıyla malzemesinin ve/veya taşıyıcı sisteminin dayanımının arttırılması, mevcut fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi işlemleridir" [81].

Tarihi yapılar, inşa edildikleri yörenin olanaklarına ve geleneklere bağlı olarak kerpiç, tuğla, ağaç, taş gibi doğal kökenli malzemelerle yapılmışlardır. Zamanla bu malzemelerde bozulmalar meydana gelir. Günümüzde kerpiç malzeme, sürekli bakım yöntemiyle, çamur harcı ile sıvanarak korunur. Ahşap öğelerin sağlamlaştırılması için ise üzerine etkiyen yapı yüklerini karşılaması ve sistemin stabilitesini arttırmak için müdahalelerde bulunulur. Taş ve tuğlaların sağlamlaştırılması da özel kimyasal malzemelerin onarılacak bölgeye enjekte edilmesi ya da malzeme yüzeyine püskürtülmesi ile yapılmaktadır. Sağlamlaştırma yöntemi taşın ve tuğlanın türüne ve bozulma durumuna göre belirlenmeli, kullanılacak kimyasal malzeme orijinal malzemenin özgün yapısını değiştirmemelidir [45].

Yapısal İyileştirme

Yatay ve düşey yükler göz önünde bulundurularak, yapının mevcut güvenlik seviyesinin iyileştirilmesi ve en fazla ilk yapım aşamasında sahip olduğu güvenlik seviyesine kadar çıkarılmasıdır. Müdahaleler yapı bileşenlerinin bir bölümünü ya da taşıyıcı sistemin bütününe kapsayabilir. Yapının mevcut taşıyıcı sisteminin, işlevini yeterince yerine getiremediği durumlarda, hasarlı yapı bileşenlerine yapılacak destekler uygulamada farklı müdahale tekniklerini içerebilir. Müdahaleler, özgünlük-güvenlik ilişkisini optimum düzeyde sağlayacak biçimde tasarlanmalıdır [81].

Güçlendirme

Bir yapının mevcut güvenlik seviyesinin işlev değişikliği ya da standartların gereği olarak yükseltilmesi amacıyla yapılan strüktürel müdahalelerin tümüne güçlendirme denir. Kültür varlıklarının mimari bütünlüğüne zarar vermeden, aşağıdaki ilkeler çerçevesinde ve buna uygun geliştirilecek düzenlemeler doğrultusunda zorunluluk durumunda ve dikkatlice uygulanmalıdır:

- Geleneksel tekniklerle inşa edilmiş yapılarda strüktürel güvenliği arttırmak amacıyla yapılacak müdahaleler yapının özgün strüktürel bünyesini değiştirmemeli ve geri dönülebilir olmalıdır.
- Erken modern ve çağdaş yapı strüktürleri söz konusu olduğunda, özellikle kamusal kullanımlarda olması durumunda, yapının özgün niteliklerinin başkalaştırılmasına yol açılmaması öngörülür [81].

4.3 Tarihi Yığma Yapıların Onarımında Uygulanan Enjeksiyon Yöntemi (Grouting)

Bu çalışma kapsamında tarihi yapıların onarımında uygulanan ve bir sağlamlaştırma tekniği olan enjeksiyon yöntemi (grouting) incelenmiştir.

Önceki araştırmalar; tuğla kırığı ve tozlaşmış kül ya da süper akışkanlaştırıcılar gibi daha güncel katkıları eklenmiş geleneksel hidrolik kireç esaslı karışımlardan; çimentolu karışımların güncel adaptasyonlarına kadar farklı malzemeleri içermiştir. Araştırmaların çoğu, hem geleneksel hem de modern malzemeleri içeren karışımları test etmek üzerine odaklanmışlar ve tarihi yığma strüktürlerle uyumlu yeni formüller geliştirmeyi

amaçlamışlardır. Kireç, doğal puzolanlar, portland çimentosu ve silis dumanı önceki test programlarında seçilen malzemelerdir ve orijinal yığma yapıyla fiziko-kimyasal uyum ve yığma yapının mekanik dayanımını arttırmak performans kriterleridir.

İngiltere'de, 19.yy da portland çimentosunun gelmesinden günümüzde tarihi yapıları koruma ve onarma ihtiyacı doğana kadar kireç-puzolan karışımları unutulmuştur. portland çimentosunun erken priz alması, yüksek dayanıma ve mukavemete sahip olması, geçirgenliğinin az olması, kolay bulunabilir olması, düşük maliyetli olması ve yaygın kullanımı nedeniyle, mimari koruma alanında da portland çimentosu kullanılmaya başlanmıştır. Enjeksiyon şerbetleri karışımlarında sentetik reçineler de kirecin yerini almıştır. Fakat 1970'lerin sonlarında portland çimentosunun zararlı etkileri keşfedilince kültürel kaynakları korumak için daha uygun olan kireç ve puzolanik katkılara tekrar geri dönmüştür [82].

Şerbet enjeksiyonu; tarihi yapıların onarımı sırasında, taş, tuğla ve harçların sağlamlaştırılması için çatlakların ya da boşlukların bulunduğu strüktüre uygulanan bir sıvı enjeksiyon yöntemidir. Enjeksiyon uygulaması ile duvar içerisinde bulunan boşlukların ve çatlakların doldurularak duvar kesitinin sürekliliğini sağlamak ve tekrar monolitik bir yapı elde etmek amaçlanır. Böylece duvar üzerindeki yükler kesintisiz olarak temellere aktarılır ve olası dökülmeler ve göçmeler engellenmiş olur [83].

Enjeksiyon şerbeti (grout), yüksek miktarda su içerir. Bu nedenle yığma sistemler içerisinde çatlaklara, boşluklara ve bağlantı noktalarına dökülebilecek ya da pompalanabilecek bir kıvama sahiptir [84]. Şerbet ayrıca bünyesinde, kireç, rötne engelleyici, doğal su tutucular ve süper akışkanlaştırıcılar da barındırır [45].

Bu çalışma kapsamında incelenen kireç esaslı enjeksiyon şerbetinin avantajları ve dezavantajları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4. 1 Kireç esaslı enjeksiyon şerbetinin avantajları ve dezavantajları

Kireç Esaslı Enjeksiyon Şerbetinin Dezavantajları	Kireç Esaslı Enjeksiyon Şerbetinin Avantajları
Kirecin karbonatlaşma sürecinin genellikle çok yavaş olmasıdır. Her ne kadar puzolanlar şerbetin son dayanıma ulaşmasında katkıda bulunuyor olsa da, ilk dayanımına etki etmezler [85].	Geleneksel yığma strüktür ile uyumudur. Harç ile aderansının yüksek olması nedeniyle göreceli düşük dayanımı göz ardı edilebilir [82].
Enjekte edilebilir kireç esaslı enjeksiyon şerbeti elde edebilmek için çok miktarda suya ihtiyaç olmasıdır. Bu durum zayıf şerbet üretimine neden olur [82].	Kireç ayrıca viskozite sağlayan bir katkı maddesidir ve bu enjeksiyon şerbetinin hacim sabitliği için önemlidir. Su geçirirliiliğinin yanı sıra tuzlara ve sülfatlara karşı dayanıklı olması, çimentoya kıyasla kireç esaslı enjeksiyon şerbetini daha esnek bir malzeme yapar [85].

4.3.1 Zaman İçerisinde Tarihi Yığma Yapıların Onarımında Kullanılan Enjeksiyon Yönteminin (Grouting) Gelişimi

Literatür incelendiğinde enjeksiyon şerbetinin ve şerbet enjeksiyonunun uygulama tekniklerinin son yıllarda önem kazandığı söylenebilir. Enjeksiyon şerbeti araştırmaları özellikle geleneksel yığma yapıların sıklıkla bulunduğu Batı Avrupa, İtalya ve Yunanistan'da görülmektedir. Şerbet enjeksiyonunun küçük ince sıva birleşimlerinden büyük strüktürel onarımlar için kullanılmasına kadar çok geniş bir uygulama alanı vardır. Uygulama büyük de olsa küçük de olsa malzemenin ön deneyleri yapılmalı ve uygulama tekniği belirlenmelidir [82].

Geçmişte yığma yapı onarımlarında kullanılan Portland çimentosunun zararlarının keşfedilmeye başlanmasından sonra, kireç esaslı enjeksiyon şerbeti gibi geleneksel malzeme esaslı malzemelerin araştırılması gündeme gelmiştir. Bu araştırmalar sonucunda, yapılan uygulamanın sonuçlarının daha iyi algılanması ve uygulama yapılan yeni malzemenin var olan tarihi yapıya ait özgün malzemeler ile daha iyi uyum sağlayabilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca, yapılan çalışmalar sayesinde ana hatlarıyla prensiplerin tanımlanması, performans standartlarının belirlenmesi, laboratuvar ve yerinde testlerle yeni ve gelişmiş malzeme formüllerinin sağlanması hedeflenmektedir.

1960-1979 - Sismik Alanlarda Tarihi Yiğma Strüktürlerin Dayanımının İyileştirilmesi

1960'larda gerçekleşen eski Yugoslavya'daki büyük depremlerden ve 1976'daki Friuli depreminden sonra, tarihi yiğma yapılar hakkındaki araştırmalarda, taş dolgu ve çoklu sıralı duvarların dayanımının iyileştirilmesine öncelik verilmiştir. Bu doğrultuda, enjeksiyon yöntemlerine ve Avrupa'daki sismik alanlara odaklı çalışmalar yapılmaya başlanmıştır [86].

1979-1984 ICCROM - Sıvalar ve Zemin Mozaikleri

1979-1984 yılları arasında, ICCROM (Kültürel Varlıkları Koruma ve Restorasyon Çalışmaları için Uluslararası Merkez) tarafından, kireç harçlı duvar resmi sıvalarını ve zemin mozaiklerini onarmak için enjeksiyon malzemelerini test etmeyi ve geliştirmeyi içeren yaygın bir araştırma programı ele alınmış; bu programa EEC (Avrupa Ekonomi Topluluğu) ve UNESCO sponsor olmuştur [87].

Araştırmalar, enjeksiyon malzemesinin performansını değerlendirmek için; portland çimentosu, kireç, kireç-çimento ve hidrolik katkıları gibi bir çok malzemeyi formüle etme çalışmaları ile başlamıştır [88]. Enjeksiyon malzemesi testleri için o zaman önerilen mekanik ve fiziko-kimyasal özellikler ile ilgili deneyler bugün hala uygulanabilir durumdadır. Bu özellikler; işlenebilirlik, priz süresi, büzülme, basınç ve eğilme dayanımı, basınç altında elastisite modülü, adezyon, ısısal genleşme, çözülebilir tuz, hava koşullarına dayanım, porozite, gözenek büyüklüğü dağılımı ve su emmeyi içermektedir [87].

1986 Menander Evi, Pompei, İtalya

1986 yılında İtalya'daki Menander Evi'nin duvar resimleri (Şekil 4.1) ve bahçe kapısının onarımı ICCROM'un formülü ile üretilen enjeksiyon şerbeti ile yapılmıştır [89].

Şerbet, kısmen hidrolik kireç, akrilik sıvı çözelti karışımı ve baryum hidroksit ile modifiye edilmiş tuğla tozundan oluşmuştur. Bu enjeksiyon şerbeti, tüm yüzeyin %60'ından fazla alana, çatlaklar ve yüzeydeki boşluklar boyunca enjeksiyon yapılarak uygulanmıştır. Bu durum, kullanılan enjeksiyon yöntemi ve formülünün tarihi dokunun onarımı için başarılı olduğunun ispatı kabul edilmiştir [82].



Şekil 4. 1 Enjeksiyon sonrası Menander Evi, bahçesi ve duvar resmi, Pompeii, İtalya (Fotoğraf: Peter Unger) [90]

1986-1994 Smeaton Projesi - Kireç Esaslı Karışımlara Tuğla Tozunun Etkisi

1986 yılında English-Heritage (İngiltere Tarihi Yapılar ve Anıtlar Komisyonu) tarafından yürütülen Hadrian Duvarı'nın (Şekil 4.2) onarımı kapsamındaki, harçlar üzerindeki deneysel çalışmanın sonucu olarak, Smeaton Projesi geliştirilmiştir [91].

Smeaton Projesi'nin harç analizleri kapsamında değindiği konular; tarihi harçların bileşenleri, performans kriterleri, harç hazırlanması ve kullanımıdır [91]. Bu çalışma aslında şerbet enjeksiyonundan çok harçlar üzerine olmuştur ancak harç-kum-tuğla karışımının kullanımını içerdiği için enjeksiyon şerbeti çalışmalarına katkıda bulunan bir projedir.

Smeaton projesi, ICCROM, English-Heritage ve Bournemouth Üniversitesi, İngiltere 'nin ortak çalışmasıdır. Proje, Hadrian Duvarı'nda daha önce portland çimentosu ile yapılan onarımın zararlı sonuçlarının görülmesi ile duruma müdahale etmek için başlatılmıştır. Geçirimsiz doğası yüzünden portland çimentosunun yoğun ıslanma-kuruma etkisine neden olduğu, zaten zayıflamış olan kagir yapının merkezinde su tutulmasına yol açtığı, donma-çözünme riskini arttırdığı tespit edilmiştir [82].



Şekil 4. 2 Hadrian Duvarı'nın genel görünümü ve test numuneleri, Smeaton Projesi, 1994 [91]

Bu bulgulara göre, uygun koruma harçlarını geliştirmek için, bir test programı başlatılmıştır. Yıl boyunca tuğla tozu katkılı kireç esaslı karışımlar test edilmiş ve portland çimentosu ile karşılaştırılmıştır [82].

1990-2000 Yığma Yapı Strüktürlerinin Sağlamlaştırılması için Enjeksiyon Yönteminin (Grouting) Araştırılması

1990 yılında Politecnico di Milano ve Universita di Padova işbirliği ile geniş çaplı bir araştırma programı geliştirilmiştir. Bu çalışma, 1960'larda başlayan tarihi yığma yapı strüktürlerinin sağlamlaştırılması için kullanılacak enjeksiyon malzemeleri çalışmalarının devamı niteliğinde olmuştur [86]. Araştırmalar sonucunda sismik alanlarda yığma strüktürlerin onarımı ve güçlendirilmesi için uygulanan enjeksiyon yönteminde ana ilkeler belirlenmiş ve epoksi reçine şerbetlerin etkisinin ölçümü için yeni standartlar geliştirilmiştir [92].

Ana çalışma, epoksi reçine şerbetler hakkında olsa da; çalışmaların sonucunda kireç esaslı karışımlarda da enjeksiyonun etkinliğinin sadece orijinal malzeme ve enjeksiyon şerbeti arasındaki fiziko-kimyasal ve mekanik uyumlulukla ölçülemeyeceği, buna ek olarak penetrasyonun (enjeksiyon şerbetinin enjekte edilen malzeme içerisine yayılma kapasitesi) da göz önünde bulundurulması gerektiği tespit edilmiştir [93].

Bu çalışmaların sonucunda; ayrıca, başarılı bir enjeksiyon uygulaması için, enjeksiyonun sabit enjeksiyon basıncı ve uygun enjeksiyon tekniği ile yapılması gerektiği anlaşılmıştır [82].

1990'lardaki çalışmalarda, tarihi yapıdaki özgün malzeme ile uyumluluğun sağlanması adına; kimyasal, fiziksel ve mekanik koşulları sağlamak için uygun organik ve inorganik şerbet formülleri seçmeye odaklanılmıştır. Enjeksiyon şerbetinin performans değerlendirmesi; düşük basınç altında iyi penetrasyon göstermesine, özgün malzeme ile arasındaki adezyon ve kimyasal uyumluluğun iyi olmasına, minimum mekanik dayanım ve şekil değiştirebilmeye sahip olmasına ve sismik aktiviteye yanıt vermesine göre yapılmıştır. Seçilen enjeksiyon şerbetinin etkinliğini değerlendirmek için, bir kontrol dizisi oluşturulmuş, kontrol dizisi;

- Yığma yapının yerinde araştırılması ve testleri ile duvarın bütün bileşenlerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini kapsayan duvar morfolojisinin anlaşılması,
- Laboratuvar testleri ve yerinde testler ile enjeksiyon şerbetinin enjekte edilebilirliğinin belirlenmesi,
- Ultrases ve flat-jack teknikleri gibi testlerle uygulamanın etkisinin ölçülmesi olarak belirlenmiştir [92,93].

2000-2006 Enjeksiyon Öncesi Strüktürü Göz Önünde Bulundurmak

Katholieke Universiteit Leuven, Belçika ve National Technical University of Athens, Yunanistan işbirliği ile tarihi yığma yapıların onarımı sırasında kullanılan enjeksiyon malzemesi için reolojik ve mekanik özellikleri baz alan tasarım koşulları belirlenmiştir. Daha sonra, uygulanacak strüktür özelliklerine bağlı olarak malzeme içerisinde kullanılan bileşenlerin oranları saptanmıştır. Şerbet enjeksiyonu için ön koşullar enjekte edilen strüktürün fiziksel davranışları ile ilişkilendirilmiştir.

Bu koşullar; enjekte edilebilirlik, var olan yığma strüktür malzemeleri ile adezyon, tanımlanan kapsam içerisindeki uygun mekanik özellikler olarak belirlenmiştir [94].

Çalışma sırasında tuf ve silis dumanı ile birçok kireç-çimento formülü test edilmiş, çok az portland çimentosu içeren karışımların yüksek mekanik özellikler geliştirdiği görülmüştür. Bu çalışma sırasında sertleşmiş enjeksiyon malzemesi numunelerinin yüksek çekme dayanımı göstermelerine rağmen, kayma dayanımlarının vasat olduğu saptanmıştır. Kireçtaşının daha düz yüzeyi ve tuğlanın daha yüksek porozitesi sayesinde enjeksiyon şerbeti ve tuğla arasındaki adezyonun, enjeksiyon şerbeti ve kireçtaşı arasındakinden çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Enjeksiyon malzemesinin porozitesi orijinal hidrolik harçlardan daha yüksek bulunmuştur. 180 gün sonra bile; porozite ve gözenek büyüklüğü dağılımının malzemenin narinliğine değil, karışım içerisinde kullanılan su miktarına bağlı olduğu anlaşılmıştır. Narinlik ve karıştırma prosedürünün her ikisinin de enjeksiyon şerbetinin penetrasyonunu etkilediği belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca, enjeksiyon malzemesinin puzolanik reaksiyonu ve yoğunlaşma süreci gibi iç yapısına özgü gözlemler de yapılmıştır. Kireç karışımlarının yavaş priz almasına bağlı olarak, dikkatli alan uygulamasının önemi vurgulanmıştır ve bu tür karışık tipte bağlayıcılar kullanılan enjeksiyon şerbetlerinin işe yarayıp yaramadığını görmek için farklı kür koşullarında 90 ila 180 gün arasında beklemek gerektiği belirtilmiştir [94].

2005 yılında Valuzzi [95] farklı yığma taş duvarlara yükleme yapıp mekanik özelliklerini analiz etmiş ve her duvarın kendine özgü özelliklere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmalar sonucunda enjeksiyon şerbeti ile yapılan müdahalelerin strüktüre bağlı olması gerektiği, yapılan çalışmaların uzun süre incelenmesi gerektiği, enjeksiyon şerbetinin orijinal malzeme ile uyumlu olması gerektiği ve yerinde uygulama öncesi ön testler yapılması gerektiği belirtilmiştir.

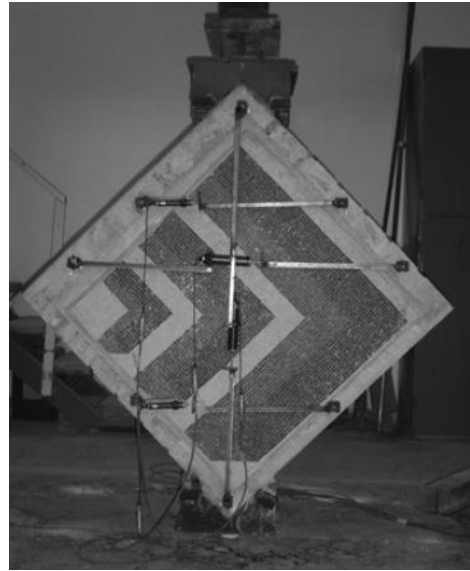
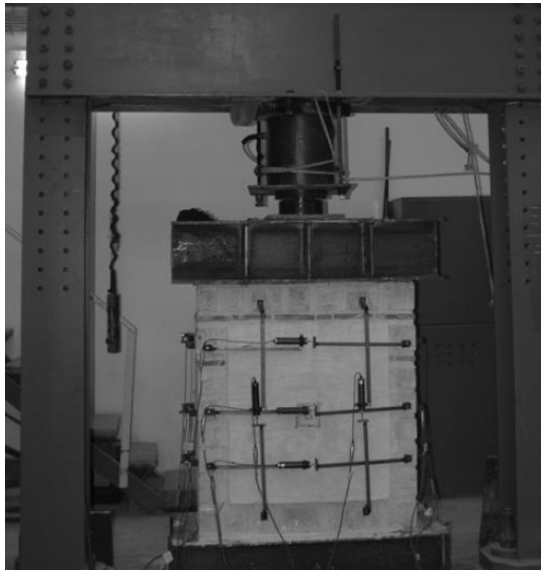
2007-2010 Dafni Manastırı, Karıştırma Prosedürü ve Ortam Sıcaklığının Belirlenmesi

2007-2010 yılları arasında Miltiadou-Fezans, Vintzileou ve Kalagri [5,96,97], düşük basınçta yüksek enjekte edilebilirlik sağlamak prensibiyle farklı formüllerde enjeksiyon şerbetleri üretmiş ve bu malzemeleri Dafni Manastırı, Yunanistan'ın (Şekil 4.3) onarımında kullanmış; uygulamanın ve üretilen malzemenin uygunluğunu değerlendirmişlerdir.



Şekil 4. 3 Dafni Manastırı'nın genel görünümü ve mozaik örneği, 2007 [5,96]

Enjeksiyon öncesi enjeksiyon malzemelerine ön testler uygulanmıştır. Enjeksiyon şerbetlerinin enjekte edilebilirliğini değerlendiren bu testler malzemenin akışkanlık, penetrasyon ve hacim sabitliği özelliklerini kapsamaktadır. Bu çalışma kapsamında ayrıca sertleşmiş enjeksiyon malzemesinin eğilme ve basınç deneyleri yapılmıştır. Silindirik enjeksiyon deneyleri ve model duvarlar üzerinde de testler yapılmış (Şekil 4.4); enjeksiyon malzemesinin performansı değerlendirilmiştir [96].



Şekil 4. 4 Model duvarlar üzerinde basınç ve diyagonal basınç deneyleri [5,96]

2008 yılında Bras ve Henriques [98] taze haldeki enjeksiyon şerbetlerinin karıştırma prosedürlerinin malzemenin özelliklerine (akışkanlık, penetrasyon ve hacim sabitliği) etkilerini araştırmış ve bir optimizasyona gitmeye çalışmışlardır. Bu çalışmada farklı

karışım prosedürleri denenmiş ve karışım prosedürlerinin taze haldeki enjeksiyon şerbetinin malzeme özelliklerini doğrudan etkilediği saptanmıştır. Ayrıca, uzun süre ve daha hızlı çırpılan karışımların daha akışkan olduğuna değinilmiştir.

2010 yılında Bras ve diğ. [99] ortam sıcaklığının enjeksiyon yönteminin uygulanması üzerine etkilerini araştırmış ve etkili bir enjeksiyon yapılabilmesi için ortam sıcaklığının 5°C ile 35 °C aralığında olması gerektiğini belirtmişlerdir. 20 °C optimum sıcaklık olarak kabul edilmiştir.

2011- Hazır (ticari) Enjeksiyon Malzemesi ile Onarılmış Model Duvarlar ve Ön Koşulların İncelenmesi

2011 yılında Uranjek ve diğ. [6], farklı ticari enjeksiyon malzemesi ile, yığma taş model duvarlar üzerinde, tahribatlı ve tahribatsız deneyler yaparak uygulamanın kalitesini incelemişlerdir. Ancak incelemeleri sonucu, yığma taş duvarlara enjekte edilen hiç bir hazır enjeksiyon malzemesinden beklenen performansın alınamadığı belirtilmekte ve bu malzemelerin geliştirilmesi önerilmektedir. Yakın dönemlerde Oliveira ve diğ. [100] de ticari enjeksiyon malzemeleri ile yığma taş duvarlar üzerine performans deneyleri yapmış olsalar da, tuğla duvarlar üzerine çalışmalar halen bulunmamaktadır.

Ticari enjeksiyon malzemelerinin reçetelerinde ve teknik kılavuzlarında, kalite kontrol yapmak için hangi standartların kullanılacağı ve ürünün ön koşullarının hangi standartlara bağlı olarak sağlandığı belirtilmemiştir [101]. İlk olarak, 2016 yılında Luso ve Lourenço [101], yaptıkları analizler ile ticari enjeksiyon malzemelerinin özelliklerini karşılaştırmışlardır. Ancak her malzeme birbirinden çok farklı özellikler göstermiştir. Bu çalışmada enjeksiyon şerbetlerinin akışkanlık, hacim sabitliği ve silindir enjeksiyon deneyi ile enjekte edilebilirliği ölçülmüş, ayrıca taş ve enjeksiyon şerbeti içeren silindirler üzerinde basınç ve çekme testleri uygulanmıştır. Ancak bu çalışmada da ticari enjeksiyon malzemesinin penetrasyon özelliğine silindir enjeksiyon deneyi içerisinde bakılmış, kum kolonu gibi daha küçük çatlaklarda penetrasyonun sınındığı bir deney yapılmamış, model duvarlar üzerinde uygulamanın performansı değerlendirilmemiş, mineralojik incelemesi yapılmamış ve enjekte edildiği malzeme ile ilişkisi yeteri kadar incelenmemiştir.

2012 yılında araştırmacıların kendi ürettikleri enjeksiyon şerbetleri ile model duvarlar üzerlerinde yaptıkları testler devam etmiş, basınç dayanımı düşük olan hidrolik kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin, yığma taş test duvarlarının mukavemetini arttırdığı görülmüştür [102].

2012 yılında Uranjek ve diğ. [103] GPR, ultrases ve termografik testler gibi tahribatsız testlerin yanı sıra yerinde basınç ve kayma dayanımı gibi az tahribatlı testlerle şerbet enjeksiyonunun kalitesini analiz etmişlerdir.

2012-2013 yıllarında Miltiadou ve Theodossios [104,105,106] kendi ürettikleri kireç esaslı enjeksiyon şerbetlerinin akışkanlık, penetrasyon ve hacim sabitliği özellikleri üzerine detaylı analizler yapmışlardır. Bu özelliklerin, enjeksiyon öncesi mutlaka değerlendirilmesi gereken, sadece laboratuvarda değil yerinde uygulama sırasında da kontrol edilmesi gereken özellikler oldukları belirtilmiştir. Yapılacak ön testlerin başarılı bir enjeksiyon uygulaması için ön koşul oldukları tekrarlanmış, testlerin önemine değinilmiştir.

2014 yılında Baltazar ve diğ. [107], de ön koşullar ve enjekte edilebilirlik üzerine çalışmalara devam etmiş, benzer sonuçlar elde etmiştir. Ancak halen kireç esaslı enjeksiyon malzemeleri için üretilmiş standard testler bulunmamaktadır. Genellikle çimento katkılı enjeksiyon malzemeleri, harç ya da beton için üretilmiş test standartları ve literatür taramaları kaynak olarak kullanılmaktadır.

Miltiadou ve diğ. [104] çalışmaları sırasında ayrıca süper akışkanlaştırıcıların enjeksiyon şerbetleri üzerindeki etkilerine de değinmiştir. Yapılan deneylerle görülmüştür ki bazen süper akışkanlaştırıcılar, çırpma süresi arttırılsa dahi enjeksiyon şerbetinin akışkanlığının artmamasına neden olmaktadır. Süper akışkanlaştırıcılar malzemenin terleme etkisini değiştirdiği gibi; fazla eklenmesi durumunda malzeme içerisinde hava kabarcıklarına da neden olmaktadır. Bu da enjeksiyon şerbetinin penetrasyonunu ve enjekte edilebilirliğini etkilemektedir [104]. Ancak daha önceki çalışmalarda görülmüştür ki; süper akışkanlaştırıcı kullanılmadan uygun akışkanlık değeri sağlanmaya çalışıldığında, su oranı çok yükselmektedir ve yüksek su oranı malzeme mukavemetini etkilemektedir [108]. Bu nedenle tarihi yığma yapıların onarımında

kullanılan enjeksiyon şerbetleri içerisinde süper akışkanlaştırıcılar kullanılmalı, ancak süper akışkanlaştırıcının enjeksiyon şerbeti için uygun olmasına özen gösterilmelidir.

Optimum özelliklere sahip enjeksiyon şerbeti üretmek için araştırmalar devam etmekte, farklı katkıları içeren, uygulanacağı strüktür ve malzeme ile daha uyumlu enjeksiyon malzemeleri üretilmesi hedeflenmektedir [99,100,109,110,111,112,113].

Türkiye’de Enjeksiyon Malzemesinin Kullanımı

TC. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü kayıtlarına göre, 2000’li yıllara kadar tarihi yapıların restorasyonu sırasında, portlant çimentosu katkılı harçların enjeksiyon uygulamalarında kullanıldığı bilinmektedir. 2000’li yılların başında epoksi reçine katkılı enjeksiyon malzemeleri restorasyonlarda kullanılmakla beraber [114] 2006 yılından sonra enjekte edildiği özgün malzeme ile daha uyumlu olduğu düşünülen kireç esaslı enjeksiyon malzemeleri enjeksiyon uygulamaları sırasında kullanılmaya başlanmıştır.

Türkiye’de kireç esaslı enjeksiyon şerbetlerinin ilk kullanımı TC. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü kayıtlarına göre 2006 yılında Amasya 2. Beyazıt Camisi Şadırvanı Duvar resimlerinin restorasyonu sırasında gerçekleşmiştir. Kubbe içinde bağdadi çıtalar ile sıva arasında oluşan boşluklara hidrolik kireç, hava kireci ve tuğla tozu da içeren bir şerbet ile enjeksiyon yapılmıştır [115]

Türkiye’de, kireç esaslı enjeksiyon malzemeleri ile yapılan yapısal enjeksiyon uygulamalarının kayıtlarına ise ilk kez 2007 yılında rastlanmaktadır. TC. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü kayıtlarına göre, Sivas Çifte Minareli Medrese (2007-2008) [116], Edirnekapı Mihrimah Sultan Külliyesi (2007-2010) [117], Süleymaniye Camii (2007-2010) [118], Fatih Pertevniyal Valide Sultan Camii (2007-2011) [119], Fatih Camii (2007-2012) [120], Nuruosmaniye Camii (2010-2012) [121], Haseki Hürrem Sultan Külliyesi (2010-2012) [122], Üsküdar Atik Valide Külliyesi (2011-2013) [123] ve Cunda Taksıyarthis Kilisesi (Ayvalık Rahmi Koç Müzesi) (2012-2014) [124] restorasyonları sırasında kireç esaslı hazır enjeksiyon şerbetleri ile enjeksiyon uygulaması yapılmış olan yapılara örnektir.

4.3.2 Enjeksiyon Uygulaması Öncesi, Sırası ve Sonrasında Dikkat Edilmesi Gerekenler

Tarihi yapıların onarımı sırasında yapılan şerbet enjeksiyonu (grouting) son derece önemli bir uygulamadır. Daha önce de belirtildiği gibi onarım sırasında farklı disiplinlerin bir arada olduğu çok titiz bir çalışma gerektirir. Enjeksiyon sırasında bir çok problemle karşılaşılabilceği gibi problemler yıllar sonra da ortaya çıkabilir. Örneğin, enjeksiyon sırasında yanlış malzeme kullanımı sonucu İtalya'da bir çok tarihi yapıda yıllar sonra tuz kristalleşmesi ve parça atma görülmüştür [125].



Şekil 4. 5 Duvar morfolojisi araştırılmadan yapılan yanlış şerbet enjeksiyonunun sonucu [126]

Enjeksiyon sırasında kullanılacak malzeme, orijinal malzeme ile fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri açısından uyumlu olması göz önünde bulundurularak seçilmeli ya da üretilmelidir. Eğer malzemeler arası uyumluluk söz konusu değilse, enjeksiyon bir süre sonra yapı için büyük bir problem haline dönüşür; zaman içerisinde enjeksiyon malzemesinde ve yığma strüktürde bozulma ve hasarlar görülebilir [127,128].

Enjeksiyon şerbeti ile uygulamaya başlamadan önce, enjeksiyon yapılacak yığma strüktürün morfolojisini bilmek ve duvarların nem oranı ve boşluk hacmi hakkında bilgi sahibi olmak da gerekmektedir [129,130].

Başarılı bir enjeksiyon yapabilmek için belirlenmiş ön koşullar ve istenilen durumlar vardır (Çizelge 4.2).

Çizelge 4. 2 Şerbet enjeksiyonu öncesi, sırası ve sonrasında istenilen durumlar [130]

	KONU	İSTENİLEN DURUM
UYGULAMA ÖNCESİ	Akışkanlık	Olabildiğince yüksek
	Hacim Sabitliği (terleme ve segregasyon olmaması)	Olabildiğince yüksek
	Penetrasyon ve enjekte edilebilirlik	Olabildiğince iyi
	Vizkosite	İdeal akışkanlık ve penetrasyon davranışını sağlayabilecek nitelikte
	Enjekte edilen malzemeyle arasındaki adezyon	Olabildiğince yüksek
	Su tutma özellikleri	Fazla su emmeden kaçınacak kadar iyi
	Kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler	Orijinal malzeme ile uyumlu
	Yığma Model Strüktürler	Orijinal malzeme özelliklerini taşıyan Enjeksiyon öncesi ve sonrası performans değerlendirmesi yapılabilecek
UYGULAMA SIRASINDA	Yığma strüktürün yüzeyinin hazırlanması	Sızıntıdan kaçınmak için
	Enjeksiyon deliklerinin delinmesi	Enjekte edilen strüktürün özelliklerine bağlı olarak, olabildiğince sık ve delme açısına dikkat edilerek
	Yığma strüktürün önceden ıslatılması	Enjekte edilen malzemenin su emme kapasitesine bağlı olarak
	Enjeksiyon şerbetine uygulanacak basınç	Çok yüksek enjeksiyon basınç değerlerinden kaçınılmalı
	İş Prosedürü	Alt kısımdan üst kısma doğru Enjeksiyona ara vermeden
UYGULAMA SONRASI	Uygulama kalitesinin ölçülmesi	Tahribatsız ve/veya az tahribatlı deneylerle mutlaka ölçülmeli

- Şerbet enjeksiyonu öncesi, malzemenin akışkanlık, hacim sabitliği, adezyon, vizkosite, orijinal malzemeyle kimyasal, fiziksel ve mekanik uyumluluk, penetrasyon ve enjekte edilebilirlik, su tutma özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır.
- Enjeksiyon uygulama hatalarının başında, enjeksiyon şerbeti içerisinde yüksek oranda su kullanımı gelir. Fazla su, akışkanlığı arttırsa da, sertleşmiş enjeksiyon şerbetinin enjekte edildiği malzeme ile arasındaki adezyonu azaltır [130].
- Enjeksiyon yöntemi geri dönüşü olmayan bir yöntem olduğu için enjeksiyon öncesi orijinal malzeme özelliklerini taşıyan model strüktürler üretilmeli ve enjeksiyon öncelikle bu modellere yapılarak, malzemenin performansı değerlendirilmelidir.

- Enjeksiyon sırasında çalışmaya ara vermek de yapılan hatalar arasındadır. Enjeksiyon şerbetinin çırpılması durdurulduğunda karışımda çökme oluşur ve akışkanlık azalır.
- Ayrıca enjeksiyon sırasında, yığma strüktürün yüzeyinin hazırlanması, enjeksiyon deliklerinin delinmesi ve enjekte edilen malzemenin su emme kapasitesine bağlı olarak yığma strüktürün önceden ıslatılması, gibi konularda hassasiyet gösterilmelidir.
- Enjeksiyon sırasında yapılan bir diğer hata da enjeksiyon şerbetine uygun olmayan enjeksiyon basıncı uygulamaktır. Yüksek enjeksiyon basıncıyla daha iyi penetrasyon sağlanır. Ancak yüksek basınçla yığma strüktüre zarar da verilebilir.
- Uygun olmayan iş prosedürü sırası da enjeksiyon sırasında yapılan hatalar arasındadır. Enjeksiyon daima alt kısımdan üst kısma doğru yapılmalıdır. Ters yapılır ise açılan delikler kapanabilir ve alt kısımlara enjeksiyon şerbeti yayılmayabilir.
- Enjeksiyon sonrasında ise mutlaka ultra-ses gibi tahribatsız ve mümkünse flat-jack gibi az tahribatlı deneylerle uygulamanın etkinliği kontrol edilmelidir.
- Deprem sonrası yapılan analizler göstermiştir ki yığma yapı duvarının sadece bir bölümüne enjeksiyon şerbeti ile uygulama yapmak iyi sonuçlar vermemiştir. Enjeksiyon, hasarlı duvarın tamamına yapılmalıdır [130].



Şekil 4. 6 Yerinde (in-situ) şerbet enjeksiyonu [131]

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Enjeksiyon malzemeleri için; üretici firmanın verdiği bilgiler çoğu kez yeterli olmadığı, bilgiler yeterli olsa dahi özgün malzemeye uygunluğu objektif bir bilimsel araştırma ile kanıtlanmadığı, kanıtlansa dahi 1995 ICOMOS Soumenlinna Kararları [75] ve 2013 ICOMOS Türkiye Mimari Mirası Koruma Bildirgesi [81] nde de değinildiği üzere, her kültür varlığının kendine özgü sorun ve malzeme özellikleri göz önüne alındığında, özgün malzeme ve tekniklerle birlikte kullanılması zorunlu olan yeni malzeme ve tekniklerin ilgili proje özelinde tanımlanacak testleri yapılmadan ve bilimsel verilerle uygunluğu ortaya konulmadan kullanılmaması gerektiği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle uygulama öncesi onarım için kullanılacak yeni malzemenin fiziksel, kimyasal, mekanik ve iç yapı özellikleri test ve analiz edilmelidir. Aksi takdirde var olan problemlere çözüm bulmanın aksine yeni hasarlara da neden olunabilmektedir.

Tarihi yığma yapılara enjeksiyon uygulaması yapmadan önce enjeksiyon şerbetinin, özgün malzeme ile uyumunun ölçülmesinin yanı sıra akışkanlık, penetrasyon ve hacim sabitliği gibi sağlaması gereken ön koşullar da vardır. Hatta, şerbet enjeksiyonu geri dönüşü olmayan bir yöntem olduğu için, uygulama öncesi yığma model duvarlar üretilip, malzemenin performansı değerlendirilmelidir.

Bu çalışmanın deneysel bölümünde; ticari olarak üretilmiş kireç esaslı enjeksiyon şerbetinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini belirlemek ve bu malzeme ile onarılmış yığma tuğla duvarların enjeksiyon öncesi ve sonrası mekanik performansını değerlendirmek amaçlanmaktadır. Literatürde deneysel çalışma olarak pek yer almaması nedeniyle, enjeksiyon malzemesinin performansını değerlendirmek için özellikle tuğla yığma duvarlar çalışma kapsamına alınmıştır.

İlk olarak literatür çalışmalarından da yararlanılarak kaliteli bir enjeksiyon uygulaması için izlenmesi gereken adımlar belirlenmiştir.

Daha sonra toz haldeki 2 farklı ticari enjeksiyon malzemesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiş ve özgün malzemede kullanılan hidrolik kireç ve hava kireci ile karşılaştırılmıştır.

Toz haldeki malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikler belirlendikten sonra iki farklı enjeksiyon malzemesi için akışkanlık, penetrasyon ve hacim sabitliği gibi ön koşullara bağlı olarak karıştırma prosedürleri belirlenmiş ve taze haldeki deneyleri yapılmıştır.

Ön koşulları sağlayan enjeksiyon şerbetleri TS EN 459-2'ye [132] uygun kür koşullarında bekletildikten sonra, 28. günde mekanik deneyleri yapılmış ve mekanik özellikleri özgün malzeme özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca kılcal su emme deneyi ile enjeksiyon malzemesinin kapilaritesi ölçülmüş ve özgün malzeme özellikleri ile karşılaştırılmıştır.

Daha sonra enjeksiyon şerbetinin tuğla/şerbet ve tuğla/harç/şerbet silindir enjeksiyon deneyleri ile enjekte edilebilirliği ölçülmüş ve enjekte edilebilirlik verileri karşılaştırılmıştır.

28 gün bekletilmiş silindir enjeksiyon deneyi numunelerinin üzerinde tek eksenli basınç deneyleri uygulanmış, silindirlerin basınç dayanımı ve elastisite modülü belirlenmiş, gerilme-şekil değiştirme grafikleri çıkarılmıştır.

Enjekte edilebilirlik de sağlandıktan sonra, özgün malzeme özelliklerini taşıyan model duvarın üretimine geçilmiştir. Hidrolik kireç esaslı harç ve hava kireci esaslı harç olmak üzere iki farklı harç kullanılarak her birinden ikişer adet, toplamda dört adet tuğla (harman tuğlası) duvar üretilmiştir.

Duvar üretiminin 28. gününde duvarlara düşey yük altında yanal yük verilerek, diyagonal çatlaklar oluşturulmuş, yük-yer değiştirme grafikleri çıkarılmıştır. Oluşturulan çatlakların haritaları çizilmiştir.

Daha sonra oluşan çatlaklar kireç esaslı ticari enjeksiyon şerbeti ile literatüre uygun olarak onarılmıştır [5,130].

Duvarlar laboratuvar koşullarında 28 gün daha bekletilmiş ve tekrar aynı yükleme yapılarak çatlaklar oluşturulmuş, yük-yer değiştirme grafikleri çıkarılmış, çatlak haritaları çizilmiş, şerbet enjeksiyonu öncesindeki ve sonrasındaki sonuçlar karşılaştırılarak, enjeksiyon malzemesinin performansı değerlendirilmiştir.

Son olarak, şerbet enjeksiyonu öncesi ve sonrası duvarlara yapılan ultra-ses deneyi ile yapılan uygulamanın kalitesi değerlendirilmiştir.

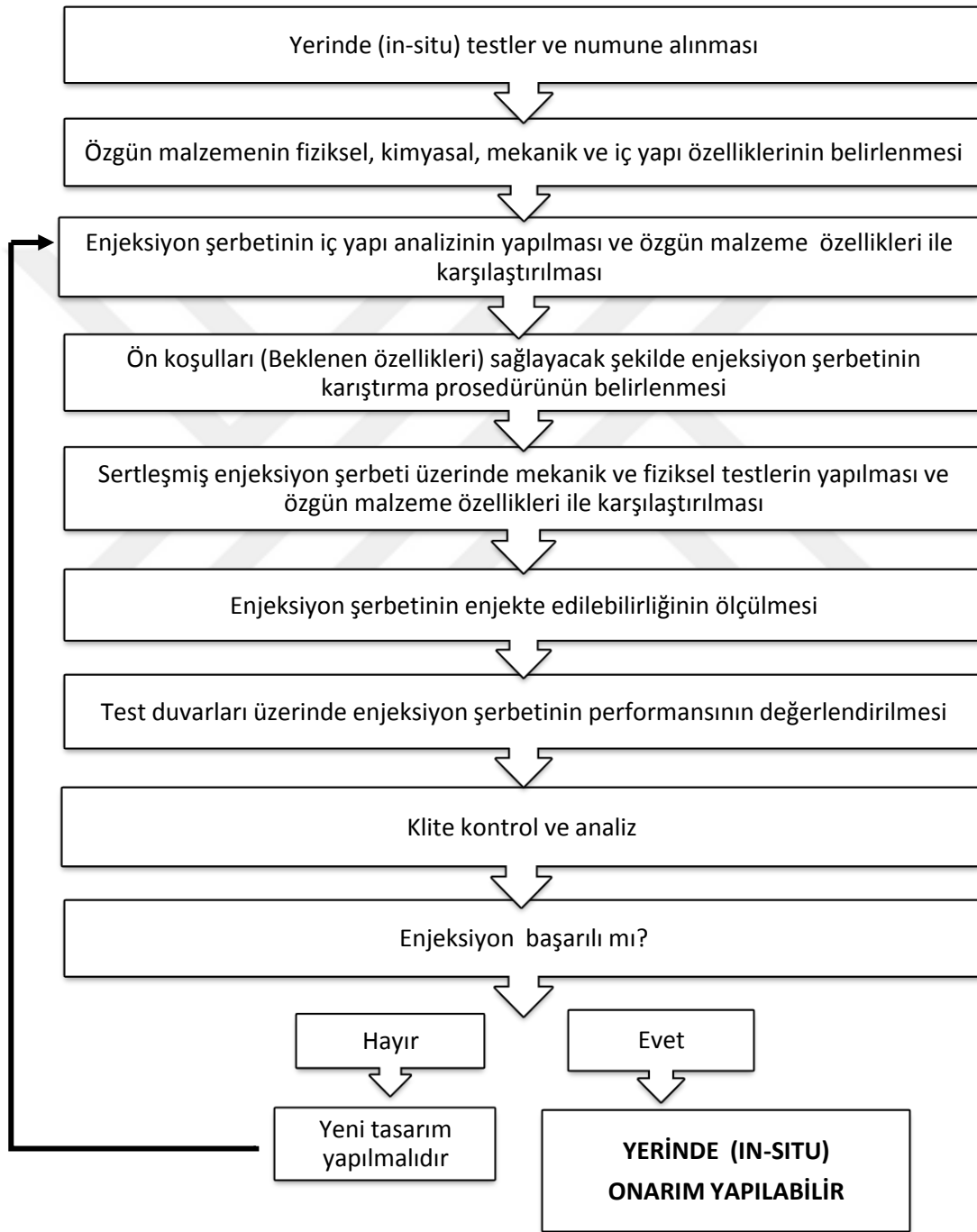
5.1 Yerinde (In-situ) Şerbet Enjeksiyonu Öncesi İzlenmesi Gereken Adımlar

Malzemenin uygulaması yapılmadan önce takip edilmesi gereken adımlar, Binda ve diğ.'nin 1997 yılındaki "enjeksiyon şerbeti uygulama prosedürünün akış şeması" [93] çalışmasının geliştirilmesi ile oluşturulmuştur.

Onarım öncesi ilk olarak onarılacak tarihi yapının yerinde (in-situ) tahribatsız ve az tahribatlı testleri yapılarak laboratuvar deneyleri için yapıdan numune alınmalıdır. Daha sonra yapıdan alınan özgün malzeme numunesinin fiziksel, kimyasal, mekanik ve iç yapı özellikleri belirlenmelidir. Özgün malzeme özelliklerine bağlı olarak seçilen ya da üretilen enjeksiyon şerbetinin iç yapı analizi yapılmalıdır. Alınan sonuçlar özgün malzeme özellikleri ile karşılaştırıldıktan sonra; akışkanlık, penetrasyon ve hacim sabitliği gibi ön koşulları sağlayacak şekilde enjeksiyon şerbetinin karıştırma prosedürü belirlenmelidir. Ön koşulları sağlayan enjeksiyon şerbeti kürde bekletilip sertleştikten sonra; sertleşmiş malzeme üzerinde mekanik testler yapılarak orijinal malzeme özellikleri ile karşılaştırılmalıdır. Eğer enjeksiyon malzemesi uygun özellikler gösterir ise, malzemenin enjekte edilebilirliği test edilmelidir. Enjekte edilebilirlik de sağlanıyor ise, enjeksiyon uygulamasının performansı özgün malzeme özellikleri ile üretilen test duvarları üzerinde değerlendirilmelidir. Son olarak uygulamanın kalitesi kontrol edilip, bütün veriler ışığında analiz yapıldıktan sonra; enjeksiyon başarılı ise yerinde onarım yapılabilmektedir (Şekil 5.1).

Bu çalışma sırasında, yerinde (in-situ) yapılan tahribatsız ve az tahribatlı testler ile özgün malzemenin fiziksel, kimyasal, mekanik ve iç yapı özelliklerinin belirlenmesi çalışmaları 111M568 nolu TUBİTAK Araştırma Projesi [60] kapsamında daha önceden yapıldığı için, yerinde (in-situ) enjeksiyon öncesi izlenecek adımlara ticari olarak satılan

kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin iç yapı analizinin yapılmasından başlanmış; 111M568 nolu TÜBİTAK Araştırma Projesi [60] kapsamında önceden alınan veriler ticari olarak satılan kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin özelliklerinin özgün malzeme özellikleri ile karşılaştırılması sırasında kullanılmış; model duvarlar da bu proje kapsamında incelenen yapılar göz önünde bulundurularak üretilmiştir.



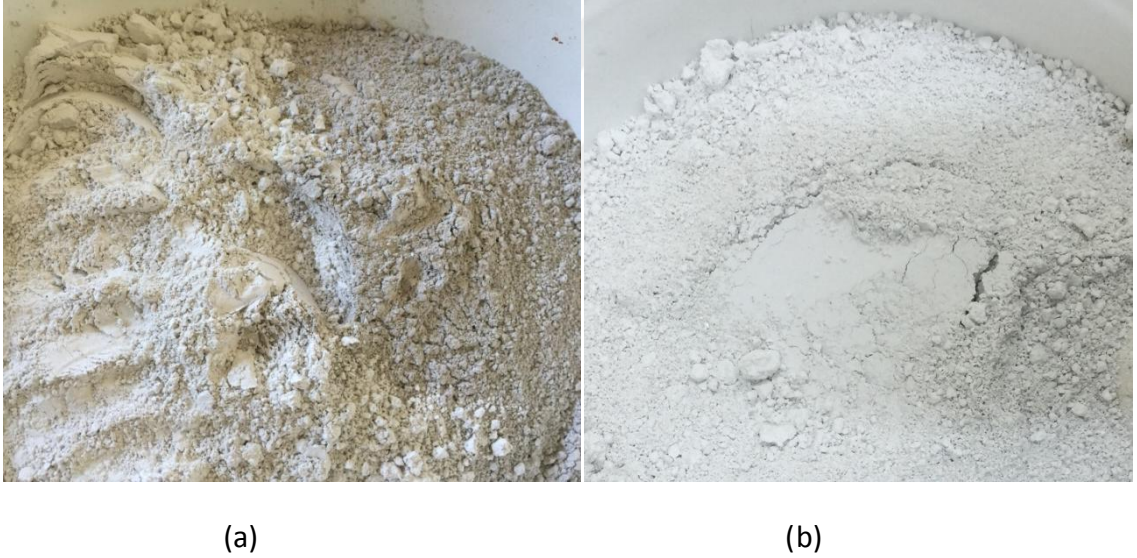
Şekil 5. 1 Yerinde (in-situ) şerbet enjeksiyonu öncesi izlenmesi gereken adımlar

5.2 Toz Halindeki Enjeksiyon Malzemelerinin Fiziksel Gözlemi, Fiziksel ve Kimyasal Analizi

Bu çalışma kapsamında, Türkiye'de yaygın olarak kullanılan iki adet kireç esaslı enjeksiyon malzemesi çalışma kapsamına alınmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan hazır enjeksiyon malzemeleri G1 ve G2 olarak adlandırılmıştır.

5.2.1 Toz Halindeki Enjeksiyon Malzemelerinin Fiziksel Gözlemi

Enjeksiyon malzemelerinin koku ve renk olarak birbirlerinden farklı oldukları gözlemlenmiştir. G1 açık kahve-bej renge sahipken G2'nin rengi daha açık, beyaza yakındır (Şekil 5.2). Ayrıca, toz veya sıvı haldeki G1 su ile silindiğinde leke bırakmamasına karşın G2'nin su ile silindiğinde önce lekenin ortadan kalktığı daha sonra yine kireç gibi tekrar ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5. 2 Toz halindeki G1 ve G2 malzemelerinin renk farkları (a) G1 (b) G2 (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

5.2.2 Toz Halindeki Enjeksiyon Malzemelerinin Fiziksel ve Kimyasal Analizi

Bu çalışma sırasında, ilk olarak Türkiye'de yaygın olarak kullanılan iki adet kireç esaslı hazır enjeksiyon malzemelerinin fiziksel ve kimyasal analizi "İTÜ, Prof. Dr. Adnan Tekin Malzeme Bilimleri ve Üretim Teknolojileri UYG-AR Merkezi'nde" yaptırılmıştır.

Yine bu çalışma kapsamında üretilen test duvarlarındaki harçlarda NHL 3.5 tip doğal hidrolik kireç ve CL 80-S tip hava kireci bağlayıcı olarak kullanıldığı için;. üretici firmalar

tarafından "tarihi kâgir yapılar için geliştirilmiş, puzolanik kireç esaslı enjeksiyon harcı" olarak tanımlanan enjeksiyon malzemelerinin (G1 ve G2) XRF analizine göre kimyasal bileşimi belirlenmiş, sonuçları NHL 3.5 tip doğal hidrolik kireç ve CL 80-S tip hava kirecinin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri ile Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de karşılaştırılmıştır.

Malzemelerin tane boyut dağılımı yapılan master sizer analizi ile belirlenmiştir. G1 ve G2 malzemelerinin granülometri eğrisi ve elekten geçen tane yüzdeleri Şekil 5.3'te gösterilmektedir.

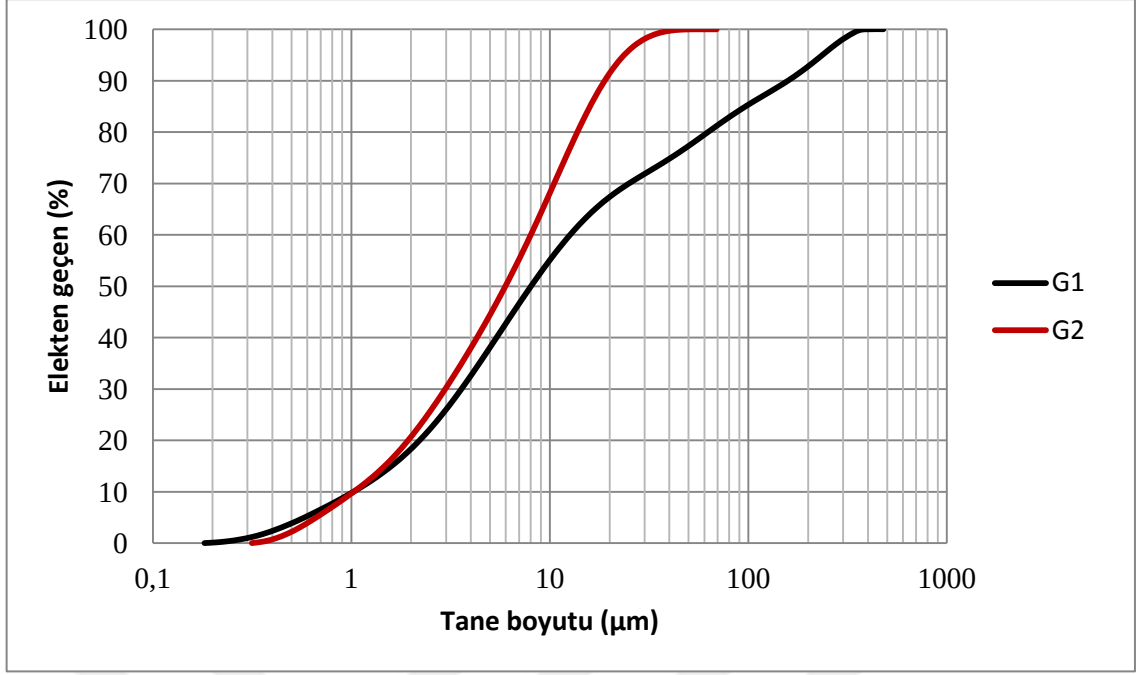
Çizelge 5. 1 Malzemelerin kimyasal bileşimi

Malzemeler	Formül, (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	MnO	Cr ₂ O ₃	LOI
Hidrolik Kireç (NHL 3.5)	11.43	0.4	2.64	0.56	66.90	0.05	0.04	1.30	16.85
Hava Kireci (CL 80-S)	0.82	0.34	1.18	1.32	68.98	0.13	0.04	0.51	26.03
G1	16.70	9.07	2.94	1.88	39.69	1.88	0.03	0.01	24.25
G2	10.03	6.52	0.22	1.79	48.48	0.19	0.09	-	31.87

Çizelge 5. 2 Malzemelerin fiziksel özellikleri

Malzemeler	Özgül Ağırlık, (g/cm ³)	Hacimsel yüzdenin (%) tane boyut dağılımı, (µm)	
		d ₅₀	d ₉₀
Hidrolik Kireç (NHL 3.5)	2.5	5.31	24.19
Hava Kireci (CL 80-S)	2.3	2.54	5.47
G1	2.6	9.22	181.69
G2	2.6	6.86	21.69

Malzemelerin master sizer analiz sonuçlarına göre G2 malzemesinin tane boyut dağılımının ve özgül ağırlığının hava kirecine (CL 80-S) kıyasla, hidrolik kireçle (NHL 3.5) daha benzer özellikler gösterdiği Çizelge 5.2'de görülmektedir. Yine G2 malzemesinin tane boyu dağılımının G1 malzemesine göre hidrolik kirece daha çok benzediği görülmektedir.



Şekil 5. 3 G1 ve G2 malzemelerinin gronölometri eğrisi

G1 ve G2 malzemelerinin granölometri eğrisinde de görüldüğü üzere G1 malzemesinin G2 malzemesine göre daha büyük tane boyutlarına sahip olduğu anlaşılmaktadır.

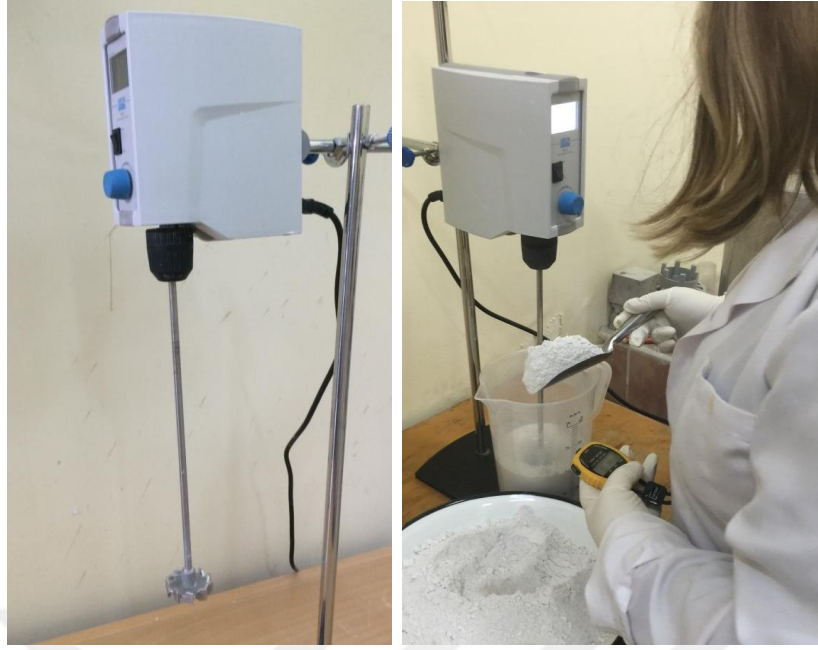
5.3 Enjeksiyon Şerbetinin Hazırlanması ve Beklenen Özelliklerin Sağlanması için Yapılan Taze Haldeki Şerbet Deneyleri

Enjeksiyon şerbetinin hazırlanması için standard bir yöntem bulunmamaktadır ancak enjeksiyon şerbetlerinin ön koşulları sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmelidir. Bu nedenle malzemelerin akışkanlık, hacim sabitliği ve penetrasyon özellikleri incelenmeli, beklenen özellikleri sağlamıyor ise karıştırma yöntemi değiştirilmelidir [95,98,133]

5.3.1 Enjeksiyon Şerbetinin Hazırlanması

Bu çalışma kapsamında ticari olarak satılan iki adet kireç esaslı enjeksiyon şerbetinin (G1 ve G2) üretimi yapılmıştır.

Enjeksiyon şerbetinin hazırlanması için standard bir yöntem bulunmamakla beraber; genel yaklaşım, hazır enjeksiyon malzemeleri içinde kimyasal katkıları ve süper akışkanlaştırıcıları bulunduğundan, bağlayıcının sadece su ile karıştırılmasıdır.



Şekil 5. 4 Mekanik karıştırıcı ile enjeksiyon şerbeti üretilmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

G1 Enjeksiyon Şerbeti

G1 şerbeti için ilk üretim, üretici firmanın bilgi reçetesinde önerdiği şekilde yapılmıştır. Buna göre;

Ortam sıcaklığı = +5°C - +35°C

Su/bağlayıcı oranı = 0.3

Karıştırma aleti = Mekanik karıştırıcı

Karıştırma hızı = 400-600 rpm

Karıştırma süresi = 3-4 dakika karıştırılıp, yaklaşık 4 dakika dinlendirilip tekrar 30 saniye karıştırılır.

Karıştırma prosedürü = Uygun su miktarı karıştırma kabına boşaltılır, G1 malzemesi yavaş yavaş ilave edilerek 400-600 devirli bir karıştırıcı ile 3-4 dakika karıştırılır, yaklaşık 4 dakika dinlendirilip tekrar 30 saniye karıştırılır.

Ancak, üretici firmanın bilgi reçetesinde önerilen su/bağlayıcı oranı ve karıştırma şekliyle hazırlanan numunelerle 20±2°C ortam sıcaklığı ve %40±5 bağıl nemde gerçekleştirilen deneylerde, akışkanlık ve hacim sabitliği özelliği ile ilgili beklenen

değerler sağlanamamıştır. Penetrasyon özelliği ile ilgili deneyde ise malzemenin yüksek kıvamı nedeniyle ölçüm yapılamamıştır. Bu nedenle su/bağlayıcı oranı, karıştırma hızı ve karıştırma süresi değiştirilerek hatta bazı karışımlara %1, %1.2 veya %1.5 oranlarında polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı eklenerek üretimler tekrarlanmıştır.



Şekil 5. 5 Suyun sıcaklığının ölçülmesi ve enjeksiyon şerbetine süper akışkanlaştırıcı eklenmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Daha önce literatür çalışmalarında da belirtildiği ve deneylerle görüldüğü üzere su/bağlayıcı oranının yanı sıra karıştırma hızı ve karıştırma süresi ve süper akışkanlaştırıcılar şerbetin reolojik özelliklerini etkilemektedir [98,104] G1 malzemesi için tekrarlanan farklı üretimler, su/bağlayıcı oranları, karıştırma hızları, karıştırma süreleri ve hangi özellikleri sağlayıp sağlayamadıkları Çizelge 5.3'te gösterilmiştir. Her numune en az 3 kez test edilmiş, tüm üretimler ve deneyler $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ortam sıcaklığı ve 40 ± 5 bağıl nemde gerçekleştirilmiştir.

G1 malzemesi ile yapılan tüm üretimlerde Şekil 5.6'da görüldüğü gibi malzemenin ayrıştığı gözlemlenmiştir. Ayrışma, su/bağlayıcı oranı arttırıldığında önemli ölçüde azalsa da, tam anlamıyla homojen bir karışım hiç bir karıştırma prosedüründe elde edilememiştir.

Çizelge 5. 3 G1 şerbeti için tekrarlanan üretimler

Şerbet kodları	Su/Bağ . oranı	Kimyasal Katkı (%)	Karıştırma Hızı (rpm)	Karıştırma Süresi	Beklenen Malzeme Özellikleri
G1-01*	0.30	-	500-600	4 dk karıştırıldı, 4 dk beklendi, 30 s karıştırıldı	Akışkanlık ● Hacim Sabitliği ● Penetrasyon ●
G1-02	0.30	-	2000	4 dk karıştırıldı, 4 dk beklendi, 30 s karıştırıldı	Akışkanlık ● Hacim Sabitliği ● Penetrasyon ●
G1-03	0.30	1.0	2000	%90su + toz 4dk karıştırıldı, %10su +katkı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı	Akışkanlık ● Hacim Sabitliği ○ Penetrasyon ●
G1-04	0.35	1.5	2000	%90su + toz 4dk karıştırıldı, %10su +katkı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı	Akışkanlık ● Hacim Sabitliği ○ Penetrasyon ●
G1-05	0.40	-	2000	4 dk karıştırıldı, 4 dk beklendi, 30 s karıştırıldı	Akışkanlık ● Hacim Sabitliği ● Penetrasyon ●
G1-06	0.40	1.0	2000	%90su + toz 4dk karıştırıldı, %10su +katkı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı	Akışkanlık ● Hacim Sabitliği ○ Penetrasyon ●
G1-07	0.40	1.2	2000	%90su + toz 4dk karıştırıldı, %10su +katkı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı	Akışkanlık ● Hacim Sabitliği ○ Penetrasyon ●
G1-08	0.40	1.5	800	%90su + toz 4dk karıştırıldı, %10su +katkı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı	Akışkanlık ● Hacim Sabitliği ○ Penetrasyon ●
G1-09	0.40	1.5	2000	%90su + toz 4dk karıştırıldı, %10su +katkı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı	Akışkanlık ● Hacim Sabitliği ○ Penetrasyon ●
G1-10	0.45	-	2000	8 dk 30 s karıştırıldı	Akışkanlık ○ Hacim Sabitliği ● Penetrasyon ●
G1-11	0.45	1.5	2000	%90su + toz 4dk karıştırıldı, %10su +katkı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı	Akışkanlık ○ Hacim Sabitliği ○ Penetrasyon ●
G1-12	0.50	-	2000	4 dk karıştırıldı, 4 dk beklendi, 30 s karıştırıldı	Akışkanlık ○ Hacim Sabitliği ● Penetrasyon ●
G1-13	0.50	-	2000	8 dk 30 s karıştırıldı	Akışkanlık ○ Hacim Sabitliği ● Penetrasyon ●
G1-14	0.50	1.0	2000	%90su + toz 4dk karıştırıldı, %10su +katkı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı	Akışkanlık ○ Hacim Sabitliği ○ Penetrasyon ○
G1-15	0.60	-	2000	8 dk 30 s karıştırıldı	Akışkanlık ○ Hacim Sabitliği ● Penetrasyon ○

Beklenen değeri sağlıyor ○

Beklenen değeri sağlamıyor ●

Ölçüm yapılmadı ●

* Firma tarafından önerilen üretim prosedürü



Şekil 5. 6 G1 malzemesi ile üretilen şerbetin ayrışması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

G1 malzemesi için tekrarlanan şerbet üretimleri sırasında uygulanan prosedürlere literatür verileri [98,134] ve deneysel çalışmalar, hangi enjeksiyon şerbetinin seçileceğine ise, şerbetin su/bağlayıcı oranı, malzemenin akış, hacim sabitliği ve penetrasyon özelliklerinde sağlaması gereken değerler dikkate alınarak karar verilmiştir. Bölüm 5.3.3, 5.3.4 ve 5.3.5'te deney prosedürleri ve beklenen özellikleri açıklanacak olan bu reolojik özellikler, su/bağlayıcı oranı 0.5 seçildiğinde, %1 oranında süper akışkanlaştırıcı kullanıldığında ve 2000 rpm karıştırma hızında sağlanmıştır (Çizelge 5.3).

Ticari olarak üretilen enjeksiyon malzemesi içerisinde süper akışkanlaştırıcılar barındırdığı ve fazladan eklenen süper akışkanlaştırıcıların malzemenin penetrasyonunu ve enjekte edilebilirliğini etkilediği bilinmektedir [104,105]. Bu nedenle fazladan süper akışkanlaştırıcı eklemekten kaçınılmaya çalışılmıştır. Ancak G1 malzemesi ile yapılan testlerde sadece içinde süper akışkanlaştırıcı barındıran G1-14 üretim kodlu karıştırma yöntemiyle üretilen enjeksiyon şerbeti beklenen özellikleri sağlamıştır. Süper akışkanlaştırıcı yerine su/bağlayıcı oranı arttırılmaya çalışıldığında malzemenin beklenen hacim sabitliği sınır değerini aştığı görülmektedir (Çizelge 5.3).

G2 Enjeksiyon Şerbeti

G2 şerbeti için üretici firmanın önerdiği karıştırma prosedürü G1 şerbeti ile aynıdır. G2 şerbeti için de ilk üretim, üretici firmanın bilgi reçetesinde önerdiği şekilde yapılmıştır.

Ancak, üretici firmanın bilgi reçetesinde önerilen su/bağlayıcı oranı ve karıştırma şekliyle hazırlanan numunelerle deneyler gerçekleştirilememiş, üretilen malzeme yüksek kıvamlı olmuştur (G2-01 şerbeti) (Şekil 5.7a). Daha sonra üretici firmanın bilgi reçetesinde önerdiği su/bağlayıcı oranı karıştırma hızı arttırılarak tekrarlanmıştır (G2-02 şerbeti) (Şekil 5.7b). Ancak bu yöntem ile oluşturulan şerbetlerle yapılan deneylerde de akışkanlık ve penetrasyon özellikleri ile ilgili beklenen özellikler sağlanamamıştır (Çizelge 5.4).

Bu nedenle su/bağlayıcı oranı, karıştırma hızı ve karıştırma süresi değiştirilerek üretimler tekrarlanmıştır. Bazı üretimler sırasında %1 oranında süper akışkanlaştırıcı kullanılmış, ancak süper akışkanlaştırıcının G2 şerbetinde, G1 şerbetinin aksine hacim sabitliğini negatif yönde etkilediği ve terlemeyi arttırdığı görülmüştür. G2 şerbetinin beklenen özellikleri sağlayabilmesi için süper akışkanlaştırıcıya gerek kalmamıştır.

G2 şerbeti için tekrarlanan farklı üretimler, su/bağlayıcı oranları, karıştırma hızları, karıştırma süreleri ve beklenen hangi özellikleri sağlayıp sağlayamadıkları Çizelge 5.4'te gösterilmiştir. Her numune en az 3 kez test edilmiş, tüm üretimler ve deneyler $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ortam sıcaklığı ve 40 ± 5 bağıl nemde gerçekleştirilmiştir.

Üretici firma reçetesiyle üretilen enjeksiyon şerbeti G2-01 (Şekil 5.7a) olarak adlandırılmıştır. Malzemenin yüksek kıvamı nedeniyle mekanik karıştırıcı durmuş, karışım gerçekleştirilememiş, deneyler yapılamamıştır. Daha sonra aynı su/bağlayıcı oranında karıştırma hızı arttırılarak G2-02 şerbeti üretilmiş, bu şerbette de Şekil 5.7b'de görüleceği gibi karışım sırasında topaklanmalar oluşmuştur. Uygun şerbet tüm beklenen özellikleri sağlayan G2-06 (Şekil 5.7c) seçilmiş, bu şerbette su/bağlayıcı oranı 0.6 olarak alınmış, şerbet süper akışkanlaştırıcı kullanılmadan, 2000 rpm karıştırma hızında, 8 dakika 30 saniye karıştırılarak elde edilmiştir.

Çizelge 5. 4 G2 şerbeti için tekrarlanan üretimler

Şerbet kodları	Su/Bağlayıcı oranı	Kimyasal Katkı (%)	Karıştırma Hızı (rpm)	Karıştırma Süresi	Beklenen Malzeme Özellikleri
G2-01*	0.30	-	500-600	4 dk karıştırıldı, 4 dk beklendi, 30 s karıştırıldı	Akışkanlık ○ Hacim Sabitliği ○ Penetrasyon ○
G2-02	0.30	-	2000	8 dk 30 s karıştırıldı	Akışkanlık ● Hacim Sabitliği ○ Penetrasyon ●
G2-03	0.50	1.0	2000	%90su + toz 4dk karıştırıldı, %10su +katkı 30s eklendi, 4dk karıştırıldı	Akışkanlık ○ Hacim Sabitliği ● Penetrasyon ●
G2-04	0.50	-	2000	8 dk 30 s karıştırıldı	Akışkanlık ○ Hacim Sabitliği ○ Penetrasyon ●
G2-05	0.60	1.0	2000	%90su + toz 4dk karıştırıldı, %10su +katkı 30s eklendi, 4dk karıştırıldı	Akışkanlık ○ Hacim Sabitliği ● Penetrasyon ○
G2-06	0.60	-	2000	8 dk 30 s karıştırıldı	Akışkanlık ○ Hacim Sabitliği ○ Penetrasyon ○

Beklenen değeri sağlıyor ○

Beklenen değeri sağlamıyor ●

Ölçüm yapılamadı ●

* Firma tarafından önerilen üretim prosedürü



(a) G2-01

(b) G2-02

(c) G2-06

Şekil 5. 7 G2 malzemesi ile üretilen şerbetlerinin görüntüsü (a) G1-1 şerbeti, (b) G1-02 şerbeti, (c) G1-06 şerbeti (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

5.3.2 Taze Birim Ağırlık

Taze haldeki Enjeksiyon malzemelerinin ilk olarak TS EN 1015-6 [135] ya göre taze birim ağırlıkları belirlenmiştir. Bir cismin kütlesinin (W, gr), boşluklar dahil doğal haldeki hacmine (V, cm³) oranına o cismin birim-hacim kütlesi (β , gr/cm³) denir.

Taze birim ağırlık belirlenirken, hacmi bilinen ölçü kabı, tartı ve enjeksiyon şerbeti kullanılmıştır.

Şerbet hacmi bilinen ölçü kabına dökülmüş, darası alınarak tartılmış ve (5.1) bağıntısına göre taze birim ağırlığı hesaplanmıştır.

$$\beta = \frac{W}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (5.1)$$

Çizelge 5.5'te G1 ve G2 malzemelerinden seçilen G1-14 ve G2-06 şerbetlerinin taze birim ağırlıkları verilmektedir. Beklenen özellikleri sağlamayan diğer şerbetlerle beraber yapılan tüm ölçümler Ek-A'da verilmiştir. Her numune en az 3 kez test edilmiş, tüm ölçümler 20±2°C ortam sıcaklığı ve %40±5 bağıl nemde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5. 5 G1-14 ve G2-06 enjeksiyon şerbetlerinin birim ağırlıkları

Şerbet Kodları	G1	G2
Taze Birim Ağırlık β , (g/cm ³)	1.61 ± 0.01	1.57 ± 0.01

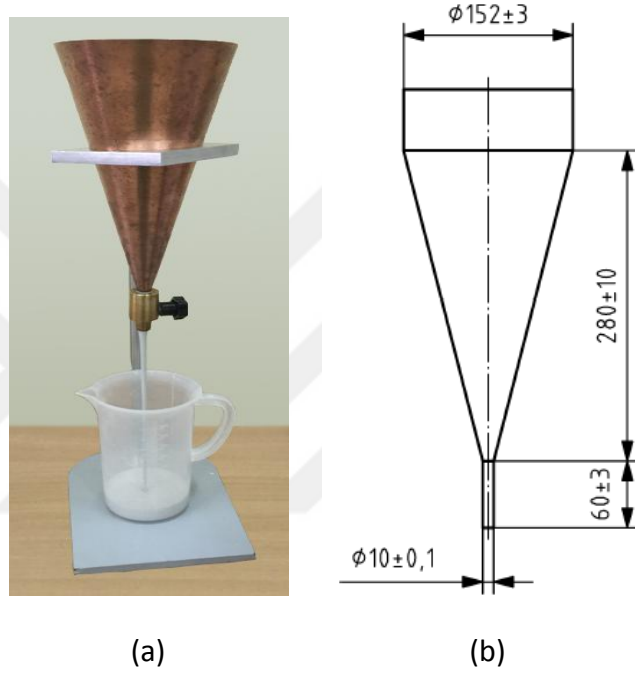
5.3.3 Akışkanlık Özelliği

Enjeksiyon malzemelerinin en önemli parametrelerinden biri olan akışkanlık özelliğini belirlemek için TS EN 445 [136] te belirtilen "Akış konisi" (Şekil 5.8a) ve ASTM D 6910 [137] a göre uygulanan "Marsh hunisi" (Şekil 5.10a) kullanılmıştır. Daha önce yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde her iki farklı tipte koninin de kullanıldığı görülmüştür. Bu nedenle, iki farklı koni ile deneyler gerçekleştirilerek sonuçların literatürdeki veriler ile daha kolay kıyaslanması hedeflenmiştir. Deneylerde, standartlarda belirtilen miktardaki şerbetin akış süresi ölçülmüş, sonuçlar Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Akış Konisi

Akış Konisi deneyi TS EN 445 [120] e göre yapılmıştır. Akış konisi ile ilgili beklenen özellikler TS EN 447 [138] de verilmektedir. Deney prensibi 1 litre şerbetin koni ağzından geçmesi için gerekli zamanın ölçülmesidir (t_0).

Bu deneyde, 1,7 litre hacminde koni, kronometre, 1 lt kapasiteli ölçüm kabı ve enjeksiyon şerbeti kullanılmıştır. Koni ağzının çapı 10 mm dir. Diğer ölçüler Şekil 5.8b'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 8 (a) Akış konisi deneyi, (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı) (b) Akış konisi ölçüleri [136]

Deneyler $20\pm 2^\circ\text{C}$ ortam sıcaklığı ve $\%40\pm 5$ bağıl nemde gerçekleştirilmiştir. Deneyden önce koni temizlenip nemlendirilmiş, serbest su alınmış ve altı kapatılmıştır. Koninin altına ölçüm kabı yerleştirildikten sonra, koninin üst kısmından şerbet hava birikmemesi için yavaşça dökülmüştür. Daha sonra koninin altı açılmış ve aynı anda kronometre çalıştırılmıştır. 1 litre şerbetin silindire dolması için gereken süre 0.5 saniyeye yuvarlatılarak ölçülmüştür (Şekil 5.9)

Şerbet enjeksiyonu hakkında daha önce yapılan çalışmalarda akış konisi deneyi, enjeksiyon şerbetleri için belirlenmiş standartlar olmadığı için TS EN 447'ye [138] göre gerçekleştirilmiştir. TS EN 447'ye [138] göre, akış konisi ile yapılan deneyde karışım

işleminde sonra ölçülen akış süresinin (t_0) 25 saniyeden küçük, ya da eşit olması gerekmektedir (5.2a). Akış süreleri, karışım işlemi bittikten hemen sonra (t_0) ve numune 30 dakika daha karıştırıldıktan sonra (t_{30}) ölçülmüştür. Yine TS EN 447 [138] ye göre (t_{30}) sınır değeri için verilen ilişki (5.2b) de gösterilmiştir.

$$t_0 \leq 25 \text{ s} \quad (5.2a)$$

$$0.8 \times t_0 \leq t_{30} \leq 1.2 \times t_0 \quad (5.2b)$$



Şekil 5. 9 Akış Konisi deneyi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

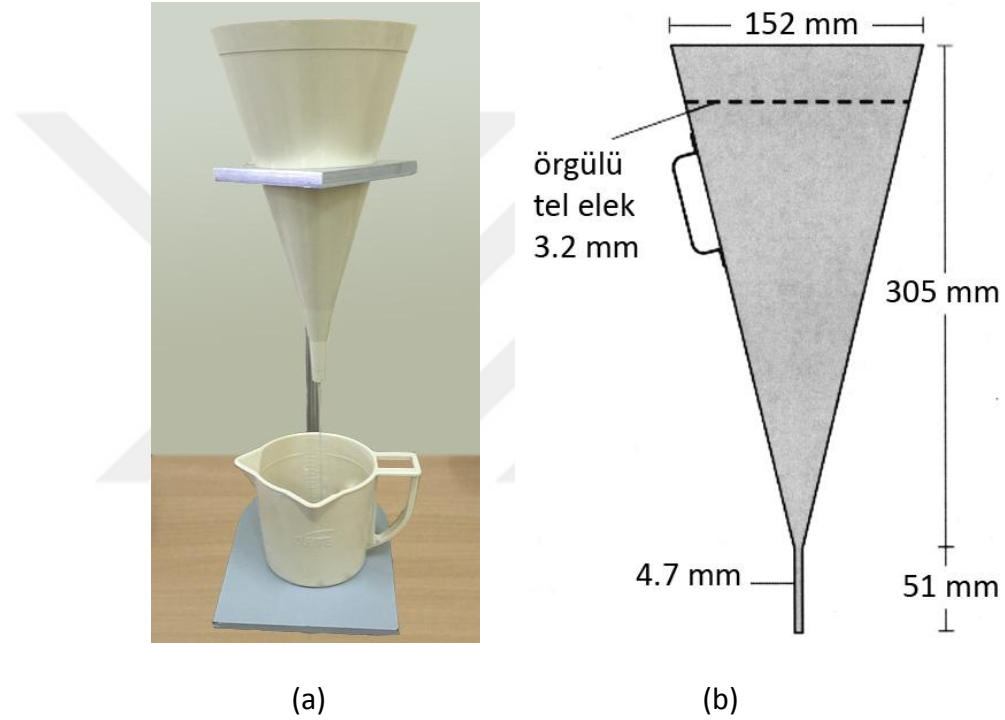
Beklenen özellikleri sağlayan G1 ve G2 enjeksiyon şerbetleri ile yapılan Akış Konisi ölçümleri Çizelge 6.6'da gösterilmiştir. Beklenen özellikleri sağlamayan diğer şerbetlerle beraber yapılan tüm ölçümler Ek-A'da verilmiştir. Her numune en az 3 kez test edilmiş, tüm ölçümler $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ortam sıcaklığı ve $\%40 \pm 5$ bağıl nemde gerçekleştirilmiştir.

Marsh Hunisi

Marsh Hunisi deneyi ASTM D 6910 [137] a göre yapılmıştır. Marsh Hunisi deneyinde standardda belirtilen bir sınır değeri olmadığı için, literatürde yer alan çalışmalar dikkate alınmıştır [97,104]. Deney prensibi 500ml şerbetin koni ağzından geçmesi için gerekli zamanın ölçülmesidir (t_0).

Bu deneyde, 1,5 litre hacminde elekli koni, kronometre, 1 lt kapasiteli ölçüm kabı, termometre ve enjeksiyon şerbeti kullanılmıştır. Koni ağzının çapı 4.7 mm dir. Diğer ölçüler Şekil 5.10b'de gösterilmiştir.

Deneyler $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ortam sıcaklığı ve $\%40 \pm 5$ bağıl nemde gerçekleştirilmiştir. Deneyden önce koninin altı kapatılmıştır. Koninin altına ölçüm kabı yerleştirildikten sonra, şerbet, büyük parçaları ayırmak için konulan eleğin üzerinden yavaşça dökülmüştür. Daha sonra koninin altı açılmış ve aynı anda kronometre çalıştırılmıştır. 500ml şerbetin silindire dolması için gereken süre 0.5 saniyeye yuvarlatılarak ölçülmüştür (Şekil 5.10)



Şekil 5. 10 (a) Marsh hunisi deneyi, (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı) (b) Marsh hunisi ölçüleri [137]

Literatürde yer alan çalışmalar dikkate alınmış, akış süresi 45 saniyenin altında olacak şekilde su/bağlayıcı oranları belirlenmiştir [97,104]. Akış süreleri, karışım işlemi bittikten hemen sonra (t_0) ve numune 30 dakika daha karıştırıldıktan sonra (t_{30}) ölçülmüştür (Şekil 5.11). Buna göre t_0 ve t_{30} için sınır değerler sırasıyla (5.3a) ve (5.3b) de gösterilmiştir.

$$t_0 \leq 45 \text{ s} \quad (5.3a)$$

$$t_{30} \leq 45 \text{ s} \quad (5.3b)$$



Şekil 5. 11 Marsh Hunisi deneyi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Beklenen özellikleri sağlayan G1 ve G2 enjeksiyon şerbetleri ile yapılan Marsh Hunisi ölçümleri Çizelge 6.6'da gösterilmiştir. Beklenen özellikleri sağlamayan diğer şerbetlerle beraber yapılan tüm ölçümler Ek-A'da verilmiştir. Her numune en az 3 kez test edilmiş, tüm ölçümler $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ortam sıcaklığı ve $\%40 \pm 5$ bağıl nemde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5. 6 G1 ve G2 enjeksiyon şerbetleri ile yapılan akışkanlık deneyleri sonuçları ve standard değerleri

	Akış Konisi (t_0)	Akış Konisi (t_{30})	Marsh Hunisi (t_0)	Marsh Hunisi (t_{30})
Koni Ağzı Çapı	10 mm		4.7 mm	
Standard değer	≤ 25 saniye *	$0.8 \times t_0 \leq t_{30} \leq 1.2 \times t_0$ *	≤ 45 saniye **	
G1	7.5 ± 0.5 saniye	7.5 ± 0.5 saniye	27 ± 1 saniye	26 ± 1 saniye
G2	8 ± 0.5 saniye	7.5 ± 0.5 saniye	28 ± 1 saniye	25 ± 1 saniye

* Standard değer TS EN 447'ye [138] göre alınmıştır.

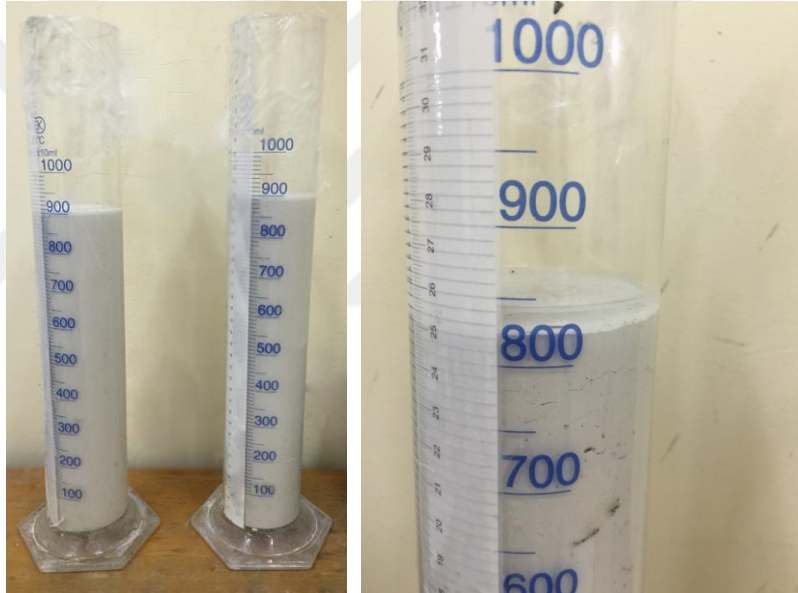
** Standard değer literatür [97,104] verilerine göre alınmıştır.

5.3.4 Hacim Sabitliği Özelliği

Beklenen temel özelliklerin bir diğeri olan hacim sabitliği, TS EN 445 [136] ve ASTM C 940 [139] a göre yapılan terleme deneyi ile belirlenmiştir. Deney prensibi, bekletildiği yerde buharlaşması engellenen şerbetin yüzeyinde toplanan su hacminin ölçülmesidir.

Bu deneyde 1000 ml'lik ölçülü cam kap, kap yüzeyini yalıtım için streç film, kronometre ve enjeksiyon şerbeti kullanılmıştır.

Karışım tamamlandıktan hemen sonra 1000 ml'lik cam kap içerisine doldurulan yaklaşık 800 ml şerbetin ilk yüksekliği (h_0) kaydedilmiştir ve buharlaşmayı engellemek için kap yüzeyi streç film ile sarılarak yalıtılmıştır (Şekil 5.12). Enjeksiyon şerbetinin (h_g) ve terleme suyunun (h_s) yüksekliği 1., 2., 3. ve 24. saatin sonunda ölçülmüştür. Sadece son değeri okumak yerine belirli aralıklarla kayıt almanın amacı, genleşen şerbet davranışlarının izlenebilmesidir. Literatürde de, ilk saatlerde ve 24. saat sonunda terleme değerinin hesaplandığı görülmüştür [133,140]. Enjeksiyon malzemelerinin terleme değerleri ilk 3 saatte hacminin %3'ünü, 24 saatte hacminin %5'ini geçmemelidir [97,134,141].



Şekil 5. 12 Terleme Deneyi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Bu çalışma kapsamında, numunelerin 3. ve 24. saat sonundaki terleme değerleri TS EN 445 [136] ve ASTM C 940 [139] a göre (5.4) bağıntısı ile hesaplanmış, Beklenen özellikleri sağlayan G1 ve G2 enjeksiyon şerbetleri ile ilgili deney sonuçları Çizelge 6.7'de gösterilmiştir. Beklenen özellikleri sağlamayan diğer şerbetlerle beraber yapılan tüm ölçümler Ek-A'da verilmiştir. Her numune en az 3 kez test edilmiş, tüm ölçümler $20\pm 2^\circ\text{C}$ ortam sıcaklığı ve $\%40\pm 5$ bağıl nemde gerçekleştirilmiştir.

$$Terleme, \% = \frac{h_s}{h_0} \times 100 \quad (5.4)$$

Buna göre;

h_0 : Şerbetin ilk yüksekliği

h_s : Terleme suyunun yüksekliği

Çizelge 5. 7 G1 ve G2 enjeksiyon şerbetleri ile yapılan terleme deneyleri sonuçları ve standard değerleri

	Terleme 1.saat, (%)	Terleme 2.saat, (%)	Terleme 3.saat, (%)	Terleme 24.saat, (%)
Standard değer	< 3 *			< 5 *
G1	1.5 ± 0.2	2.5 ± 0.2	2.7 ± 0.2	1.6 ± 0.4
G2	0.8 ± 0.1	0.9 ± 0.1	1.8 ± 0.5	2.6 ± 0.5

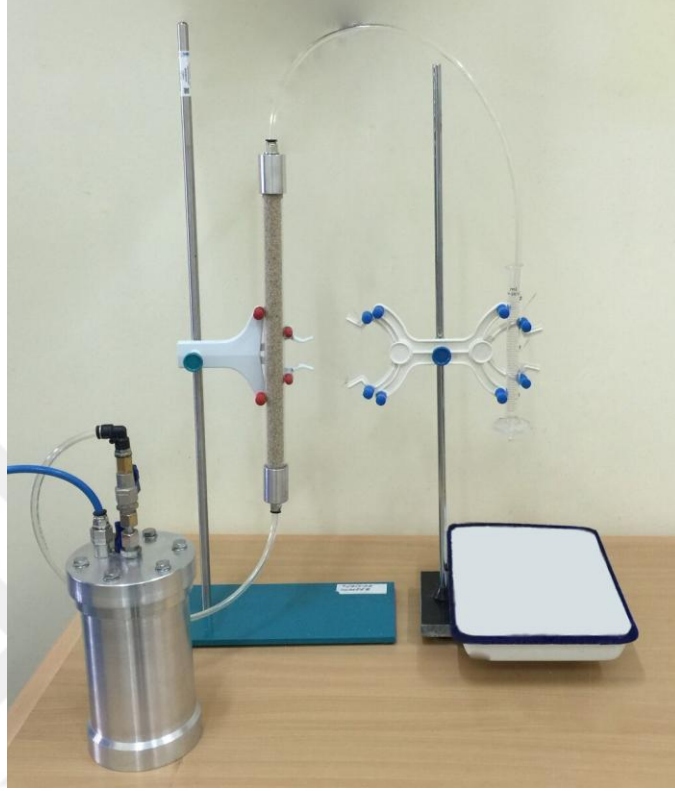
* Standard değer literatür [97,134,141] verilerine göre alınmıştır.

Çizelge 5.7'de görülebileceği gibi, G1 şerbetinin terleme deneyinde, 3. saat terleme değerleri sınır değerlere yaklaşmış olmasına rağmen 24. saat terleme değerleri sınır değerlerin çok altında kalmıştır. G1 malzemesi ile üretilen ve süper akışkanlaştırıcı kullanılan diğer şerbetlerde de aynı durum gözlemlenirken, süper akışkanlaştırıcı kullanılmayan şerbetlerde aksine 24. saatte terlemede artış gözlemlenmiştir (Çizelge Ek-A.3). Süper akışkanlaştırıcı kullanılmadan üretilen G2 şerbeti ise terlemenin 1., 2., 3. ve 24. saatinde yapılan tüm ölçümlerde sınır değerlerin altında kalmıştır. Ancak, bu şerbette süper akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerde 1.,2. ve 3. saatteki ölçümler sınır değerlerin altında kalırken, 24. saatteki ölçümler sınır değerlerin çok üzerine çıkmıştır (Çizelge Ek-A.3). Literatür verilerinde de süper akışkanlaştırıcıların enjeksiyon şerbetlerinin hacim sabitliği özelliğine etkisinden bahsedildiği [105] ve deneylerle de görüldüğü için G1 şerbetinde 24. saatteki terlemedeki düşüşün ve G2 şerbetinde 24. saatteki terleme artışının süper akışkanlaştırıcıdan kaynaklandığı düşünülmektedir.

5.3.5 Penetrasyon Özelliği

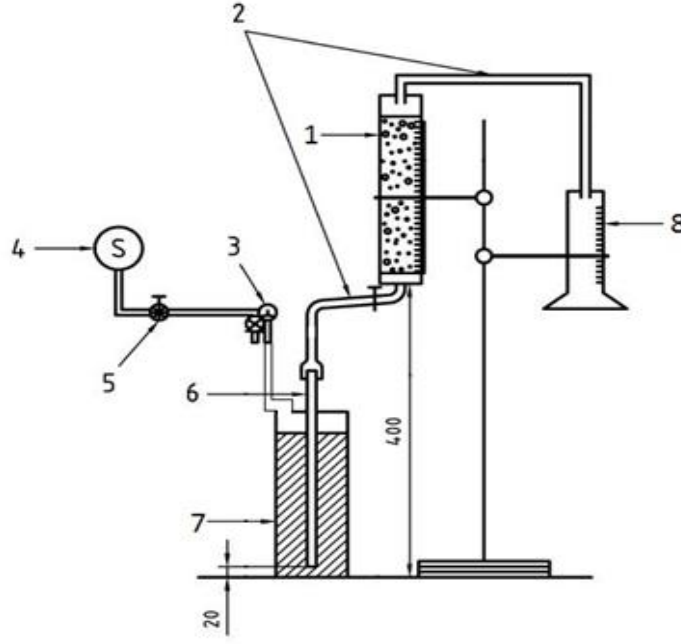
Enjeksiyon uygulamalarında kullanılan malzemenin penetrasyon özelliği, uygulama öncesinde test edilmelidir. Şerbetlerin penetrasyon özelliği, BS EN 1771 [142] e göre yapılan kum kolonu deneyi ile belirlenmektedir. Deney prensibi, enjeksiyon şerbetinin,

kum ile dolu dikey pozisyondaki transparan plastik tüp içerisine, sabit basınç altında enjekte edilebilirliğini ölçmektir. Tüpe enjeksiyon en alttan yapılır ve enjeksiyon şerbetinin belirlenen belli referans noktalarına ulaşma zamanı belirlenir (Şekil 5.13).



Şekil 5. 13 Kum kolonu deneyi, deney seti (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Standarda uygun olarak tasarlanan deney setinde, 360 mm uzunluğunda ve $22,2 \pm 0,3$ mm çapında plastik şeffaf tüp kullanılmıştır. Tüp içerisinde kullanılan malzeme, 1,25 – 2,5 mm boyutlarında silis esaslı doğal dere kumudur. Tüpün içinden kumların geri gelmesini engellemek için, tüpün alt kısmına ve üst kısmına örgülü tel ağ yerleştirilmiştir. Kompresör, metal enjeksiyon kabı, kronometre, taşma kabı ve enjeksiyon şerbeti kullanılan diğer gereçlerdir. Ayrıca bu deney sırasında kompresörü enjeksiyon kabına bağlayan 1, enjeksiyon kabını tüpe bağlayan 1, tüpü taşma tüpü bağlayan 1 olmak üzere toplamda 3 adet 6mm çapında plastik malzemeden üretilmiş hareketli bağlantı tüpü kullanılmıştır (Şekil 5.14).



Şekil 5. 14 Kum kolonu deneyi [142]

Şekil 5.14'te tüm ölçüler mm dir. Şekil 5.14'e göre;

1= Tüp

2= Hareketli esnek bağlantı tüpleri

3= Basınç kontrol göstergesi

4= Basınç kaynağı (kompresör)

5= Basınç düzenleyici valf

6= Metal enjeksiyon kabı içerisindeki enjeksiyon şerbetinin yükseldiği tüp

7= Metal enjeksiyon kabı

8= Taşma kabı (enjeksiyon şerbetinin toplandığı kap)

Deneye başlamadan önce ilk olarak tüp içerisinde kullanılmak üzere TS EN 196-1 [28] e uygun silis esaslı doğal dere kumu elenerek 1.25 – 2.5 mm boyutlarında kum (Şekil 5.15b) yeniden yapılandırılmıştır (Şekil 5.15a). Bunun için 1.25 mm, 1.6 mm, 2.0mm, ve 2.5 mm aralıklı elekler kullanılmıştır. Kum kolonu deneyinde kullanılan kumun granülometri eğrisi Çizelge 5.8'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

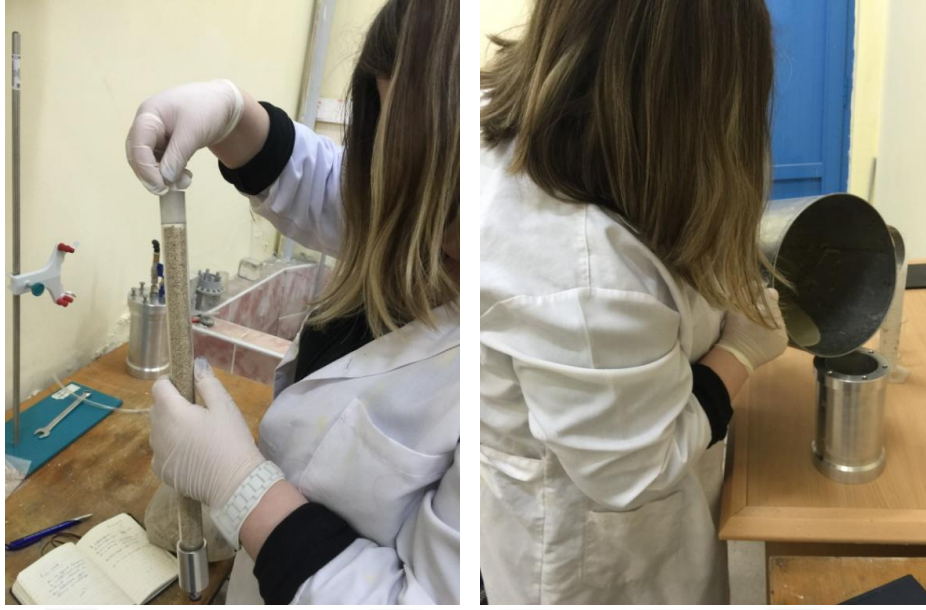
Şekil 5. 15 Kum kolonu deneyi için; (a) Silis esaslı dere kumunun elenmesi, (b) Yeniden yapılandırılmış 1.25-2.50 mm boyutlarındaki kum (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015).
Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

1.25 mm - 2.5 mm boyutlarında kullanılan kum ile literatüre göre 0.2 mm – 0.4 mm çapındaki boşluklar modellenmiştir [97]. Duvar deneyleri oluşturulurken 0.2 mm - 0.4 mm çatlak genişlikleri referans alınacağı için, kum kolonu deneyinde bu durum göz önünde bulundurularak 1.25 mm - 2.5 mm aralığında tane boyutları olan kum kullanılmıştır.

Çizelge 5. 8 Kum kolonu deneyinde kullanılan kumun granülometri eğrisi

Elek Aralığı (mm)	1.25	1.6	2.0	2.5
Toplam Geçen (%)	0	33	66	100

Deney sırasında ilk olarak cam tüpün alt kısmına, kumun dökülmesini engellemek için örgülü tel ağ yerleştirilmiştir. Daha sonra kum transparan tüpe doldurulup (Şekil 5.16a), tüpün üzeri örgülü tel ağ ve kauçuk delikli tıkaç ile kapatılmıştır. Enjeksiyon şerbeti üretilir üretilmez metal enjeksiyon kabına dökülmüştür (Şekil 5.16b). Hemen ardından hareketli bağlantı tüpleri ile kompresör ile metal enjeksiyon kabı, metal enjeksiyon kabı ile cam tüp, cam tüp ile taşma kabı arasındaki bağlantı sağlanmıştır (Şekil 5.14).



(a)

(b)

Şekil 5. 16 (a)Kumun tüpe doldurulması, (b) Enjeksiyon şerbetinin metal kaba dökülmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

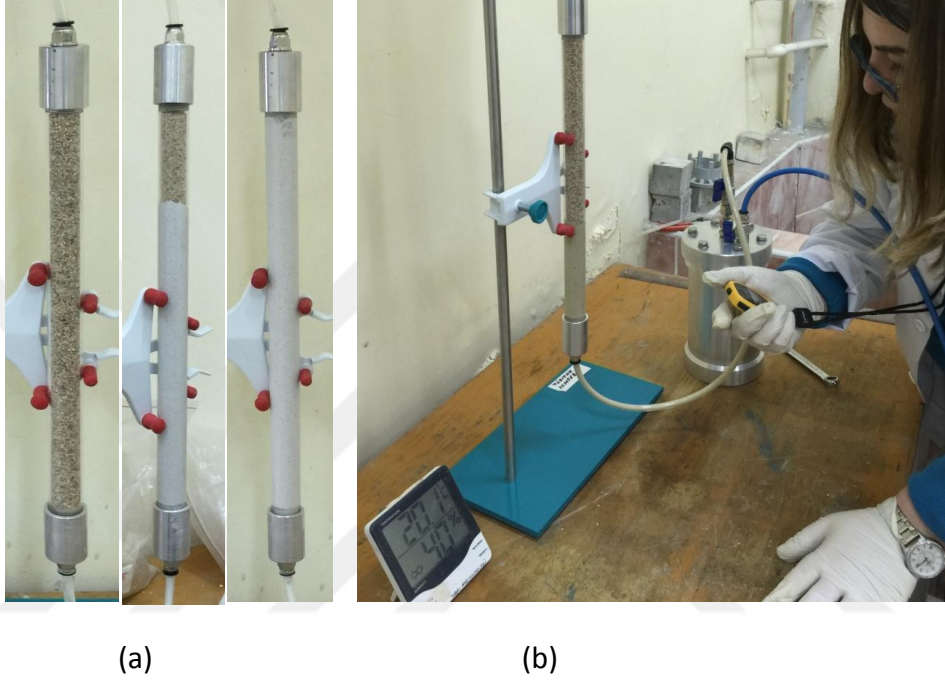
Deney, standardda belirtilen sabit basınç (0.075 ± 0.0025 MPa) altında gerçekleştirilmiştir. Enjeksiyon malzemesi sabit basınç ile transparan tüpün üst ucuna (36 cm) ulaştığı andaki (T_{36}) ve toplama kabında 20 ml malzeme toplandığı andaki (T_{20ml}) süreler kaydedilmiş, beklenen özellikleri sağlayan G1 ve G2 enjeksiyon şerbetleri ile ilgili sonuçlar Çizelge 6.9'da gösterilmiştir. Beklenen özellikleri sağlamayan diğer şerbetlerle beraber yapılan tüm ölçümler Ek-A'da verilmiştir. Her numune en az 3 kez test edilmiş, tüm ölçümler $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ortam sıcaklığı ve $\%40 \pm 5$ bağıl nemde gerçekleştirilmiştir. Literatüre göre, T_{36} süresinin 50 saniyeden küçük olması gerekmektedir [97,106]. BS EN 1771 [142] e göre penetrasyon sonuçları "geçebilirliği kolay", "geçebilirliği mümkün" ve "geçebilirliği zor" olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır:

- Geçebilirliği kolay: Eğer şeffaf tüp doluyor ve 20 ml fazla ürün toplanıyorsa,
- Geçebilirliği mümkün: Eğer şeffaf tüp dolduysa ama 1ml/dakika akış oranına ulaşmadıysa,
- Geçebilirliği zor: Eğer enjeksiyon şeffaf tüp dolmadan önce durursa.

Çizelge 5. 9 G1 ve G2 enjeksiyon şerbetleri ile yapılan kum kolonu deneyleri sonuçları ve standard değerler

	Kum Kolonu (saniye)	BS EN 1771'e Göre
Standard Değer	< 50 *	-
G1	7.5 ± 1	Geçebilirliği kolay
G2	6 ± 1	Geçebilirliği kolay

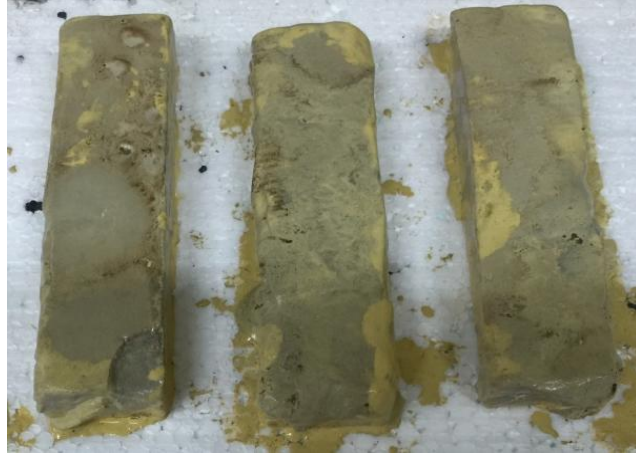
* Standard değer literatür [97,106] verilerine göre alınmıştır.



Şekil 5. 17 (a) Enjeksiyon şerbetinin kolonda ilerlemesi, (b) Kum kolonu deneyinin yapılışı (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı – E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

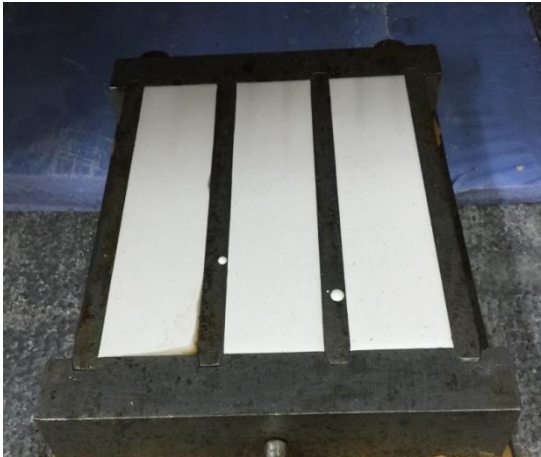
5.4 Sertleşmiş Şerbet Numuneleri ile Yapılan Mekanik ve Fiziksel Deneyler

Taze deneylerde beklenen özellikleri sağlayan G1 ve G2 şerbetleri sertleşmiş şerbet deneyleri için küre konulmuştur. Ancak G1 şerbeti 28 gün kür koşullarında bekledikten sonra Şekil 5.18'de görülebileceği gibi sertleşmemiş, hamur kıvamında olduğu gözlemlenmiş, bu malzeme ile mekanik ve fiziksel deneyler yapılamamıştır. Bu nedenle bu aşamadan sonraki çalışmalara G2 şerbeti ile devam edilmiştir.



Şekil 5. 18 G1 şerbetinin 28 gün kür koşullarına bekledikten sonraki durumu (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Enjeksiyon şerbetleri 4x4x16 cm ölçülerindeki önceden yağlanmış kalıplara dökülmüştür. Kalıpların dışı sızdırmazlık için cam macunu ile yalıtılmıştır. Enjeksiyon malzemelerinin kür koşulları için özel bir standard olmadığından dolayı, literatürde yapılan çalışmalar [109,133] incelenmiş ve TS EN 459-2'ye [132] göre numuneler 7. gün kalıptan çıkarılmak üzere 20 ± 2 °C'de 90 ± 5 bağıl nemde, kalıptan çıkarıldıktan sonra ise 20 ± 2 °C'de 65 ± 5 bağıl nemde deney gününe kadar (28. gün) tutulmuştur. Kalıba dökülmüş ve kalıptan çıkarılmış şerbet numuneleri Şekil 5.19'da gösterilmektedir.



Şekil 5. 19 G2 şerbetinin kalıba dökülmüş ve kalıptan çıkarılmış halleri (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

5.4.1 Eğilme Deneyi

Eğilme deneyi TS EN 1015-11 [66] e göre, 4x4x16 cm boyutlu numunelerde 28. günde yapılmıştır. Amaç sertleşmiş enjeksiyon şerbetinin 28. gün eğilme dayanımını (f_e , MPa) bulmaktır.

Deney numunesi kalıbın çelik levha kısmına gelen yüzleri (pürüzsüz yüzleri) mesnete temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Hazırlanan numunenin orta noktasından kuvvet uygulanmış, malzemenin kırılmasına neden olan maksimum yük belirlenmiştir (Şekil 5.20). Deney sırasında yükleme hızı literatüre bağlı kalınarak 0.3 mm/dakika olarak sabit tutulmuştur [143]. Standarda göre (5.5) bağıntısı kullanılarak şerbetlerin eğilme dayanımları hesaplanmıştır.

$$f_e = \frac{1.5 \times P \times L}{b \times d^2} \text{ MPa} \quad (5.5)$$

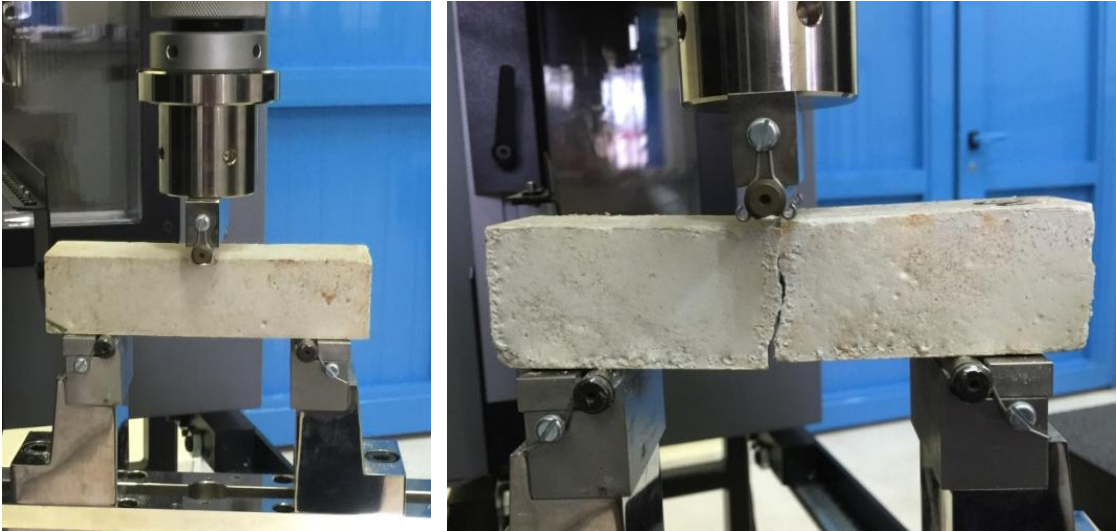
Buna göre;

f_e : Eğilme dayanımı (N/mm²)

P : Kırılma yükü (N)

L : Mesnetler arası uzaklık (mm)

b, d : Numunelerin enkesitlerinin kenar uzunlukları



Şekil 5. 20 G2 malzemesinin eğilme deneyi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Eğilme deneyi için G2 malzemesinden 6 adet numune üretilmiş, her biri için eğilme deneyi sonucu yapılan hesaplamaların aritmetik ortalaması Çizelge 5.10'da gösterilmiştir. Ayrıca özgün malzemelerin (hidrolik kireç esaslı harç, hava kireci esaslı harç ve harman tuğlası) mekanik özellikleri de bu tabloda verilerek enjeksiyon malzemesi ile karşılaştırılmıştır.

5.4.2 Basınç Deneyi

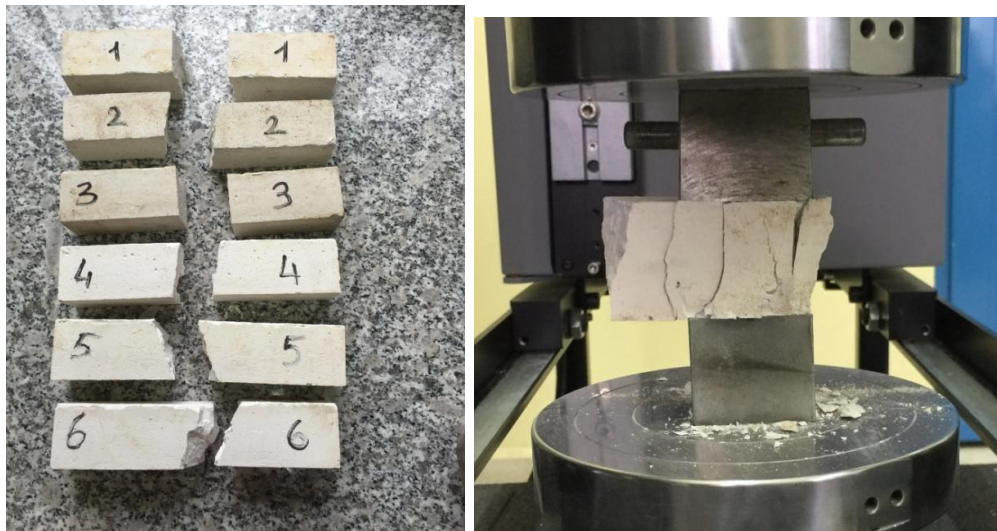
Eğilme deneyi sonucunda ikiye ayrılan parçaların alt ve üzerine yerleştirilen 40x40 mm ölçülerindeki çelik plakalar kullanılarak TS EN 1015-11 [66] e göre 28. gün basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Amaç sertleşmiş enjeksiyon şerbetinin 28. gündeki basınç dayanımını (f_b , MPa) bulmaktır. Yükleme hızı, literatür verileri göz önünde bulundurularak, 0.7 mm/dak olarak sabit tutulmuştur [107]. Yükleme neticesinde numune kırıldıktan sonra belirlenen maksimum yükün, yük uygulanan alana bölünmesiyle basınç dayanımları belirlenmiştir (5.6).

$$f_b = \frac{P}{A} \text{ MPa} \quad (5.6)$$

f_b : Basınç dayanımı (N/mm²)

P : Kırılma yükü (N)

A : Yük uygulanan alan (mm²)



Şekil 5. 21 G2 malzemesinin basınç deneyi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Basınç deneyi G2 malzemesi için 6 kez tekrarlanmış (Şekil 5.21), her bir numune için basınç deneyi sonucu yapılan hesaplamanın aritmetik ortalaması Çizelge 5.10'da gösterilmiştir. Ayrıca özgün malzemelerin (hidrolik kireç esaslı harç, hava kireci esaslı harç ve harman tuğlası) mekanik özellikleri de bu tabloda verilerek enjeksiyon şerbeti ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5. 10 G2 malzemesi ile yapılan mekanik deneyler ve özgün malzeme özellikleri ile karşılaştırılması

	G2	Hidrolik Kireç Esaslı Harç	Hava Kireci Esaslı Harç	Harman Tuğlası (TS EN 772-1)
Basınç Dayanımı (MPa)	2.0	1.5	0.4	9.4
Eğilme Dayanımı (MPa)	0.8	0.9	0.5	1.8

Çizelge 5.10'da belirtildiği gibi 28. günde gerçekleştirilen eğilme ve basınç deneylerinden edinilen sonuçlara göre, malzemenin eğilme ve basınç dayanımının hidrolik özellik gösteren kireç harçlarına yakın olduğu görülmüştür [4,144,145].

5.4.3 Kılcal Su Emme

Kılcal su emme cismin alt yüzünün (tabanının) suya temas etmesi durumunda suyun kılcallık yoluyla zamana bağlı olarak yükselmesi ile saptanan bir büyüklüktür [69]. Deneyde kullanılan standartlar TS EN 1015-18 [60] ve TS EN 15801 [146] dir. Deneyin amacı malzemenin kılcal boşluklarından suyun yüzey gerilimi etkisiyle yükselen su miktarının ve malzemenin ağırlık artışı ile kılcal su emme katsayısının (kılcallık) belirlenmesidir.

TS EN 459-2'ye [132] göre 4x4x16 cm ölçülerindeki numuneler 7. gün kalıptan çıkarılmak üzere 20±2 °C'de %90±5 bağıl nemde, kalıptan çıkarıldıktan sonra ise 20±2 °C'de %65±5 bağıl nemde deney gününe kadar (28. gün) tutulmuştur.

Standarta uygun boyutlarda hazırlanan 3 adet prizmatik şekilli numune (60 ± 2)°C'lik etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar bekletilmiş, oda sıcaklığına gelinceye kadar desikatörde muhafaza edilmiştir.

Deney numunelerinin kuru tartımları (W , kg) alındıktan sonra, bir tepsi içerisine minimum kalınlığı 5mm olan pamuk tabaka yerleştirilmiş ve bu tabaka suya doymun hale getirilmiştir. Numunelerin su ile temas eden bölümleri ölçülmüştür ve temas eden alan (A , m^2) hesaplanmıştır. Daha sonra numuneler su içerisine konarak, numunenin kare kesitli alanı pamuk tabaka ile temas ettiği an t_0 olarak kaydedilmiştir (Şekil 5.22).



Şekil 5. 22 G2 malzemesinin kılcal su emme deneyi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015.
Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

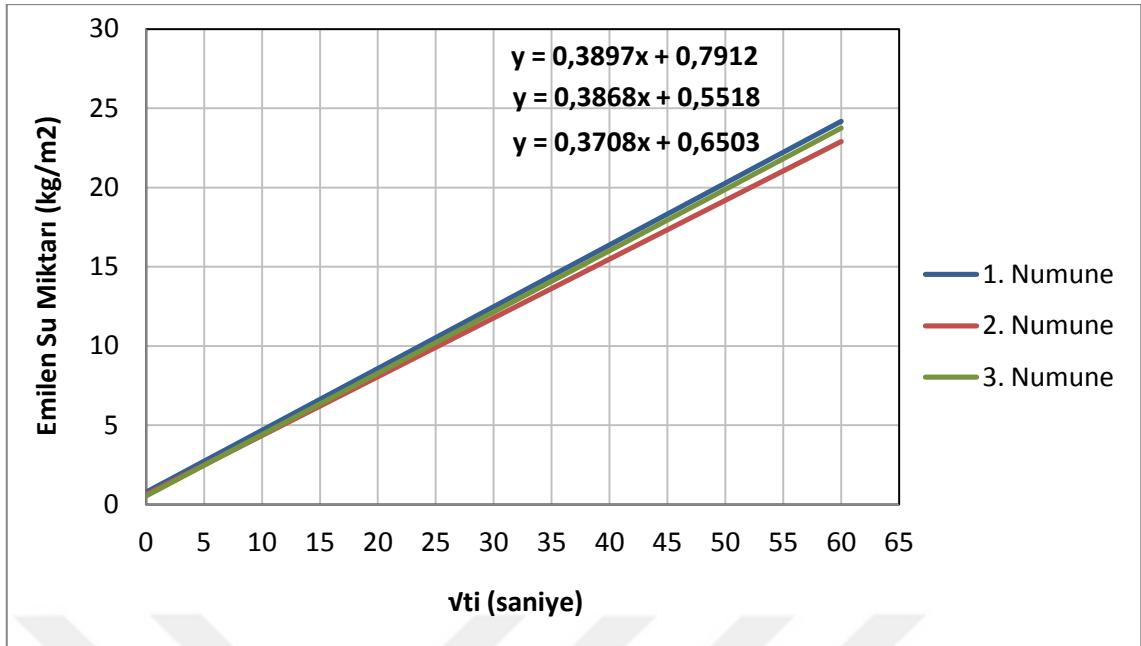
64. saniye, 144.saniye, 256.saniye, 576. saniye, 1024. saniye, 1600. saniye, 2500. saniye, 3600. saniye ve 7200. saniyede (t_i , s) ölçüm yapılarak, ağırlıkları (W_i , kg) belirlenmiştir (EK-A). Enjeksiyon malzemesi 3 numune ile test edilmiş, tüm ölçümler $20\pm2^\circ C$ ortam sıcaklığı ve $\%40\pm5$ bağıl nemde gerçekleştirilmiştir.

Buna göre, emilen su miktarı (Q_i , kg/m^2), (6.7) bağıntısı ile bulunmuştur.

$$Q_i = \frac{W_i - W_0}{A} \text{ kg/m}^2 \quad (6.7)$$

Üç numunenin test sonuçları ve ortalama değerleri Ek-A'da verilmiştir.

Kılcallık katsayısını bulmak için, özgül malzemelerde yapılan deneylerde olduğu gibi ilk 1 saatlik ölçümler kullanılarak, $Q_i - \sqrt{t_i}$ grafiği çizilmiş ve (Şekil 5.23) doğru eğiminden faydalanılmıştır.



Şekil 5. 23 G2 malzemesinin $Q_i - v_{ti}$ grafiği

Kılcal su emme deneyi sonucu ortaya çıkarılan G2 malzemesinin $Q_i - v_{ti}$ grafiğindeki doğru eğiminden yararlanılarak, kılcallık kat sayısı 0.40 kg/m²vs bulunmuştur.

G2 malzemesi ile özgün malzemelerin kılcallık kat sayıları Çizelge 5.11'de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5. 11 G2 malzemesi ile özgün malzemelerin kılcallık katsayılarının karşılaştırılması

Malzemeler	G2	Hidrolik kireç esaslı harç	Hava kireci esaslı harç	Harman tuğlası
Kılcallık Katsayısı, K_k (kg/m ² vs)	0.40	0.25	0.40	0.35

Çizelge 5.11 de görüldüğü gibi G2 malzemesinin kılcallık katsayısı hava kireci bazlı harca çok yakın, hidrolik kireç esaslı harç ve harman tuğlasından yüksek bulunmuştur. Bu nedenle G2 enjeksiyon malzemesinin kılcallık katsayısı açısından hava kireci esaslı harçlara benzerlik gösterdiği söylenebilir.

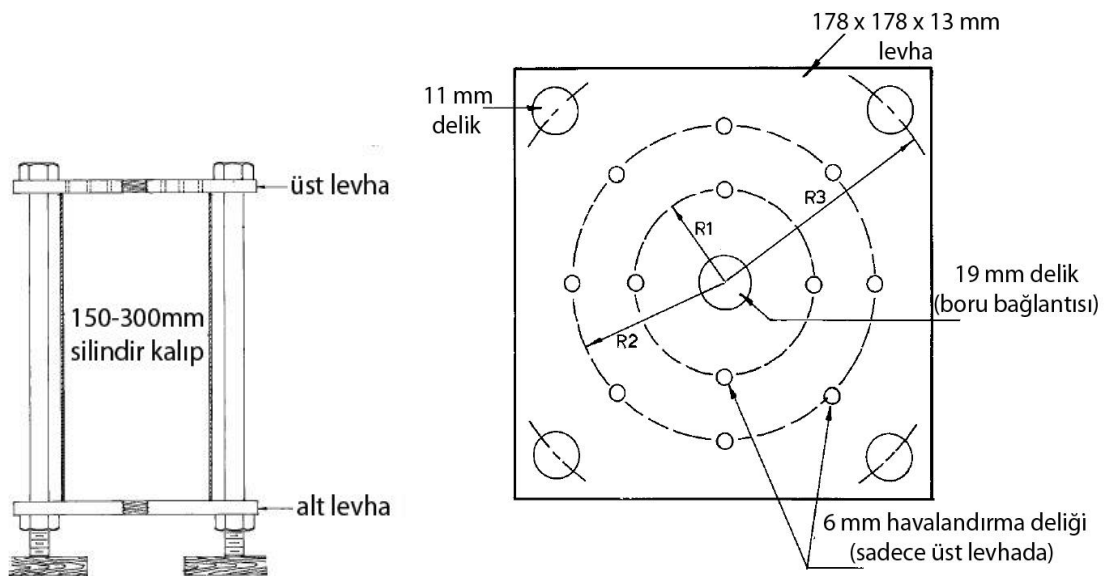
5.5 Enjeksiyon Şerbetinin Enjekte Edilebilirliğinin ve Bu Malzeme ile Onarılmış Elemanın Dayanımının Test Edilmesi

Beklenen özellikleri sağlayan G2 şerbetinin enjekte edilebilirliğini ölçmek için silindir enjeksiyon deneyi yapılmıştır. Daha sonra G2 şerbeti ile onarılmış elemanın dayanımını ölçmek için, silindir enjeksiyon deneyi sırasında üretilen silindir numunelerine tek eksenli basınç deneyi uygulanmıştır.

5.5.1 Silindir Enjeksiyon Deneyi

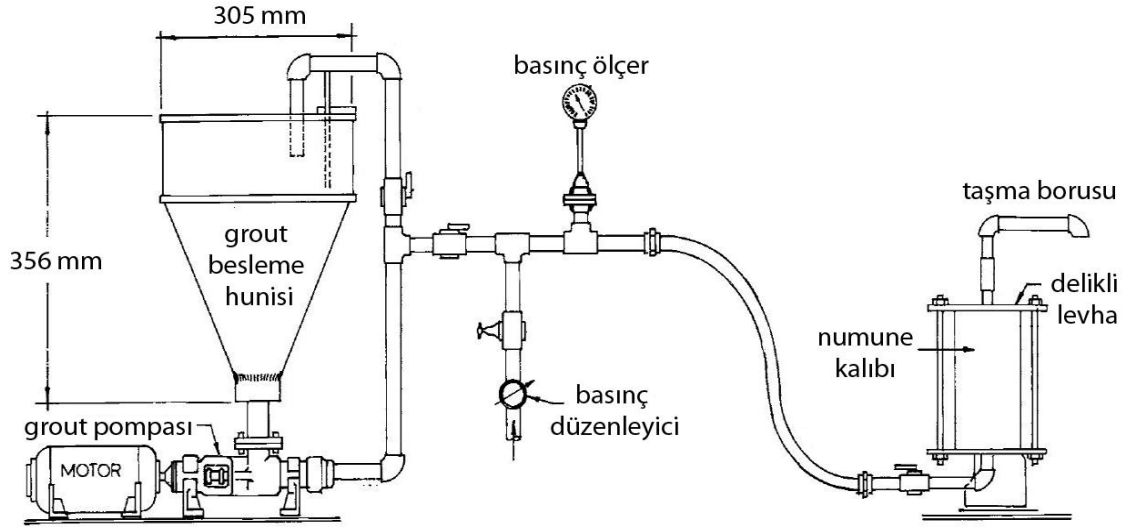
Silindir enjeksiyon deneyi, enjeksiyon malzemelerinin enjekte edilebilirlik ve penetrasyon özelliğini incelemek için kullanılan bir yöntemdir. Yerinde yapılacak uygulama öncesinde model duvar deneylerinin yapılması her zaman mümkün olmadığından, malzeme özelliklerinin incelenmesi için literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır [97,147,148]. Onarılacak elemanı modellemek için, özgün malzemelere (tuğla, taş vb.) ve boşluk oranına uygun olarak silindir numuneler hazırlanır. Deney ASTM C 943 [149] e uygun olarak yapılmıştır.

Silindir enjeksiyon deneyine başlamadan önce ASTM C 943 [149] e uygun olarak enjeksiyon kalıpları hazırlanmıştır. Kalıplar, 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde şeffaf plastik silindir, boru girişi ve havalandırma için delikli üst levha, boru girişi için delikli alt levha ve bağlantı elemanlarından oluşmaktadır (Şekil 5.24).



Şekil 5. 24 Silindir enjeksiyon deneyi için kalıp ölçüleri, kesit ve plan [149]

Deney sırasında silindir enjeksiyon kalıpları dışında, tartı, grout besleme hunisi, grout pompası, motor, termometre ve bağlantı boruları kullanılmıştır. Deney seti ve ölçüleri Şekil 5.25'te gösterilmiştir.



Şekil 5. 25 Silindir enjeksiyon deneyi, deney seti [149]

Proje kapsamında tuğla ve harçtan oluşan model duvarlarda deneysel çalışmalar gerçekleştirileceği için, duvarları temsil etmek amacı ile geleneksel harman tuğlalarından ve deney için üretilen kireç harçlarından 2-4 mm ve 4-8 mm boyutlarında harç ve tuğla kırıkları çıkarılmıştır (Şekil 5.26 ve Şekil 5.27).



Şekil 5. 26 Silindir enjeksiyon deneyi için tuğlaların kırılması ve elenmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)



Şekil 5. 27 Farklı boyutlarda tuğla ve harç kırıkları (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015.
Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Bu çalışma kapsamında üretilecek duvarlarda kullanılacak hidrolik kireç esaslı harçlar "A", hava kireci esaslı harçlar "B" olarak adlandırılmıştır (Şekil 5.27). Hazır enjeksiyon malzemesi ile onarılacak, hava kireci (B) ve hidrolik kireç (A) ile üretilen harçların kullanıldığı tuğla duvarları temsil eden iki farklı seride silindir numuneler hazırlanmıştır. İlk seride literatür verileri göz önünde bulundurularak [95,147] karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla silindirlerde sadece tuğla kırıkları kullanılmış ve kalıplar yağlandıktan sonra, hacimce eşit oranlarda, sıkıştırma yapmadan silindirlere doldurulmuştur (Şekil 5.28). İlk seride aynı özelliklerde üç adet numune üretilmiştir.



Şekil 5. 28 Enjeksiyon öncesi, sadece tuğla kırıkları kullanılan ilk seri silindirler (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

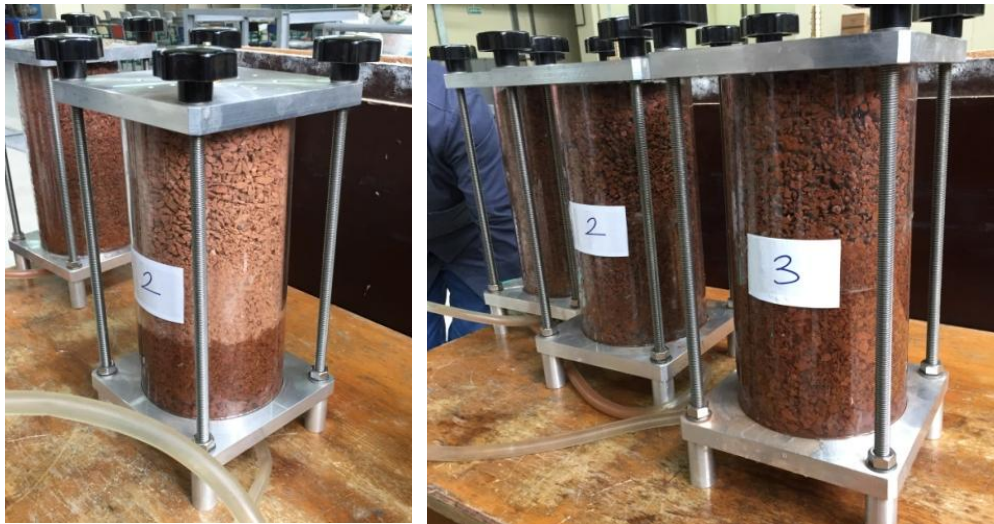
Ancak silindir enjeksiyon deneyinde enjeksiyon uygulaması yapılacak model duvarları temsil etmek amaçlandığı ve bu çalışma kapsamında üretilecek olan duvarlar yüksek oranda harç da içerdiği için ikinci seride tuğla ve harç kırıkları model duvarlardaki hacim yüzdelere uygun olacak şekilde karıştırılmış ve kalıplar yağlandıktan sonra, silindirlere

doldurulmuştur (Şekil 5.29). İkinci seride, farklı harç çeşitlerine bağlı olarak, her harç çeşidinden üçer adet olmak üzere, toplamda altı adet numune üretilmiştir.



Şekil 5. 29 Enjeksiyon öncesi, tuğla ve harç kırıkları kullanılan ikinci seri silindirler (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, silindir enjeksiyon deneyinde toplam hacimsel boşluk oranının %40-%50 civarında olduğu görülmektedir [95,147]. Bu çalışma kapsamında üretilen numunelerde boşluk oranı, silindirlere su enjekte edilerek hesaplanmıştır. Bunun için önce darası alınmış dolu silindirlerin (tuğla ya da tuğla ve harç) kuru tartımları alınmış, daha sonra silindirlere su enjekte edilmiş ve sulu tartımları alınmıştır. Aradaki farkın alınması ile boşluk hacmi belirlenmiş ve silindirin hacmine oranlanmasıyla hacimsel boşluk oranı hesaplanmıştır. Sonuç olarak bu çalışmadaki silindirlerin boşluk oranının %45-%55 oranında değiştiği görülmüştür.

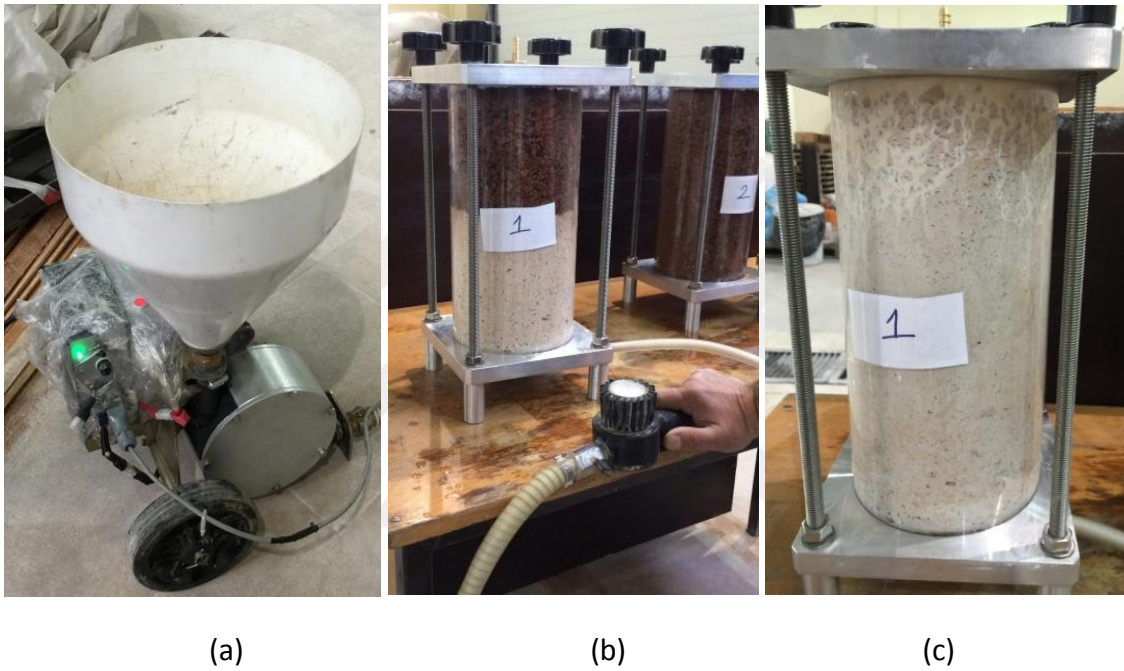


Şekil 5. 30 Enjeksiyon öncesi, silindirleri ön ıslatma işlemi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Enjeksiyon uygulaması yapılmadan önce silindir içerisindeki malzemelerin şerbet içerisindeki suyu emmesini engellemek amacı ile 1 bar sabit basınç ile ön ıslatma işlemi uygulanmıştır [95,147].

Silindirlere önce su enjekte edilerek tamamı doldurulmuş, daha sonra kalıpların alt vanası açılarak 30 dakika suyun süzülmesi beklenmiştir (Şekil 5.30).

Bütün bu aşamalardan sonra 1 bar sabit basınç ile enjeksiyon uygulaması yapılmıştır (Şekil 5.31).



Şekil 5. 31 (a) Enjeksiyon şerbeti besleme hunisi, pompası ve motoru, (b) Silindire şerbet enjekte edilmesi, (c) Şerbet enjekte edilmiş silindir (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Jorne ve diğ. [147] göre, enjekte edilebilirlik belli miktarda enjeksiyon şerbetinin silindirin üst noktasına ulaşması için geçen zamandır; ve şerbetin enjekte edildiği malzemenin özelliklerine bağlıdır. Yine aynı araştırmacıların geliştirdiği (5.8) bağıntısı ile hesaplanan malzemenin enjekte edilebilirlik değerini (l, s^{-1}) hesaplamak için, deney esnasında enjeksiyon malzemesinin kalıbın üst yüzeyine çıkma süresi ve silindiri dolduran enjeksiyon malzemesi miktarı kaydedilmiştir.

$$I = \frac{1}{t} \times \frac{m/\rho}{V_v} s^{-1} \quad (5.8)$$

Bağlantıda yer alan:

t: Şerbetin kalıbın üst yüzeyine çıkma süresi (s)

m: Enjekte edilen şerbet ağırlığı (kg)

ρ : şerbetin yoğunluğu (kg/m^3)

V_v : toplam boşluk hacmi (m^3)

Çizelge 5. 12 Silindir enjeksiyon deneyi sonuçları

Numune		Toplam boşluk oranı (%)	Şerbetin çıkma süresi, t (s)	Enjekte edilen şerbet ağırlığı, m (kg)	Toplam boşluk hacmi, V_v (m^3)	$\frac{m}{\rho V_v}$	Enjekte edilebilirlik değeri, I (s^{-1})
Tuğla	Numune T-1	54.6	60	4.18	0.002893	0.92	0.015
	Numune T-2	55.0	56	4.31	0.003023	0.91	0.016
	Numune T-3	54.9	60	4.31	0.002923	0.94	0.016
Tuğla + A	Numune T+A-1	47.6	28	3.81	0.002523	0.96	0.034
	Numune T+A-2	53.3	31	3.91	0.002823	0.88	0.028
	Numune T+A-3	50.4	28	3.81	0.002673	0.91	0.032
Tuğla + B	Numune T+B-1	45.7	22	3.46	0.002423	0.91	0.041
	Numune T+B-2	46.7	24	3.36	0.002473	0.87	0.036
	Numune T+B-3	44.8	29	3.26	0.002373	0.88	0.030

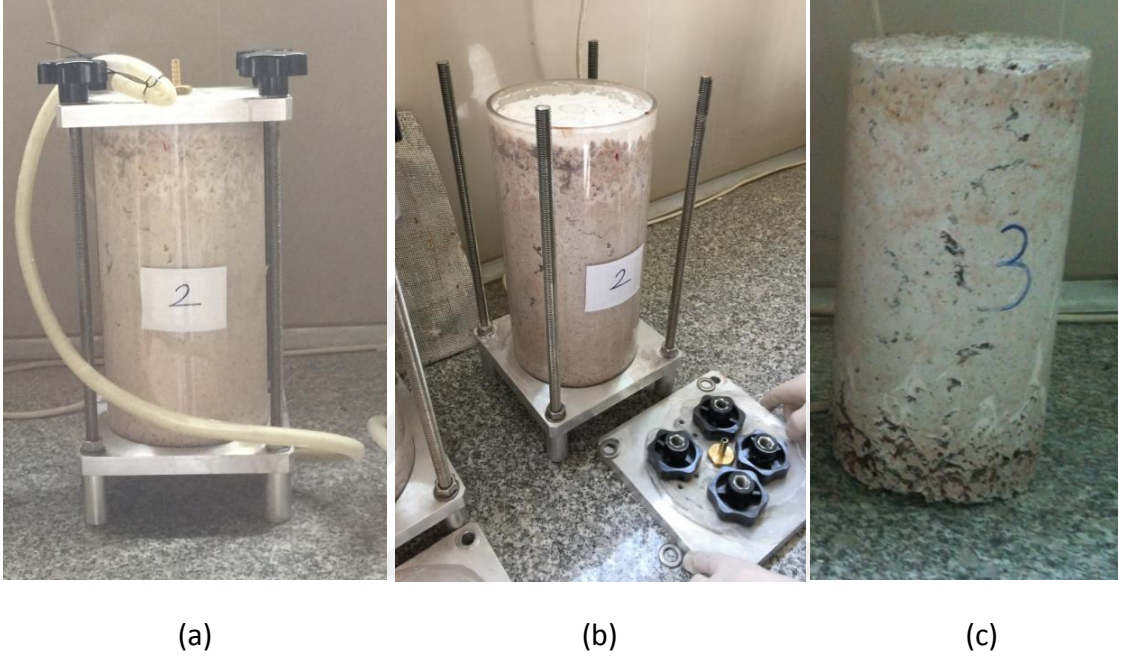
Enjeksiyon uygulamasının yeterli olarak tanımlanabilmesi için enjeksiyon süresinin kısa ve enjeksiyon malzemesi hacminin (m/ρ) toplam boşluk hacmine oranının (V_v) 1'e yakın olması gerekmektedir [147]. Çizelge 5.12'de silindir enjeksiyon deneyi sonuçları gösterilmiştir.

Deney sonuçları incelendiğinde, tüm silindir numunelerde enjeksiyonun başarılı bir şekilde gerçekleştiği ve (m/ρ)/ V_v oranının 1'e yakın olduğu; harç içeren silindirlerde, yalnızca tuğla içeren silindirlere göre enjeksiyon süresinin daha kısa olduğu görülmektedir.

5.5.2 Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülünün Belirlenmesi

Silindir enjeksiyon deneyi sırasında üretilen silindir numuneleri, 7. gün kalıptan çıkarılarak, toplamda 28 gün laboratuvar ortamında bekletilmiştir (Şekil 5.32 ve Şekil 5.33).

Üretilen silindir numunelerde 28. günde tek eksenli basınç deneyi yapılarak, basınç dayanımı ve TS EN 13286-43 [150] e göre elastisite modülü (E , GPa) belirlenmiştir.



Şekil 5. 32 (a) Kalıpta bekletilen silindir numunesi, (b) Silindir numunesinin kalıptan çıkarılması, (c) Kalıptan çıkarılmış silindir numunesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)



Şekil 5. 33 Kalıptan çıkan silindirlerin 28. günde üst yüzeyleri (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Sertleşmiş silindirlerin 28. gündeki basınç dayanımını (f_b , MPa) bulmak için yapılan tek eksenli basınç deneyinde, yükleme hızı, 1.0 mm/dak olarak sabit tutulmuştur (Şekil 5.34). Yükleme neticesinde numune kırıldıktan sonra belirlenen maksimum yükün, yük uygulanan alana bölünmesiyle basınç dayanımları belirlenmiştir (5.9).

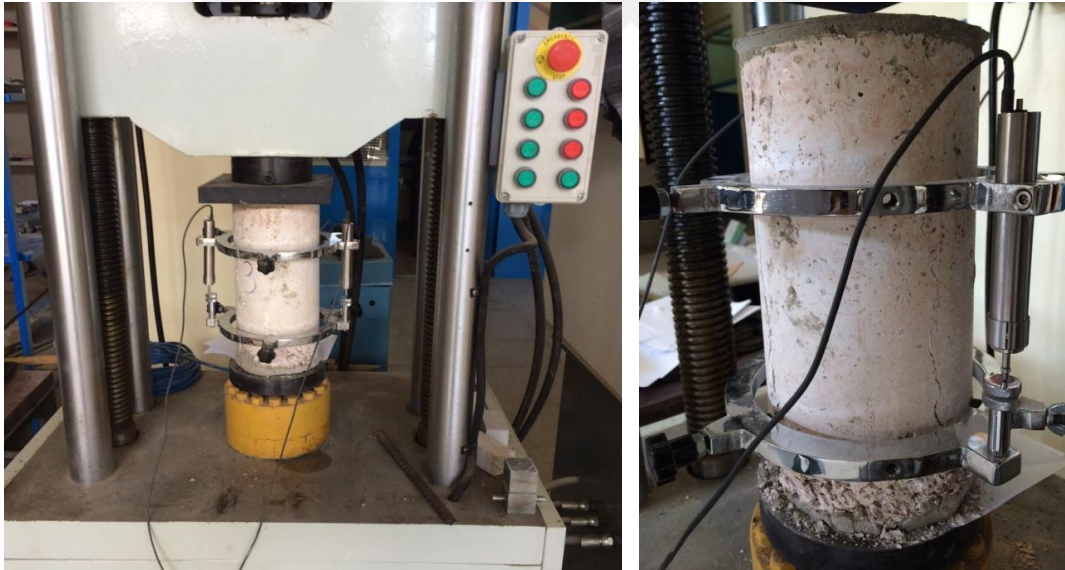
$$f_b = \frac{P}{A} \text{ MPa} \quad (5.9)$$

f_b : Basınç dayanımı (N/mm²)

P : Kırılma yükü (N)

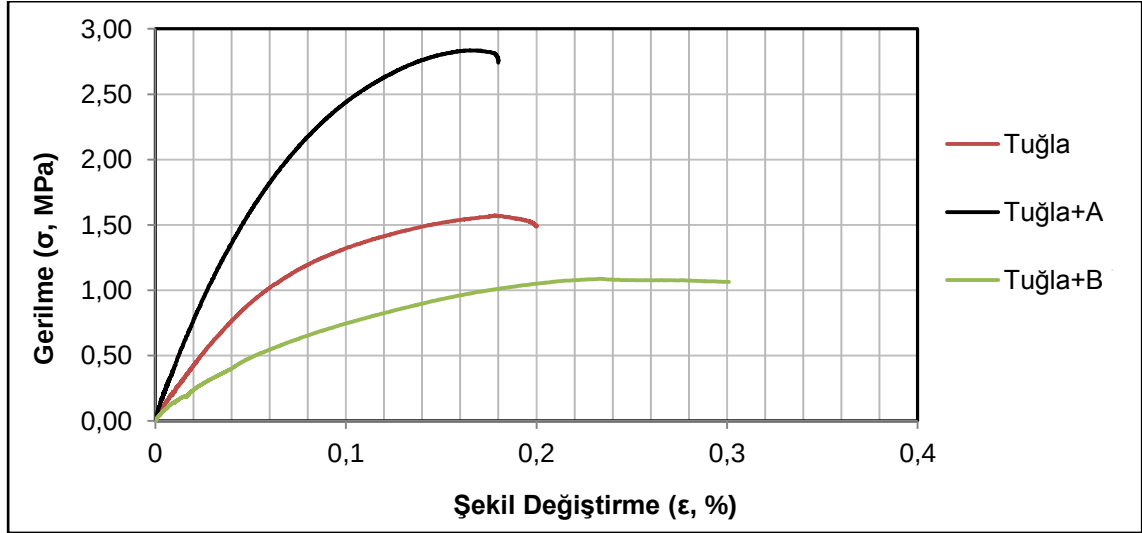
A : Yük uygulanan alan (mm²)

Numune üzerine takılan çerçevenin iki yanına düşey olarak yerleştirilen LVDT'lerden (Şekil 5.34) düşey deformasyonlar ölçülmüş, elde edilen tüm veriler kullanılarak gerilme (σ , MPa) - şekil değiştirme (ϵ , %) eğrileri çizilmiştir (Şekil 5.35).



Şekil 5. 34 Silindirlere yapılan tek eksenli basınç deneyi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

TS EN 13286-43 [150] e göre tek eksenli basınç yükü altında oluşan gerilme-şekil değiştirme eğrisinin başlangıç noktasından, maksimum gerilmenin %30'una tekabül eden noktaya bir teğet çizilmiş, teğetin eğimi belirlenerek elastisite modülü (E , GPa) hesaplanmıştır.



Şekil 5. 35 Silindirlerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri

Tuğla, tuğla ve A harcı, tuğla ve B harcı'na G2 şerbetinin enjekte edilmesi ile üretilmiş silindirlerin tek eksenli basınç deneyi sonucu hesaplanmış basınç dayanımları (f_b , MPa) ve elastisite modülleri (E , GPa) Çizelge 5.13'te gösterilmiştir. Her seriden en az üç numune test edilmiştir.

Çizelge 5. 13 Silindirlerin basınç dayanımı ve elastisite modülü

	Tuğa + Şerbet Silindir	Tuğla + A + Şerbet Silindir	Tuğla + B + Şerbet Silindir
Basınç Dayanımı, f_b, (MPa)	1.6	2.8	1.6
Elastisite Modülü, E (GPa)	1.977	3.719	1.604

Çizelge 5.10 ve 5.13'te görüldüğü gibi tuğla ve şerbetten oluşan ve tuğla, B harcı ve şerbetten oluşan silindirlerin basınç dayanımı (1.6 MPa), enjeksiyon şerbetinin basınç dayanımından (2.0 MPa) düşük çıkmıştır. Bunun aksine tuğla, A harcı ve şerbetten oluşan silindirin basınç dayanımı (2.8 MPa), enjeksiyon şerbetinin basınç dayanımından (2.0 MPa) yüksektir. Enjeksiyon şerbetinin basınç dayanımının genellikle onarılmış elemanın basınç dayanımından düşük olması; daha önce literatürde [4,97] de belirtildiği gibi enjeksiyon şerbetinin basınç dayanımının, onarım sırasında mekanik etkinliği belirlemede kriter olamayacağını göstermektedir.

Ayrıca, Şekil 5.36'da görülebileceği gibi silindirler üzerine uygulanan tek eksenli basınç deneylerinden sonra, çatlakların genellikle tuğla-şerbet ara yüzünde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5. 36 Silindirlerde oluşan çatlaklar (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

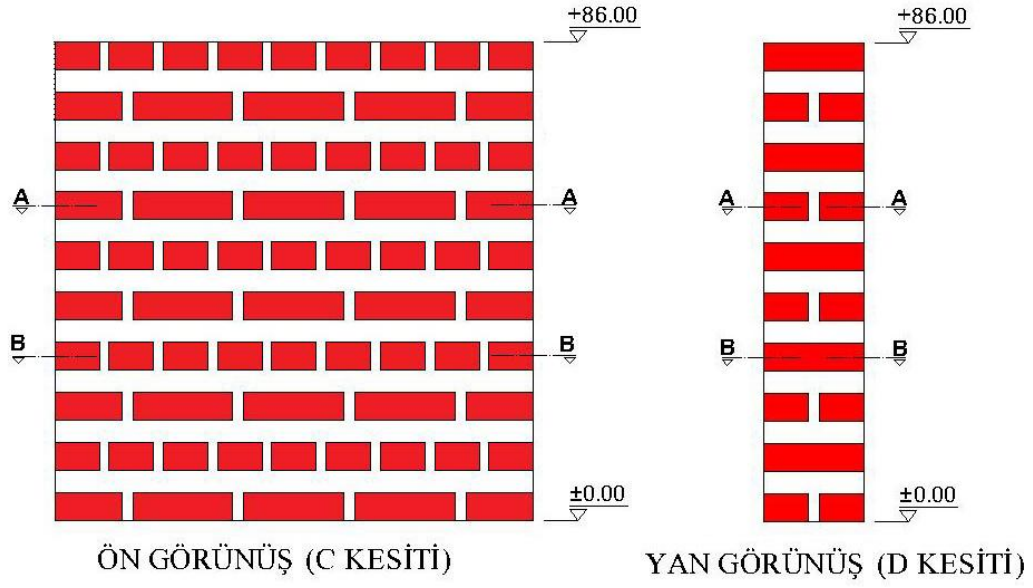
5.6 Model Duvar Deneyleri

Tarihi yapıların onarımında kullanılan enjeksiyon malzemesinin (grout) performansının değerlendirilebilmesi için, bu çalışma kapsamında "İngiliz" örgü biçimiyle örülmüş tek sıra yığma tuğla duvarlar üretilmiştir. Daha sonra düşey yük altında yanal yük verilerek hasara uğratılan duvarlar, ön deneyler ile birlikte mekanik ve enjekte edilebilirlik deneylerini geçen kireç esaslı enjeksiyon şerbeti ile onarılmıştır. Onarılan duvarlar tekrar aynı yüklemeye maruz bırakılarak, duvar dayanımlarındaki değişimin gözlemlenmesi ile enjeksiyon malzemesinin performansı değerlendirilmiştir. Daha sonra çatlak haritaları çıkarılarak ve ultrases deneyi yapılarak, uygulamanın kalitesi tekrar analiz edilmiştir.

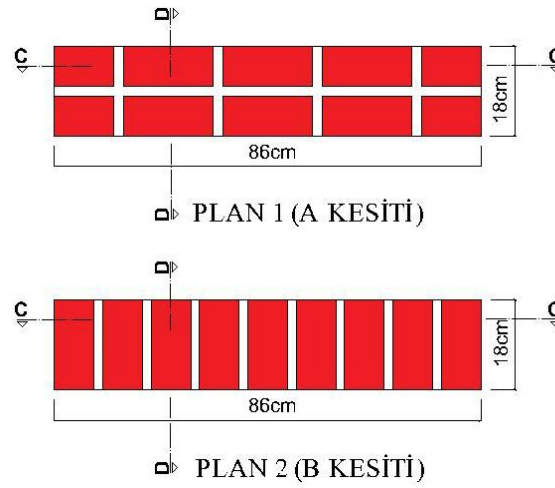
5.6.1 Duvarların Üretilmesi

Bu çalışma kapsamında, özgün malzeme özelliklerine bağlı kalınarak 2 adet kireç esaslı harç (A) ve harman tuğlası ile 2 adet hava kireci esaslı harç (B) ve harman tuğlasından oluşan, toplamda 4 adet 860 x 860 x 180 mm ölçülerinde duvar üretilmiştir.

Tarihi yapıların restorasyon çalışmalarında kullanılmak üzere, bazı 19. yüzyıl fabrikasyon tuğlalarını temsil eden ve [16] üretici firmadan edinilen harman tuğlası boyutları 180 x 50 x 80 mm olduğu için model duvar kalınlığı 180 mm seçilmiştir (Şekil 5.37 ve 5.38).



Şekil 5. 37 Duvar geometrisi, ön görünüş ve yan görünüş



Şekil 5. 38 Duvar geometrisi, planlar (A ve B kesitleri)

Tüm duvarlar İngiliz örgü biçimiyle örülmüş, TÜBİTAK 111M568 no'lu araştırma projesine [60] bağlı kalınarak; harç kalınlıkları yatay derzlerde 40 mm, düşey derzlerde yaklaşık 20 mm alınmıştır [151]. Bu derz kalınlıklarının seçilmesinin bir diğer nedeni de, duvarlardaki harç oranının fazla olması sayesinde enjeksiyon şerbetinin harç ile ilişkisini daha net gözlemleyebilmek ve model duvarın özgün duvara daha benzer bir davranış göstermesini sağlamaktır.

Bu boyutlar ve uzunluk/yükseklik oranının 1/1 olmasını sağlamak üzere 10 sıra tuğla ve 40 mm yatay, yaklaşık 20 mm düşey derz (harç) kalınlığı dikkate alınarak model duvar boyutları 860x860x180 mm olarak seçilmiştir (Şekil 5.37 ve Şekil 5.38).

Duvarların örümü sırasında harman tuğlası ve iki farklı çeşit harç kullanılmıştır. A ve B olarak adlandırılan harçlardan; A, bağlayıcı olarak NHL 3.5 tip hidrolik kireç, B, bağlayıcı olarak CL 80-S tip hava kireci içermektedir. Harçlarda agrega olarak standard CEN silis esaslı dere kumu kullanılmış, kireç agrega oranları 1/3 olarak sabit tutulmuştur. TS EN 1015-02 [152] deki standard akış değerlerine ulaşabilmek için standarda bağlı olarak kıvam tayini testleriyle harç içerisindeki su oranları belirlenmiştir. Buna göre, su/kireç oranları hidrolik kireç ve hava kireci bağlayıcılı harçlar için, sırasıyla 0.7 ve 1.0 olarak seçilmiştir. Harç üretimleri Şekil 5.39'da gösterilmektedir.



Şekil 5. 39 Harç Üretimi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Harç üretiminde kullanılan malzeme miktarları ve kodları Çizelge 5.14'te, mekanik özellikleri Çizelge 5.15'te verilmiştir. A harcı ile üretilen duvarlar için toplamda 72 litre harç üretilmiştir. Harçları karıştırma sırasında kullanılan betoniyerin (Şekil 5.39) hacmi 40 litre olduğu için, harçlar her duvar için 36 litrelik 2 seferde üretilmiştir. B harcı ile üretilen duvarlar için ise harçlar, toplamda 70 litre olmak üzere her duvar için 35 litrelik 2 seferde üretilmiştir. Önce kireç ve kum betoniye dökülüp kuru karışım yapılmıştır. Sonra yavaş yavaş betoniye su eklenmiştir. Karışım yapıldıktan sonra, kenarlarda kalan harçlar mala ile temizlenip el arabasına dökülmüştür (Şekil 5.39).

Çizelge 5. 14 1 litre harç üretiminde kullanılan malzeme miktarları ve kodları

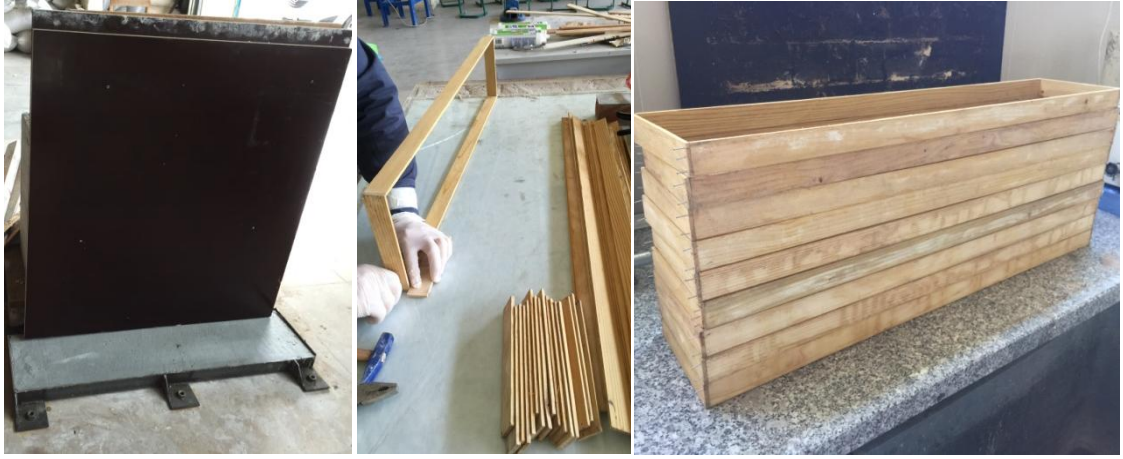
Harç Kodu	Ağırlık (g)			
	Hidrolik Kireç (NHL 3.5)	Hava Kireci (CL 80-S)	CEN Kumu	Su (Kireç %'si)
A	450	-	1350	315 (70)
B	-	450	1350	450 (100)

Çizelge 5. 15 Harman tuğlası ve harçların mekanik özellikleri

	Hidrolik Kireç Esaslı Harç (A) (TS EN 1015-11)	Hava Kireci Esaslı Harç (B) (TS EN 1015-11)	Harman Tuğlası (TS EN 772-1)
Basınç Dayanımı (MPa)	1.5	0.4	9.4
Eğilme Dayanımı (MPa)	0.9	0.5	1.8

Duvar üretimine geçmeden önce, duvarlar için önceden imal ettirilmiş, duvarın taşınmasına ve üretim sırasında gönyede kalmasına yardımcı olacak metal ayaklar ve ahşap panel üretim yapılacak yere yerleştirilmiştir (Şekil 5.40a). Üretilen metal ayakların içlerine duvar üretiminden önce beton dökülmüş ve sertleşmesi için 28 gün beklenmiştir.

Ayrıca, çalışma kapsamında üretilen duvarlarda kullanılacak harç sıraları için duvar üretimi sırasında derz ölçüsünün sabit tutulması ve duvar formunun bozulmaması amacıyla ahşap kalıplar hazırlanmıştır (Şekil 5.40b ve Şekil 5.40c)



(a)

(b)

(c)

Şekil 5. 40 (a) Ahşap panel ve beton dökülmüş metal ayak, (b) Harçlar için kalıp hazırlanması, (c) Harç kalıpları (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Yine duvar üretimine geçmeden önce harman tuğlaları havuza konularak suya doymaları sağlanmıştır. Ardından tuğlalar, üzerlerindeki serbest sudan arındırılmaları için havuzdan çıkarılıp kurumaya bırakılmıştır (Şekil 5.41)



Şekil 5. 41 Tuğlaların duvar üretimi için hazırlanması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

İlk olarak ahşap panel yağlanmış ve harcın panele yapışması engellenmiştir.

Duvar üretiminin ilk aşamasında, beton tabanın üzerine alçı zemin yapıp ilk tuğlalar aralarında yaklaşık 2 cm boşluk bırakılarak yerleştirilmiş ve su terazisi ile dengelenmiştir (Şekil 5.42).



Şekil 5. 42 Alçı hazırlanması ve tuğla eğiminin su terazisi ile ölçülmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Daha sonra tuğlaların arası harç ile doldurulup, harç sırası için hazırlanan kalıp yağlanarak yerine yerleştirilmiştir. Harç kalıba 2 seferde dökülmüş, her seferden sonra tokmaklanmıştır. Ardından tekrar tuğla sırasına geçilmiştir. 10 sıra tuğla duvar üretimi ara verilmeden tamamlanmıştır. Duvarın örülmesi Şekil 5.43'te gösterilmektedir.

Duvarlar İngiliz örgü biçimiyle tek sıra olarak örülmüştür. Buna göre alt kısımdan sayıldığında tek rakamla başlayan sıralarda panele paralel olarak 2 sıra halinde, 6 adet tam tuğla (180 x 80 x 50 mm) orta kısımda, 4 adet yarım tuğla (120 x 80 x 50 mm) baş ve sonlarda kullanılmıştır. Çift rakamla başlayan sıralarda ise tuğlalar panele dik olarak tek sıra halinde 9 adet tam tuğla kullanılarak örülmüştür (Şekil 5.43)



Şekil 5. 43 Duvar örümü (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Duvar üretimi sırasında düşey derzlerin üst üste gelmemesine ve 45° açı yapmamasına özen gösterilmiştir [8]. Ayrıca, üretim sırasında harç kalıpları metal çubuklarla desteklenerek, duvarın formunu kaybetmesi engellenmeye çalışılmıştır.

5.6.2 Duvarların Kür Koşulları

Harçlarda oluşabilecek hacim değişimini ve rötre çatlaklarını engellemek [1] için ve TS EN 1015-11 [66] standardına göre harçların üretimlerinden sonra 5 gün yüksek bağıl nemde ($95 \pm 5\%$) tutulması gerektiğinden, kür koşullarını temsil etmek için, laboratuvar ortamında bekleyen duvarların üzerleri nemli örtü ile örtülmüş, 5 gün boyunca örtünün nemli kalması sağlanmıştır (Şekil 5.44).



Şekil 5. 44 Duvarın nemli örtü ile örtülmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015).

Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Duvarlar priz aldıktan sonra, duvarların yükleme yapılacak alanını düzleştirmek ve yükün eşit dağılmasını sağlamak amacıyla 15 cm kadar kenarları ve üstü alçı ile sıvanmıştır (Şekil 5.45a ve Şekil 5.45b).

Aynı dönemde Şekil 5.45c'de görüleceği gibi harç kalıpları da sökülüştür.



(a)

(b)

(c)

Şekil 5. 45 (a) Duvarın alçı ile sıvanması, (b) duvarın su terazisi ile ölçülmesi, (c) Harç kalıplarının sökülmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

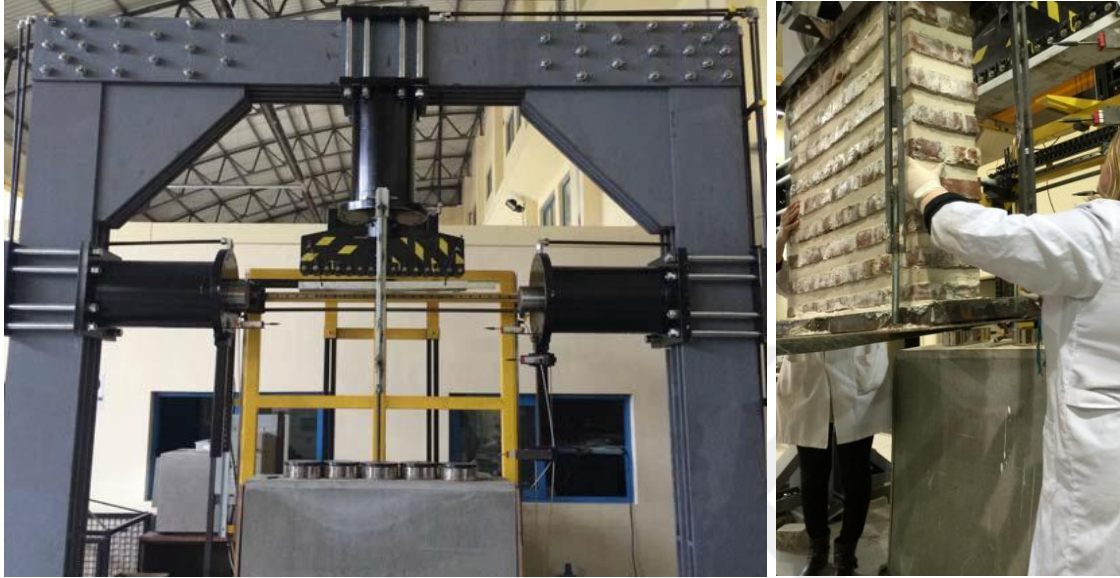
2 adet hidrolik kireç esaslı harç, 2 adet de hava kireci esaslı harçla üretilen 4 adet duvar, üretimleri tamamlandıktan sonra 28 gün laboratuvar koşullarında bekletilmiştir (Şekil 5.46).



Şekil 5. 46 Laboratuvar ortamında bekleyen duvarlar (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

5.6.3 Model Duvarlardaki Yatay ve Düşey Yük Altında Yer Değiştirmenin Belirlenmesi

Duvarlar, üretimlerinden 28 gün sonra vinç ve fork-lift yardımıyla kaldırılarak deney düzeneğine yerleştirilmiştir (Şekil 5.47).

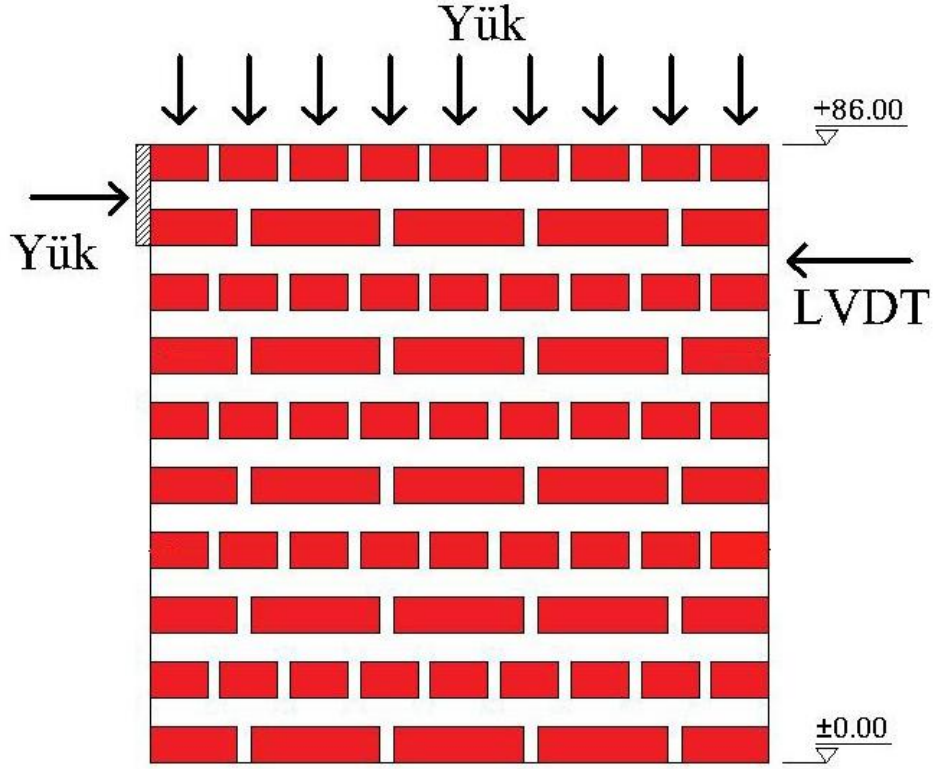


Şekil 5. 47 Deney düzeneği ve duvarın düzeneğe yerleştirilmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Üretimlerinden 28 gün sonra sisteme yerleştirilen model duvarlar, 200 ton kapasiteli düşey hidrolik silindir ile uygulanan sabit düşey yük altında 5 kN kademeli olarak artırılan yatay yüke maruz bırakılmıştır. Yükleme hızı $0.5 \pm 0.1 \text{ kN/s}$ olarak alınmıştır. Düşey yük yapı yükünü, yanal yük ise deprem yükünü temsil etmektedir.

Çizelge 5.15'te gösterildiği gibi harçların basınç dayanımları farklı olduğu için, hidrolik kireç esaslı harç ile örülen duvarlar için uygulanan düşey yük 0.73 MPa gerilme olacak şekilde 110kN olarak sabit tutulmuş, hava kireci esaslı harç ile örülen duvarlar için ise düşey yük 0.36 MPa gerilme olacak şekilde 55kN olarak sabit tutulmuştur. Uygulanan yük değerleri için 111M568'nolu TÜBİTAK projesi [60] kapsamında yerinde yapılan çalışmalar dikkate alınmıştır.

Her yük değerine karşı gelen yer değiştirme değerleri Şekil 5.48'de gösterildiği gibi yatay yük doğrultusuna paralel olacak şekilde yerleştirilen LVDT yardımıyla ölçülmüştür.



Şekil 5. 48 Yük ve LVDT yerleşimleri

Model duvarların yatay yük taşıma kapasitelerini ifade eden yük-yer değiştirme eğrileri her iki duvar tipi için de [hidrolik kireç esaslı harç içeren duvarlar (A-1 ve A-2) ve hava kireci esaslı harç içeren duvarlar (B-1 ve B-2)] oluşturulmuştur.

Duvarlar sonradan onarılacağı için kırılıncaya kadar yükleme yapılmamıştır. Duvarlar üzerinde oluşan diyagonal çatlakın genişliği 0.2-0.4 mm'yi aşana kadar yatay yük verilmeye devam edilmiştir. Tasarımı yapılan enjeksiyon malzemeleri minimum 0.2-0.4 mm çatlaklardan penetre olabildiği için, enjeksiyon uygulaması ile onarılacak duvarlardaki çatlak genişliklerinin bu aralıkta olması sağlanmıştır. Yeterli çatlak genişliğine ulaşıldığında duvar üzerinde yük kaldırılmış ve duvarlar enjeksiyon uygulaması için depolanmıştır.



Şekil 5. 49 Duvar yüklemesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

A-1 Duvarına Düşey Yük Altında Yanal Yük Verilmesi

- Hidrolik kireç esaslı harç ve harman tuğlasıyla üretilen A-1 duvarına ilk önce 0.73 MPa gerilme olacak şekilde (gerilme=yük/alan), 110kN düşey yük verilmiştir.
- Daha sonra 5kN kademeli olarak arttırılan yanal yük verilmiştir.
- Yükleme hızı $0.5 \pm 0.1 \text{ kN/s}$ olarak sabit tutulmuştur.
- İlk 45° lik diyagonal çatlak 33kN'da oluşmuştur.
- Minimum çatlak genişliği 0.2-0.4 mm aralığına ulaşana kadar yüklemeye devam edilmiştir.
- 35 kN'da yükleme durdurulmuştur.

A-1 duvarının yükleme öncesi ve yükleme sonrası çatlak oluşumu Şekil 5.50'de gösterilmiştir.

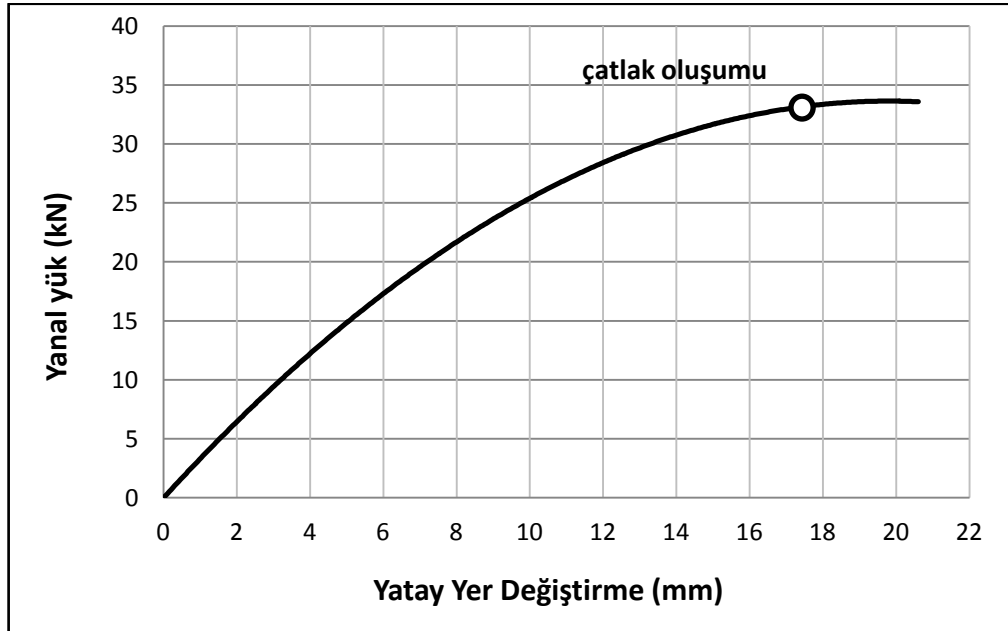


(a)

(b)

Şekil 5. 50 (a) Yükleme öncesi A-1 duvarı, (b) Yükleme sonrası A-1 duvarı (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Hidrolik kireç esaslı harç ve harman tuğlası ile üretilen A-1 duvarının ilk yükleme sonrası yanal yük - yatay yer değiştirme grafiği Şekil 5.51'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 51 A-1 duvarı yanal yük - yatay yer değiştirme grafiği

A-2 Duvarına Düşey Yük Altında Yanal Yük Verilmesi

- Hidrolik kireç esaslı harç ve harman tuğlasıyla üretilen A-2 duvarına ilk önce 0.73 MPa gerilme olacak şekilde (gerilme=yük/alan), 110kN düşey yük verilmiştir.
- Daha sonra 5kN kademeli olarak arttırılan yanal yük verilmiştir.
- Yükleme hızı $0.5 \pm 0.1 \text{ kN/s}$ olarak sabit tutulmuştur.
- İlk 45° lik diyagonal çatlak 45kN'da oluşmuştur.
- Minimum çatlak genişliği 0.2-0.4 mm aralığına ulaşana kadar yüklemeye devam edilmiştir.
- 55 kN'da yükleme durdurulmuştur.

A-2 duvarının yükleme öncesi ve yükleme sonrası çatlak oluşumu Şekil 5.52'de gösterilmiştir.

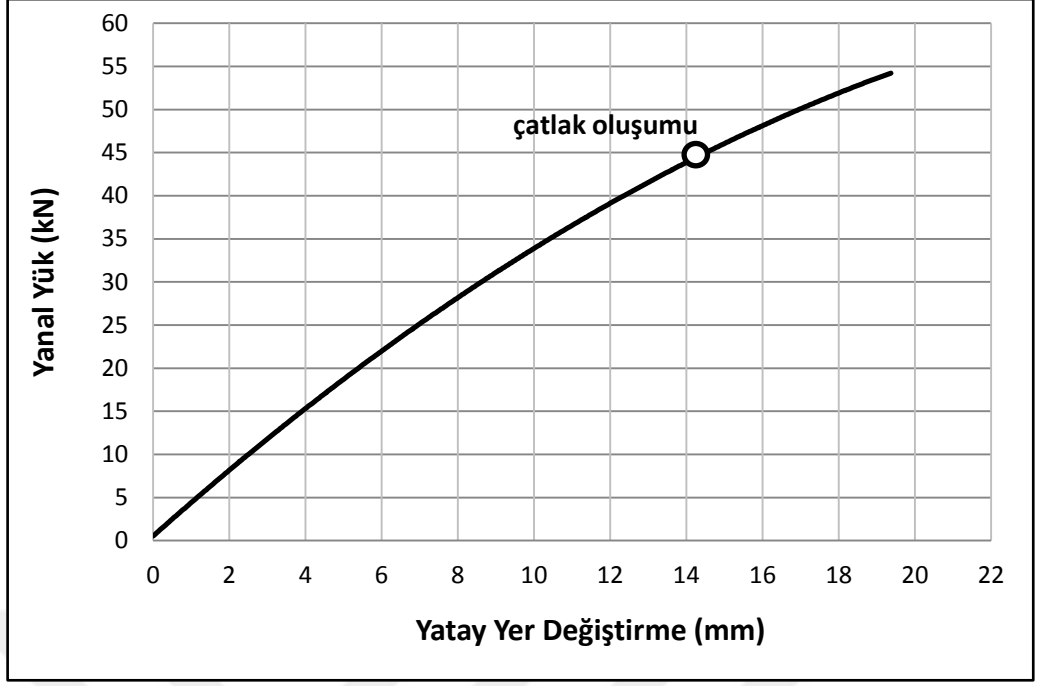


(a)

(b)

Şekil 5. 52 (a) Yükleme öncesi A-2 duvarı, (b) Yükleme sonrası A-2 duvarı (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Hidrolik kireç esaslı harç ve harman tuğlası ile üretilen A-1 duvarının ilk yükleme sonrası yanal yük - yatay yer değiştirme grafiği Şekil 5.53'te gösterilmiştir.

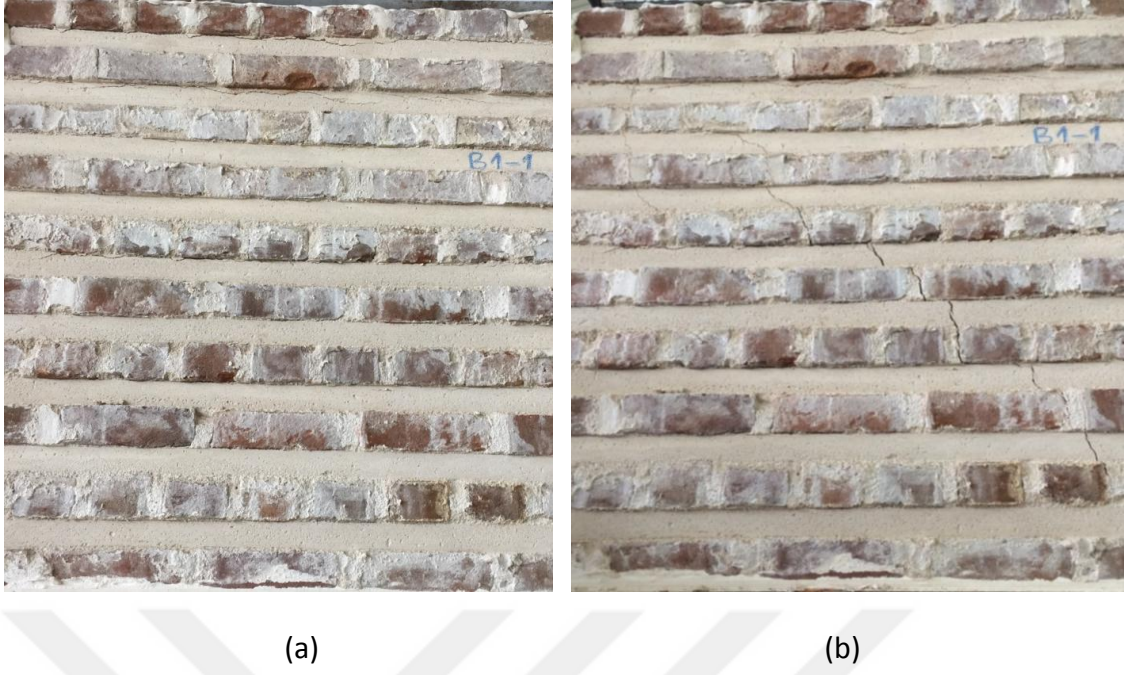


Şekil 5. 53 A-2 duvarı yanal yük - yatay yer değiştirme grafiği

B-1 Duvarına Düşey Yük Altında Yanal Yük Verilmesi

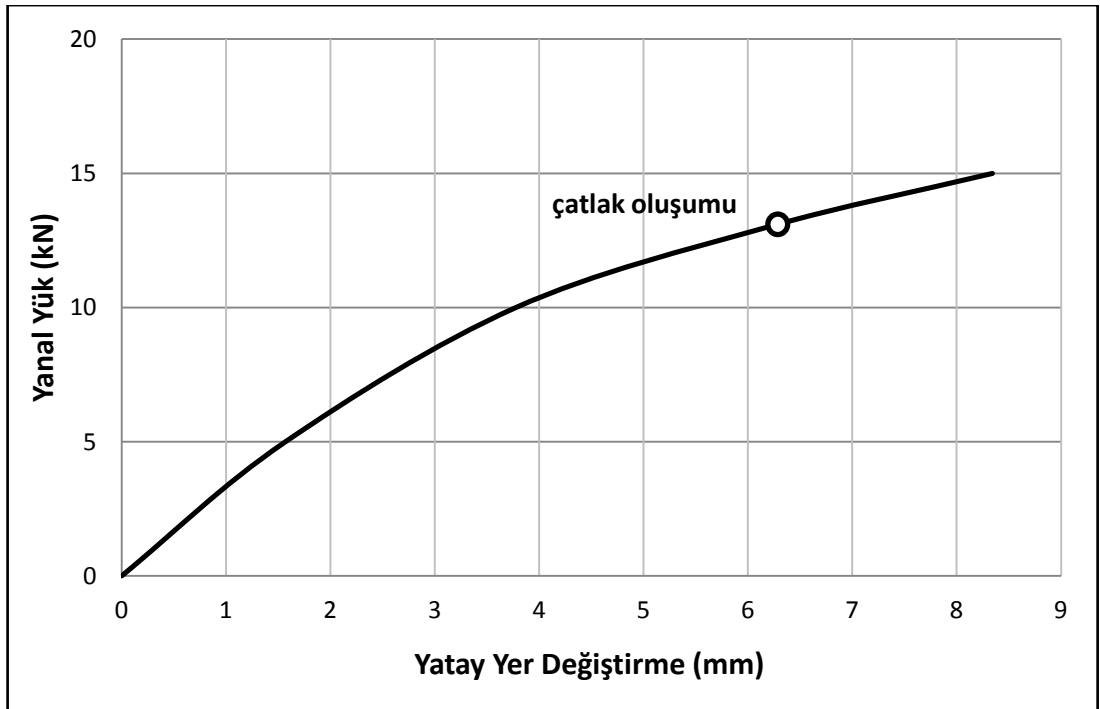
- Hava kireci esaslı harç ve harman tuğlasıyla üretilen B-1 duvarına ilk önce 0.36 MPa gerilme olacak şekilde (gerilme=yük/alan), 55kN düşey yük verilmiştir.
- Daha sonra 5kN kademeli olarak arttırılan yanal yük verilmiştir.
- Yükleme hızı $0.5 \pm 0.1 \text{ kN/s}$ olarak sabit tutulmuştur.
- İlk 45° lik diyagonal çatlak 13kN'da oluşmuştur.
- Minimum çatlak genişliği 0.2-0.4 mm aralığına ulaşana kadar yüklemeye devam edilmiştir.
- 15 kN'da yükleme durdurulmuştur.

B-1 duvarının yükleme öncesi ve yükleme sonrası çatlak oluşumu Şekil 5.54'te gösterilmiştir.



Şekil 5. 54 (a) Yükleme öncesi B-1 duvarı, (b) Yükleme sonrası B-1 duvarı (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Hava kireci esaslı harç ve harman tuğlası ile üretilen B-1 duvarının ilk yükleme sonrası yanal yük - yatay yer değiştirme grafiği Şekil 5.55'te gösterilmiştir.

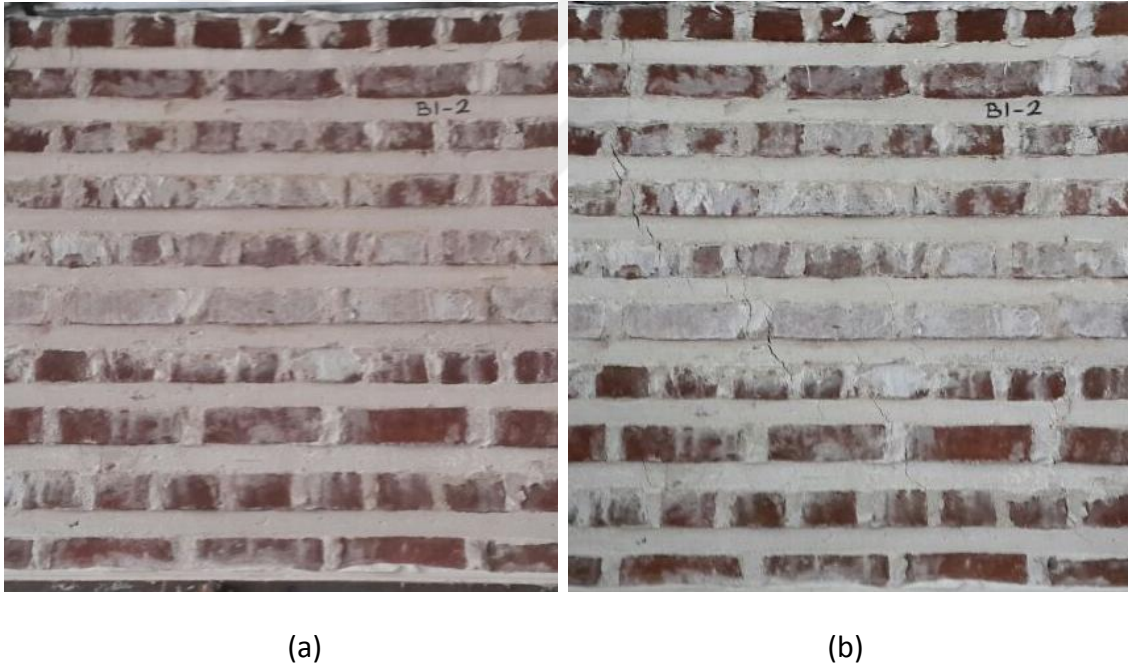


Şekil 5. 55 B-1 duvarı yanal yük - yatay yer değiştirme grafiği

B-2 Duvarına Düşey Yük Altında Yanal Yük Verilmesi

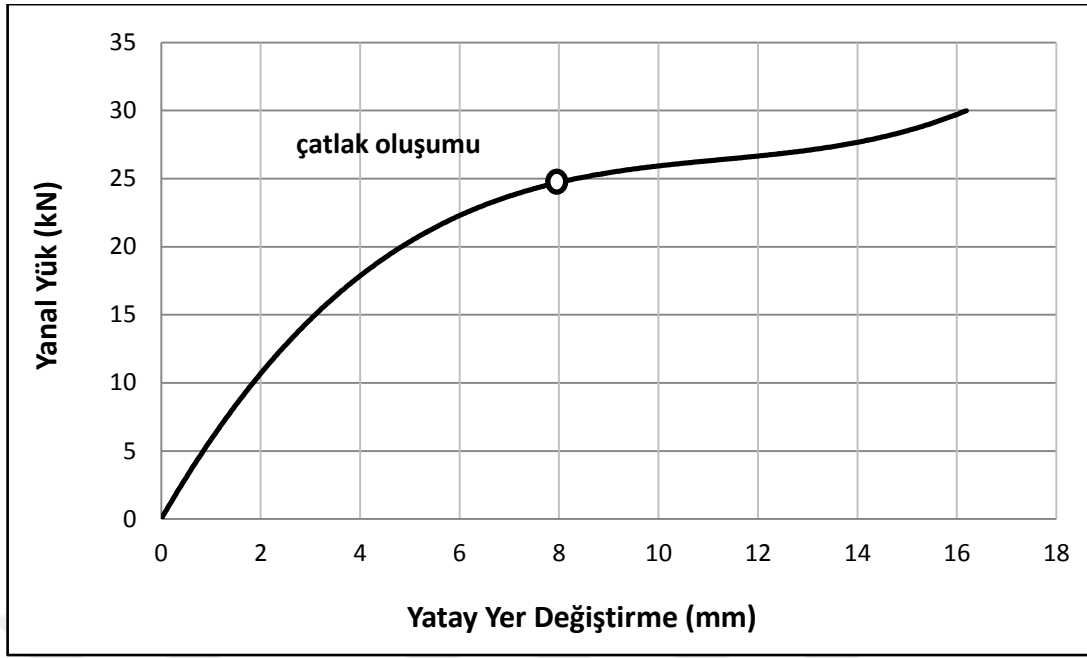
- Hava kireci esaslı harç ve harman tuğlasıyla üretilen B-2 duvarına ilk önce 0.36 MPa gerilme olacak şekilde (gerilme=yük/alan), 55kN düşey yük verilmiştir.
- Daha sonra 5kN kademeli olarak arttırılan yanal yük verilmiştir.
- Yükleme hızı $0.5 \pm 0.1 \text{ kN/s}$ olarak sabit tutulmuştur.
- İlk 45° lik diyagonal çatlak 25kN'da oluşmuştur.
- Minimum çatlak genişliği 0.2-0.4 mm aralığına ulaşana kadar yüklemeye devam edilmiştir.
- 30 kN'da yükleme durdurulmuştur.

B-2 duvarının yükleme öncesi ve yükleme sonrası çatlak oluşumu Şekil 5.56'da gösterilmiştir.



Şekil 5. 56 (a) Yükleme öncesi B-2 duvarı, (b) Yükleme sonrası B-2 duvarı (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Hava kireci esaslı harç ve harman tuğlası ile üretilen B-2 duvarının ilk yükleme sonrası yanal yük - yatay yer değiştirme grafiği Şekil 5.57'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 57 B-2 duvarı yanal yük - yatay yer değiştirme grafiği

5.6.4 Enjeksiyon Uygulaması

Hasar oluşturulan dört adet yığma duvarda (A-1, A-2, B-1, B-2) yapılan enjeksiyon uygulaması belirli bir standard olmadığı için literatür verilerine bağlı kalınarak gerçekleştirilmiştir. Ön koşulları bu çalışma kapsamında tasarlanmış olan karıştırma prosedürü ile sağlanabilen hazır enjeksiyon malzemesinin (G2) performansının değerlendirilmesi amacıyla tek sıra tuğladan oluşan duvarlar bu malzeme ile onarılmıştır.

Uygulama öncesi yapılan hazırlıklarda ilk olarak duvar üzerinde matkapla 45° açılı enjeksiyon delikleri açılmıştır. Duvarın tek bir yüzünde açılan bu delikler, çatlak dağılımlarına bağlı olarak 4-5 cm aralıklar ile oluşturulmuştur (Şekil 5.58).

Şerbet enjeksiyonunun ikinci adımında delikler ve çatlaklar içerisinde bulunan toz malzemenin temizlenmesi için kompresör ile 1 bar hava basılmıştır. Şekil 5.59'da görüldüğü gibi toz malzemenin temizlenmesi işlemi tüm duvarlarda enjeksiyon delikleri ve çatlaklar boyunca devam etmiştir.

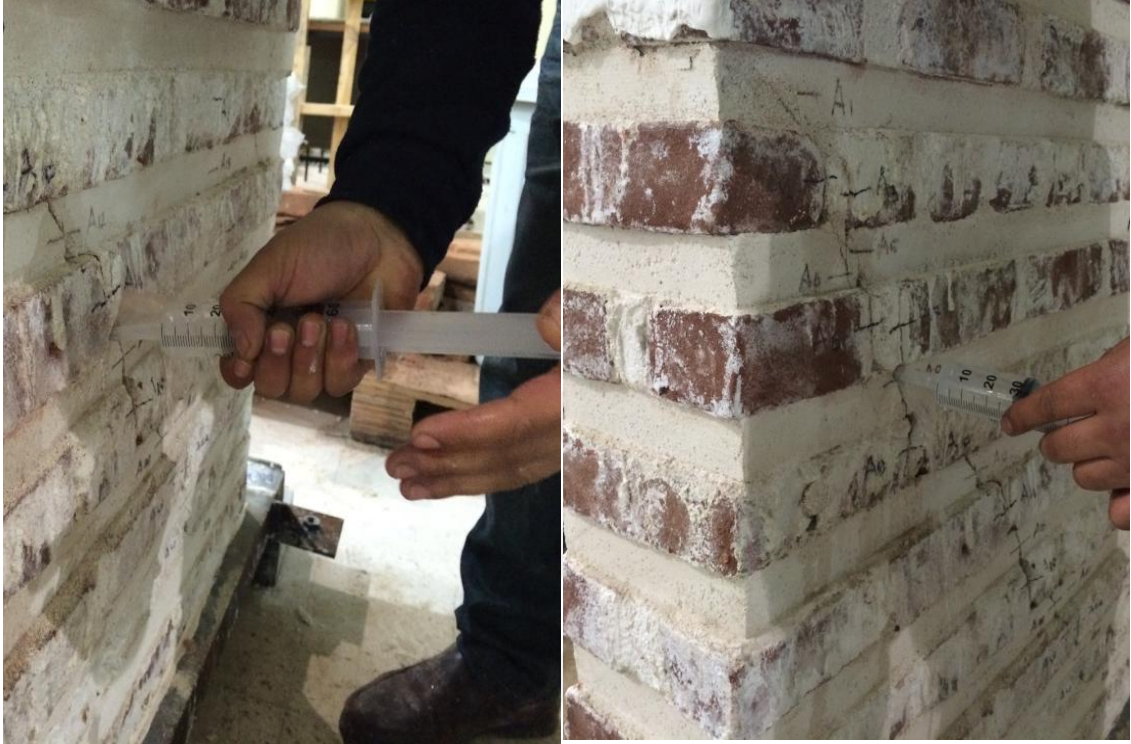


Şekil 5. 58 Enjeksiyon deliklerinin açılması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)



Şekil 5. 59 Kompresör ile boşluklara ve çatlaklara hava basılması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Enjeksiyon öncesi son adım olarak çatlaklara ve boşluklara şırınga ile su enjekte edilmiştir (Şekil 5.60). Böylece, tuğla ve harcın, enjeksiyon şerbeti içerisindeki suyu emmesi engellenmeye çalışılmaktadır. Uygulama yapılacak yüzeydeki malzemenin su emme oranına bağlı olarak, enjeksiyon öncesi duvar mutlaka ıslatılmalıdır.



Şekil 5. 60 Boşlukların ve çatlakların ıslatılması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015.
Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Şerbet enjeksiyonu, açılan deliklere yerleştirilen plastik tüpler yardımı ile yapılmıştır (Şekil 5.61)

Uygulanan yüksek basıncın daha iyi penetrasyon sağladığı ancak strüktüre zarar verme riski taşıdığı bilinmektedir. Bu nedenle literatür verileri de referans alınarak [5] uygulanan basınç enjeksiyon boyunca yaklaşık 1 bar değerinde sabit tutulmuştur.

Enjeksiyon şerbetinin düzgün yayılmasını sağlamak ve diğer deliklerin enjeksiyon sırasında kapanmasını engellemek için, enjeksiyon işlemine duvarın en alt ucunda bulunan delikten başlanmıştır (Şekil 5.61)

Uygulama boyunca çatlaklardan sızıntı olmasını engellemek amacıyla, boşluklar, koruma uzmanının¹ önerileri doğrultusunda daha sonra temizlenmek üzere cam macunu ile kapatılmıştır (Şekil 5.61)



Şekil 5. 61 Şerbet enjeksiyonu ile duvarın onarılması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)



Şekil 5. 62 Enjeksiyon şerbetinin uygulama noktasının üzerindeki delikten çıkışı (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

¹ Yrd. Doç. Dr. Mehmet Fevzi Uğuryol, Yıldız Teknik Üniversitesi, Milli Saraylar ve Tarihi Yapılar Meslek Yüksek Okulu, Mimari Restorasyon Bölümü

Ayrıca, enjeksiyon şerbetinin çırpılması durdurulduğunda akışkanlık özelliği azaldığı için enjeksiyona ara verilmeden, aynı anda enjeksiyon şerbeti birkaç seferde üretilerek ve her seferinde akışkanlık özelliği test edilerek enjeksiyon tamamlanmıştır.

Uygulama boyunca malzemenin etkili bir şekilde penetre olduğu ve uygulama yapılan noktanın üzerinde bulunan noktalardan dışarı çıktığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.62). Bu nedenle, model duvarlarda oluşan çatlak ve boşlukların enjeksiyon malzemesi ile büyük ölçüde doldurulduğu söylenebilir.

Son olarak enjeksiyonun son bir kontrolü yapılmış ve kılcal çatlaklara enjeksiyon şırıngası ile şerbet enjekte edilerek rötuş yapılmıştır (Şekil 5.63).



Şekil 5. 63 Enjeksiyon şırıngası ile rötuş yapılması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015.
Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Enjeksiyondan 1 hafta sonra cam macunları temizlenmiş ve onarılan yığma duvarlar, enjeksiyon şerbetinin 28. gününde tekrar yükleme yapılmak üzere laboratuvar koşullarında depolanmıştır (Şekil 5.64)



Şekil 5. 64 Laboratuvar koşullarında depolanan, onarılmış duvarlar (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

5.6.5 Onarılan Model Duvarlardaki Yatay ve Düşey Yük Altında Yer Değiştirmenin Belirlenmesi

Enjeksiyon uygulamasının 28. gününde, model duvarların onarılmasından önceki yükleme koşulları ile aynı olacak şekilde, model duvarlarda sabit düşey yük altında kademeli olarak yatay yük uygulaması yapılmıştır.

İlk olarak, laboratora ortamında depolanan duvarlar vinç ve fork-lift yardımıyla deney düzeneğine yerleştirilmiştir (Şekil 5.65).



Şekil 5. 65 Duvarların deney düzeneğine yerleştirilmesi (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

İlk yüklemede olduğu gibi; sisteme yerleştirilen model duvarlar, 200 ton kapasiteli düşey hidrolik jack ile uygulanan sabit düşey yük altında 5 kN kademeli olarak artırılan yatay yüke maruz bırakılmıştır; hidrolik kireç esaslı harç ile örülen duvarlar için uygulanan düşey yük 110kN olarak sabit tutulmuş, hava kireci esaslı harç ile örülen duvarlar için ise düşey yük 55kN olarak sabit tutulmuştur.

Her yük değerine karşı gelen yer değiştirme değerleri Şekil 5.48’de gösterildiği gibi yatay yük doğrultusuna paralel olacak şekilde yerleştirilen LVDT yardımıyla ölçülmüştür.

Model duvarların yatay yük taşıma kapasitelerini ifade eden yük-yer değiştirme eğrileri her iki duvar tipi için de, [hidrolik kireç esaslı harç içeren duvarlar (A-1 ve A-2) ve hava kireci esaslı harç içeren duvarlar (B-1 ve B-2)] oluşturulmuştur.

Yeterli çatlak genişliğine ulaşıldığında (duvarlar üzerinde oluşan diyagonal çatlağın genişliği 0.2-0.4 mm'yi aştığında) duvar üzerindeki yük kaldırılmıştır

Onarım Sonrası A-1 Duvarına Düşey Yük Altında Yanal Yük Verilmesi

- Hidrolik kireç esaslı harç ve harman tuğlasıyla üretilen A-1 duvarına ilk önce 0.73 MPa gerilme olacak şekilde (gerilme=yük/alan), 110kN düşey yük verilmiştir.
- Daha sonra 5kN kademeli olarak arttırılan yanal yük verilmiştir.
- Yükleme hızı $0.5 \pm 0.1 \text{ kN/s}$ olarak sabit tutulmuştur.
- İlk 45° lik diyagonal çatlak 65 kN'da oluşmuştur.
- Minimum çatlak genişliği 0.2-0.4 mm aralığına ulaşana kadar yüklemeye devam edilmiştir.
- 72 kN'da yükleme durdurulmuştur.

Onarılmış A-1 duvarının onarım öncesi ve onarım sonrası yükleme sırasındaki çatlak oluşumu Şekil 5.66'da gösterilmiştir.



(a)

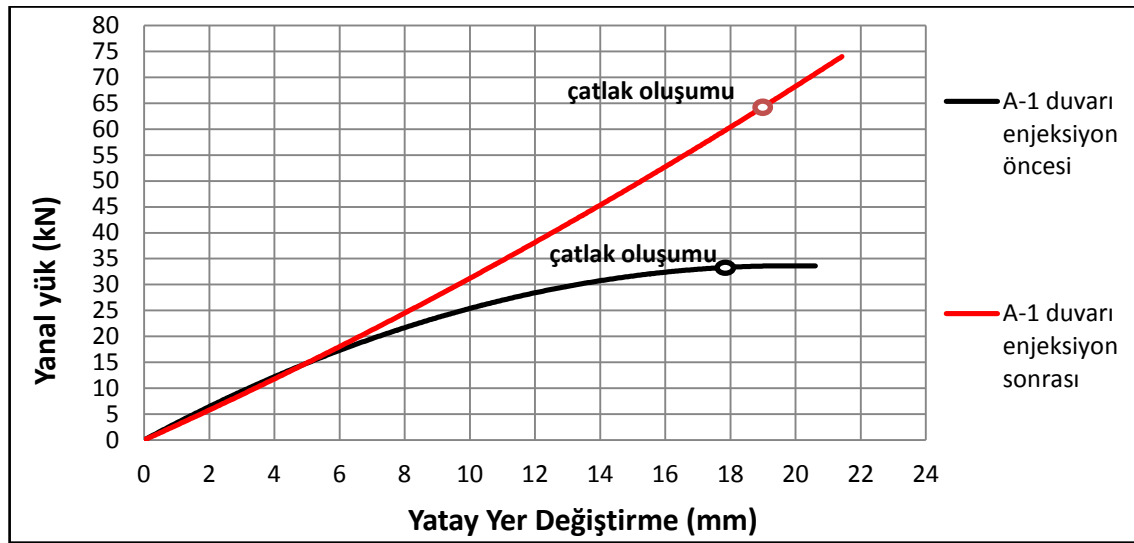
(b)

Şekil 5. 66 (a) Onarım öncesi A-1 duvarı yüklemesi sonucu oluşan çatlaklar, (b) Onarım sonrası A-1 duvarı yüklemesi sonucu oluşan çatlaklar (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Hidrolik kireç esaslı harç ve harman tuğlası ile üretilen A-1 duvarının onarım öncesi ve onarım sonrası yanal yük - yatay yer değiştirme grafiği Şekil 5.67'de gösterilmiştir.

Hidrolik kireç esaslı A harcı ve harman tuğlası ile üretilen A-1 duvarın onarım öncesi davranışı incelendiğinde, 45°'lik açı ile oluşan diyagonal çatlakın ilk oluştuğu andaki yük değerinin 33 kN olduğu ve yüklemenin 35 kN'a kadar devam ettiği, onarım sonrasında yapılan yükleme deneyinde ise ilk çatlakın oluştuğu yük değerinin 65 kN olduğu ve deneyin 72 kN'da sonlandırıldığı görülmektedir.

İlk çatlak oluştuğu andaki yük değerleri dikkate alınırsa, hidrolik kireç esaslı A-1 duvarına uygulanan yatay yük değerleri %97 oranında artmıştır.

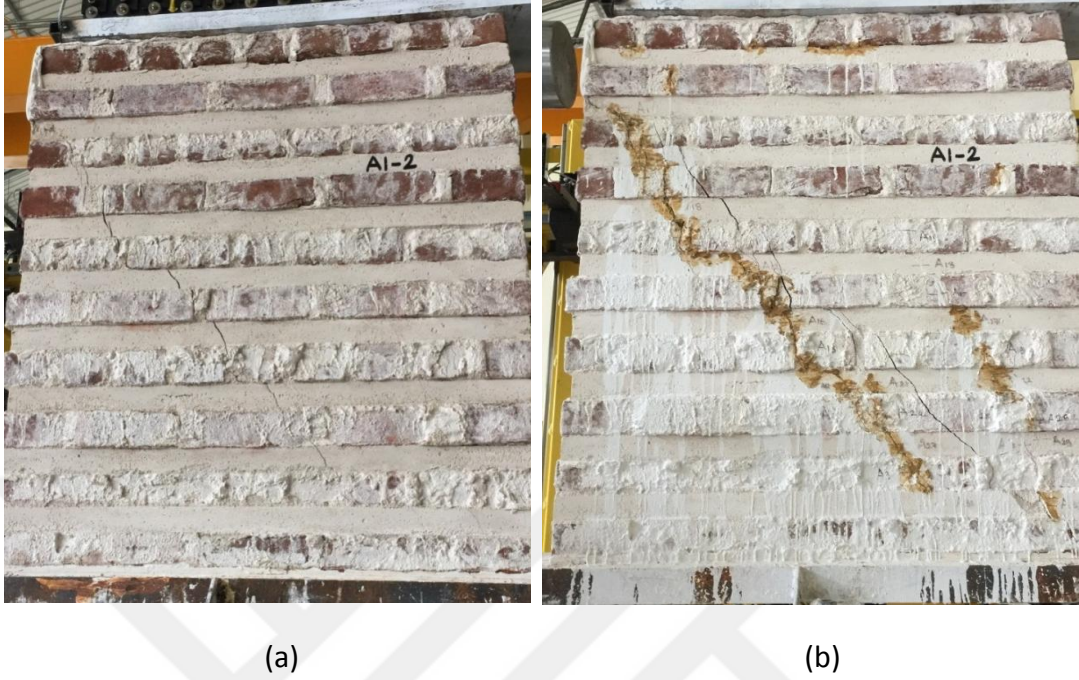


Şekil 5. 67 A-1 duvarına ait yanal yük-yatay yer değiştirme eğrileri

Onarım Sonrası A-2 Duvarına Düşey Yük Altında Yanal Yük Verilmesi

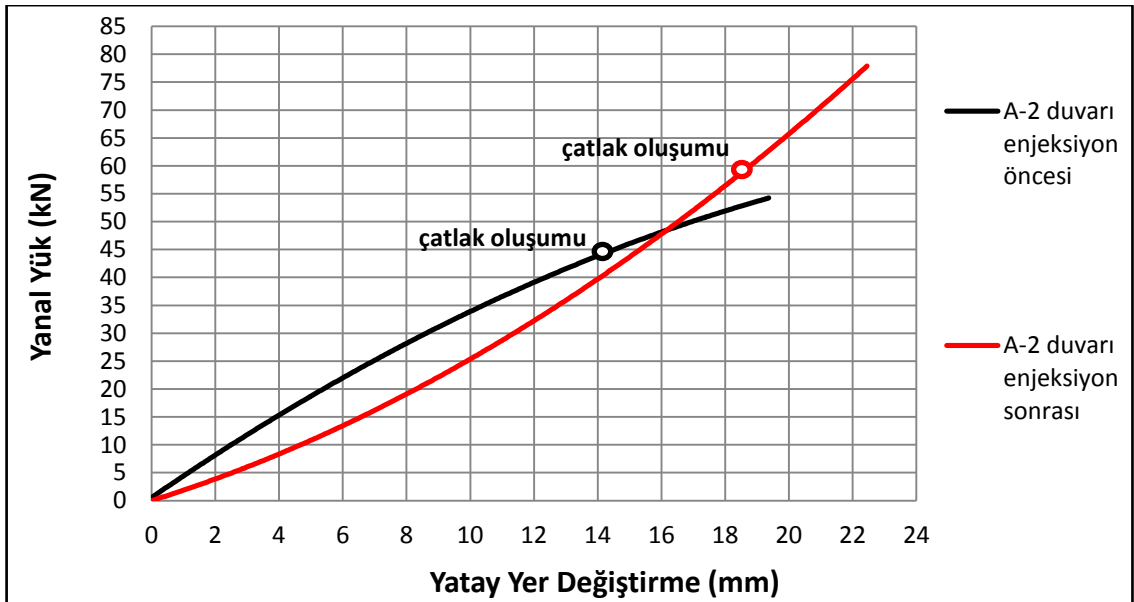
- Hidrolik kireç esaslı harç ve harman tuğlasıyla üretilen A-2 duvarına ilk önce 0.73 MPa gerilme olacak şekilde (gerilme=yük/alan), 110kN düşey yük verilmiştir.
- Daha sonra 5kN kademeli olarak arttırılan yanal yük verilmiştir.
- Yükleme hızı 0.5 ± 0.1 kN/s olarak sabit tutulmuştur.
- İlk 45° lik diyagonal çatlak 60 kN'da oluşmuştur.
- Minimum çatlak genişliği 0.2-0.4 mm aralığına ulaşana kadar yüklemeye devam edilmiştir.
- 77 kN'da yükleme durdurulmuştur.

Onarılmış A-2 duvarının onarım öncesi ve onarım sonrası yükleme sırasındaki çatlak oluşumu Şekil 5.68'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 68 (a) Onarım öncesi A-2 duvarı yüklemesi sonucu oluşan çatlaklar, (b) Onarım sonrası A-2 duvarı yüklemesi sonucu oluşan çatlaklar (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Hidrolik kireç esaslı harç ve harman tuğlası ile üretilen A-1 duvarının onarım öncesi ve onarım sonrası yanal yük - yatay yer değiştirme grafiği Şekil 5.69'da gösterilmiştir.



Şekil 5. 69 A-2 duvarına ait yanal yük-yatay yer değiştirme eğrileri

Hidrolik kireç esaslı A harcı ve harman tuğlası ile üretilen A-2 duvarın onarım öncesi davranışı incelendiğinde, 45°'lik açı ile oluşan diyagonal çatlakların ilk oluştuğu andaki yük değerinin 45 kN olduğu ve yüklemenin 55 kN'a kadar devam ettiği, onarım sonrasında yapılan yükleme deneyinde ise ilk çatlakların oluştuğu yük değerinin 60 kN olduğu ve deneyin 75 kN'da sonlandırıldığı görülmektedir. İlk çatlak oluştuğu andaki yük değerleri dikkate alınırsa, hidrolik kireç esaslı A-2 duvarına uygulanan yatay yük değerleri %33 oranında artmıştır.

Onarım Sonrası B-1 Duvarına Düşey Yük Altında Yanal Yük Verilmesi

- Hava kireci esaslı harç ve harman tuğlasıyla üretilen B-1 duvarına ilk önce 0.36 MPa gerilme olacak şekilde (gerilme=yük/alan), 55kN düşey yük verilmiştir.
- Daha sonra 5kN kademeli olarak arttırılan yanal yük verilmiştir.
- Yükleme hızı $0.5 \pm 0.1 \text{ kN/s}$ olarak sabit tutulmuştur.
- İlk 45° lik diyagonal çatlak 20 kN'da oluşmuştur.
- Minimum çatlak genişliği 0.2-0.4 mm aralığına ulaşana kadar yüklemeye devam edilmiştir. 30 kN'da yükleme durdurulmuştur.



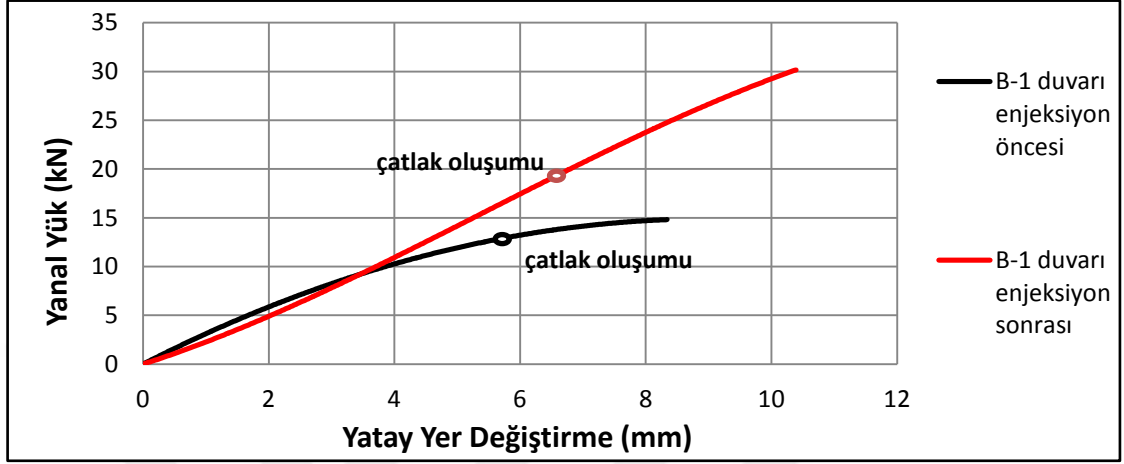
(a)

(b)

Şekil 5. 70 (a) Onarım öncesi B-1 duvarı yüklemesi sonucu oluşan çatlaklar, (b) Onarım sonrası B-1 duvarı yüklemesi sonucu oluşan çatlaklar (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Onarılmış B-1 duvarının onarım öncesi ve onarım sonrası yükleme sırasındaki çatlak oluşumu Şekil 5.70'de gösterilmiştir.

Hava kireci esaslı harç ve harman tuğlası ile üretilen B-1 duvarının onarım öncesi ve onarım sonrası yanal yük - yatay yer değiştirme grafiği Şekil 5.71'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 71 B-1 duvarına ait yanal yük-yatay yer değiştirme eğrileri

Hava kireci esaslı B harcı ve harman tuğlası ile üretilen B-1 duvarın onarım öncesi davranışı incelendiğinde, 45°'lik açı ile oluşan diyagonal çatlakın ilk oluştuğu andaki yük değerinin 13 kN olduğu ve yüklemenin 15 kN'a kadar devam ettiği, onarım sonrasında yapılan yükleme deneyinde ise ilk çatlakın oluştuğu yük değerinin 20 kN olduğu ve deneyin 30 kN'da sonlandırıldığı görülmektedir.

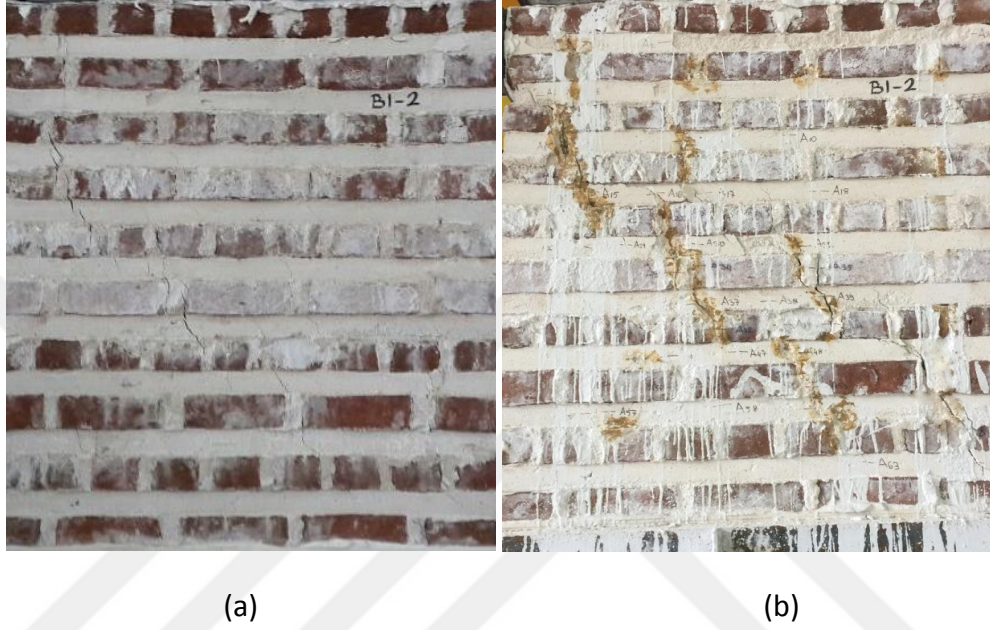
İlk çatlak oluştuğu andaki yük değerleri dikkate alınırsa, hava kireci esaslı B-1 duvarına uygulanan yatay yük değerleri %54 oranında artmıştır.

Onarım Sonrası B-2 Duvarına Düşey Yük Altında Yanal Yük Verilmesi

- Hava kireci esaslı harç ve harman tuğlasıyla üretilen B-2 duvarına ilk önce 0.36 MPa gerilme olacak şekilde (gerilme=yük/alan), 55kN düşey yük verilmiştir.
- Daha sonra 5kN kademeli olarak arttırılan yanal yük verilmiştir.
- Yükleme hızı 0.5 ± 0.1 kN/s olarak sabit tutulmuştur.
- İlk 45° lik diyagonal çatlak 45 kN'da oluşmuştur.

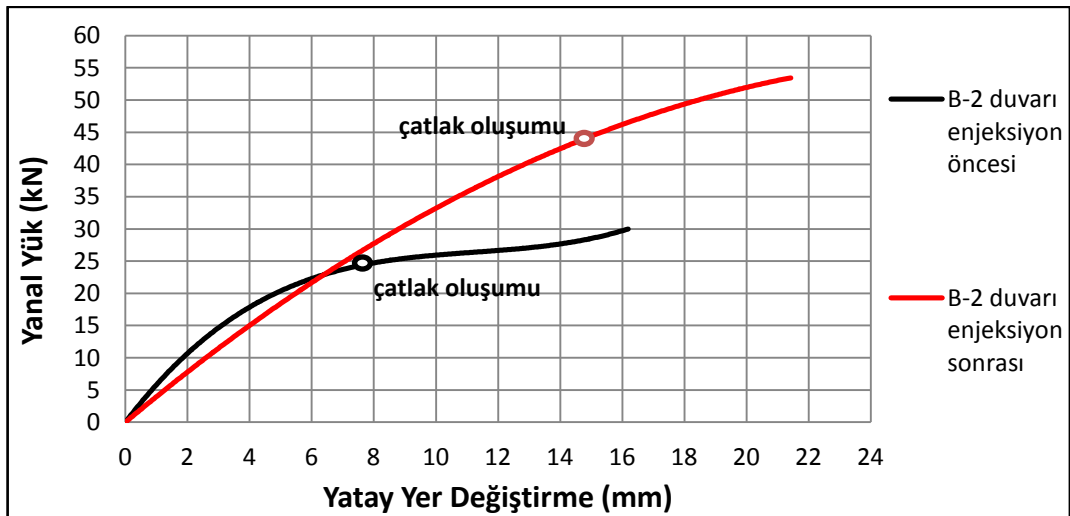
- Minimum çatlak genişliği 0.2-0.4 mm aralığına ulaşana kadar yüklemeye devam edilmiştir.
- 55 kN'da yükleme durdurulmuştur.

Onarılmış B-2 duvarının onarım öncesi ve onarım sonrası yükleme sırasındaki çatlak oluşumu Şekil 5.72'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 72 (a) Onarım öncesi B-2 duvarı yüklemesi sonucu oluşan çatlaklar, (b) Onarım sonrası B-2 duvarı yüklemesi sonucu oluşan çatlaklar (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Hava kireci esaslı harç ve harman tuğlası ile üretilen B-2 duvarının onarım öncesi ve onarım sonrası yanal yük - yatay yer değiştirme grafiği Şekil 5.73'te gösterilmiştir.



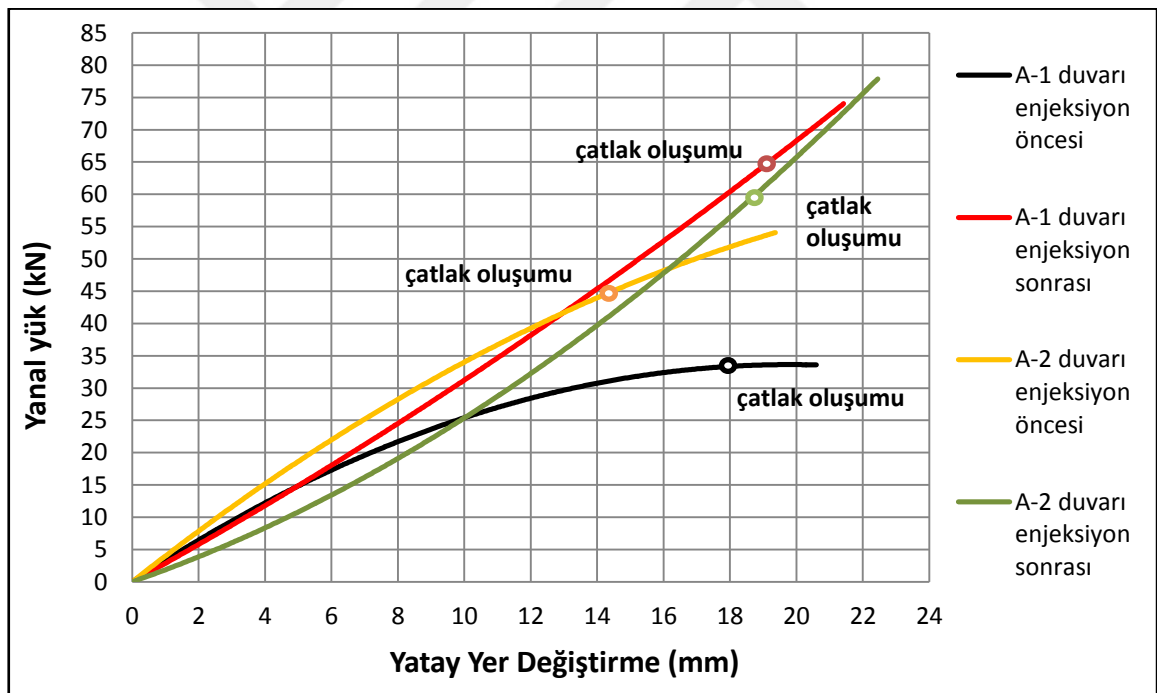
Şekil 5. 73 B-2 duvarına ait yanal yük-yatay yer değiştirme eğrileri

Hava kireci esaslı B harcı ve harman tuğlası ile üretilen B-2 duvarın onarım öncesi davranışı incelendiğinde, 45°'lik açı ile oluşan diyagonal çatlakın ilk oluştuğu andaki yük değerinin 25 kN olduğu ve yüklemenin 30 kN'a kadar devam ettiği, onarım sonrasında yapılan yükleme deneyinde ise ilk çatlakın oluştuğu yük değerinin 45 kN olduğu ve deneyin 55 kN'da sonlandırıldığı görülmektedir.

İlk çatlak oluştuğu andaki yük değerleri dikkate alınırsa, hava kireci esaslı B-2 duvarına uygulanan yatay yük değerleri %80 oranında artmıştır.

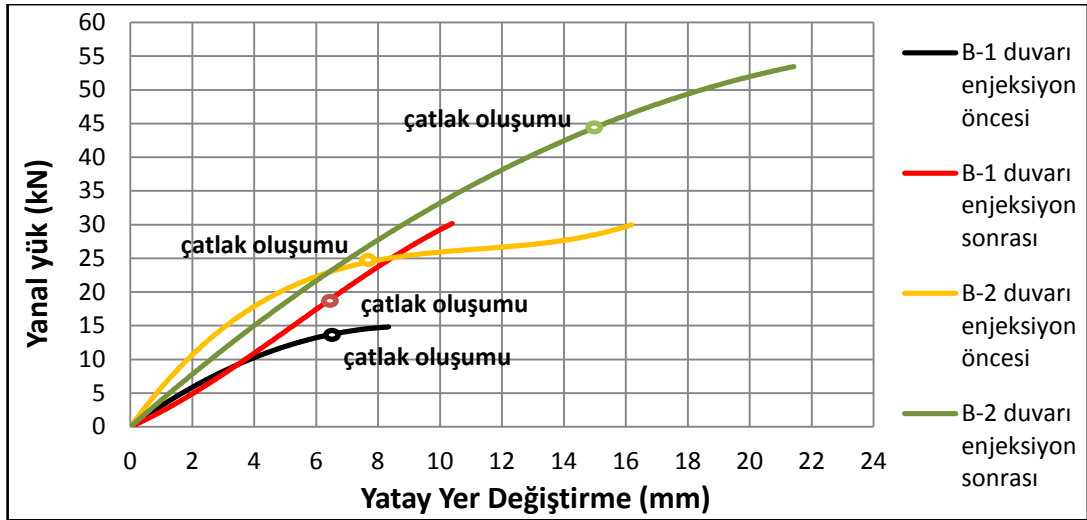
Enjeksiyon Öncesi ve Sonrası Duvarlarda Yük-Yer Değiştirme Sonuçlarının Değerlendirmesi

Hidrolik kireç esaslı harç ve harman tuğlası ile üretilen A-1 ve A-2 duvarlarının enjeksiyon öncesi ve sonrası düşey yük altında yanal yük- yatay yer değiştirme sonuçları Şekil 5.74'te gösterilmiştir.



Şekil 5. 74 Hidrolik kireç esaslı duvarlara ait yanal yük-yatay yer değiştirme eğrileri

Hava kireci esaslı harç ve harman tuğlası ile üretilen B-1 ve B-2 duvarlarının enjeksiyon öncesi ve sonrası düşey yük altında yanal yük- yatay yer değiştirme sonuçları Şekil 5.75'te gösterilmiştir.

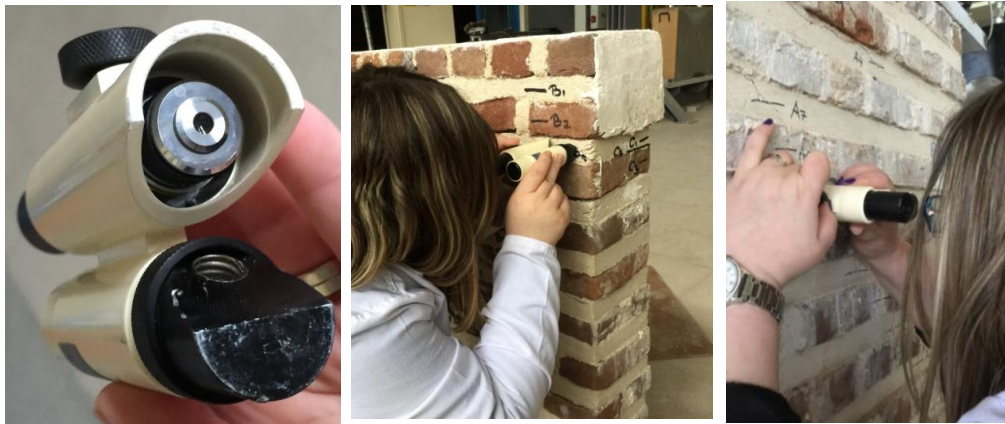


Şekil 5. 75 Hava kireci esaslı duvarlara ait yanal yük-yatay yer değiştirme eğrileri

Bütün duvar verileri göz önünde bulundurulduğunda, hidrolik kireç esaslı ve hava kireci esaslı duvarlarda enjeksiyon şerbeti ile yapılan onarım öncesi ve onarım sonrası yükleme verilerinde düşüş gözlemlenmemiştir. Kireç esaslı hazır enjeksiyon şerbetinin hidrolik kireç esaslı harç ve hava kireci esaslı harç ile örülmüş 19.yy tuğla duvarlarının mekanik dayanımını olumlu yönde etkilediği söylenebilir.

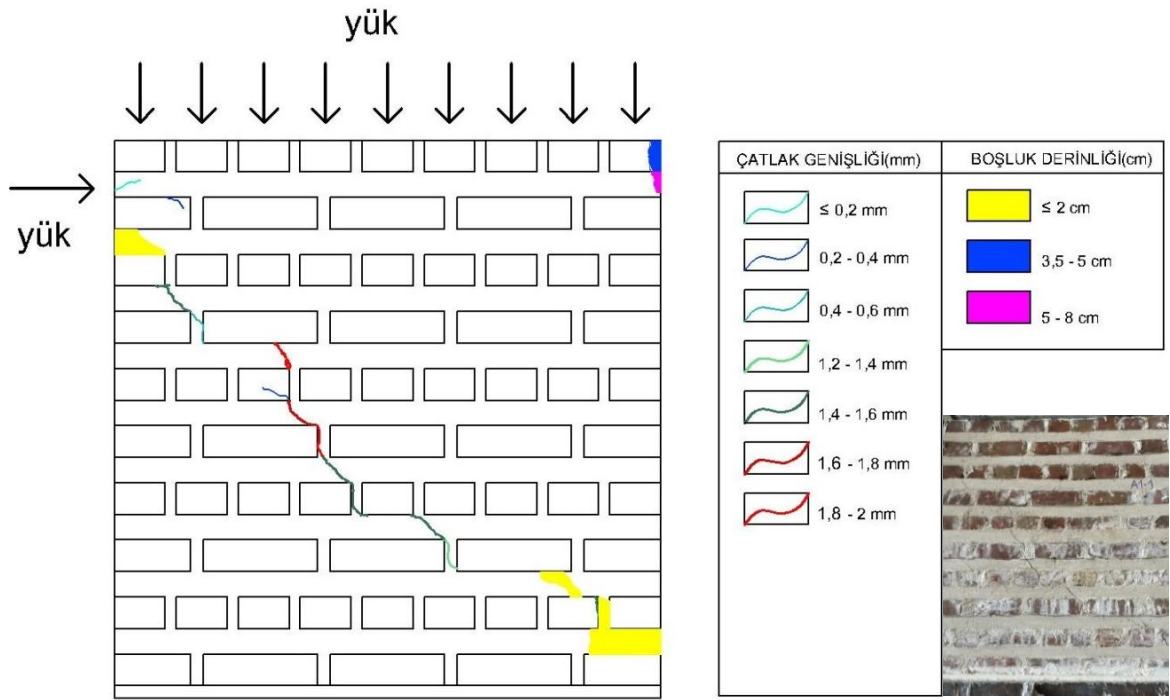
5.6.6 Model Duvarların Çatlak Haritalarının Çıkarılması

Enjeksiyon uygulamasının performans değerlendirmesinin yapılması amacıyla, uygulama öncesi ve sonrası hasar oluşturulan model duvarlar üzerinde çatlaklar işaretlenmiş, çatlak mikroskobu ile okumalar alınarak (Şekil 5.76) duvarların çatlak haritaları çıkarılmıştır.

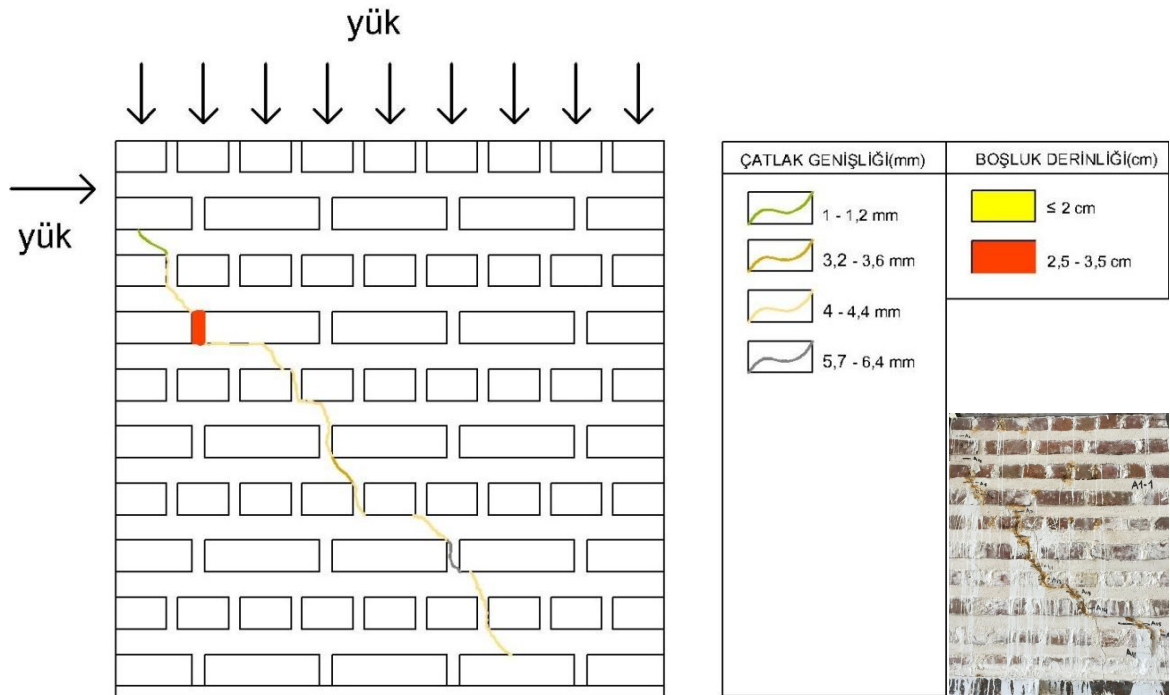


Şekil 5. 76 Çatlak mikroskobu ile okuma alınması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015.
Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

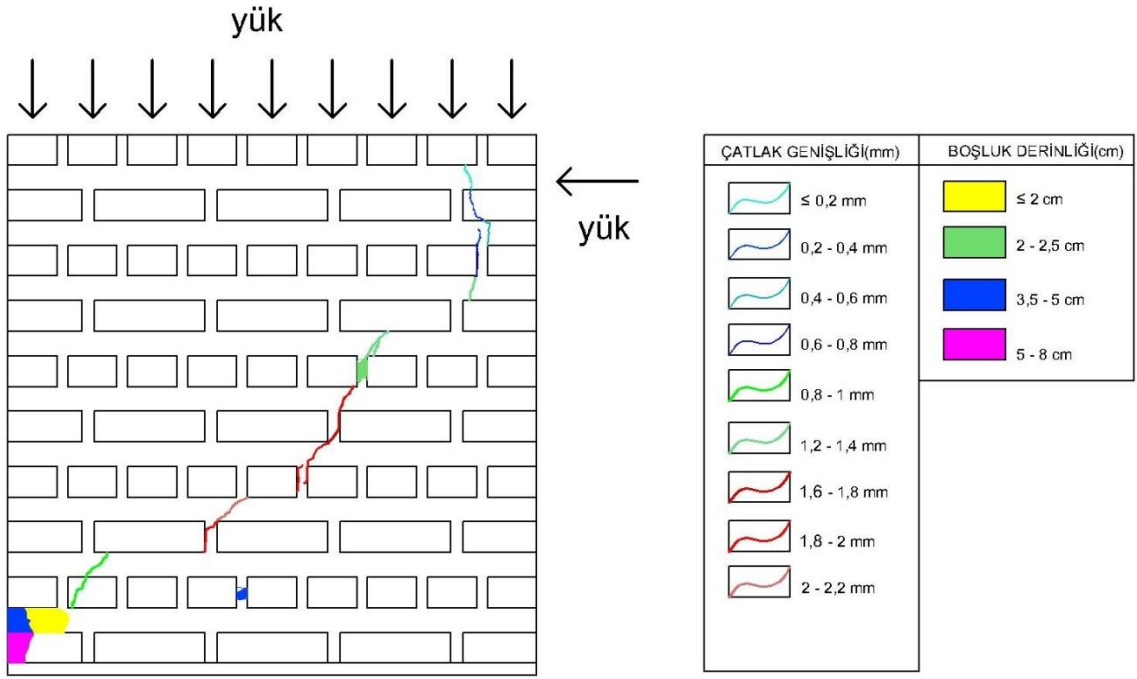
A-1 Duvarı Çatlak Haritaları



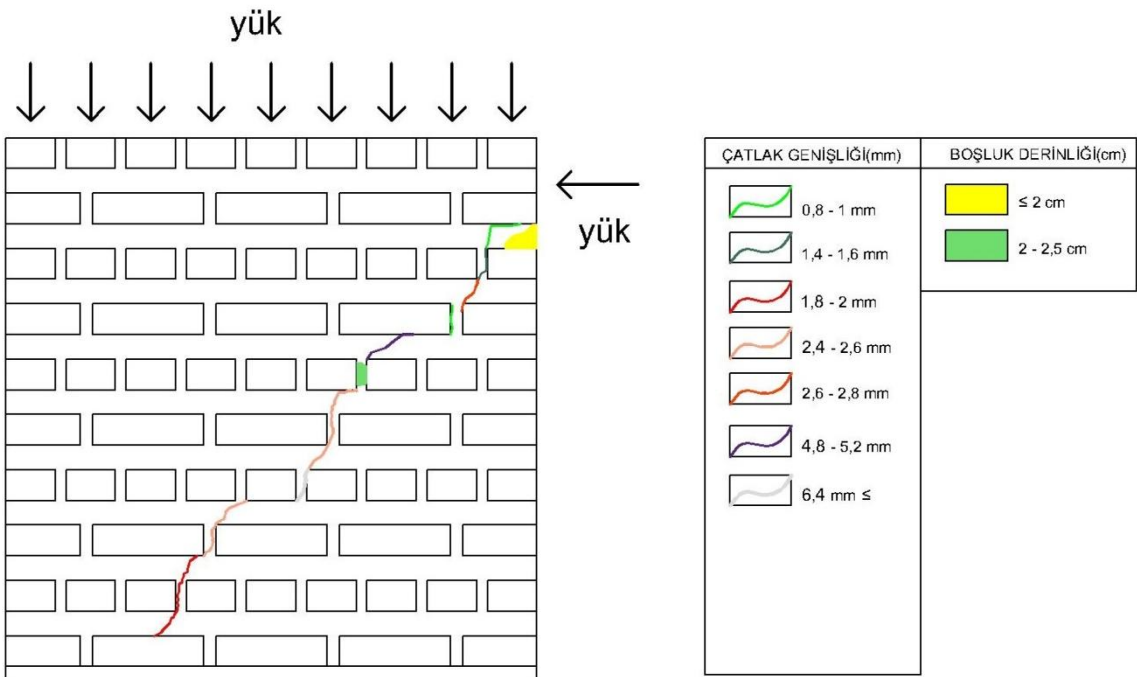
Şekil 5. 77 A-1 Duvarı ön yüzeyi, enjeksiyon öncesi yükleme deneyi çatlak haritası



Şekil 5. 78 A-1 Duvarı ön yüzeyi, enjeksiyon sonrası yükleme deneyi çatlak haritası

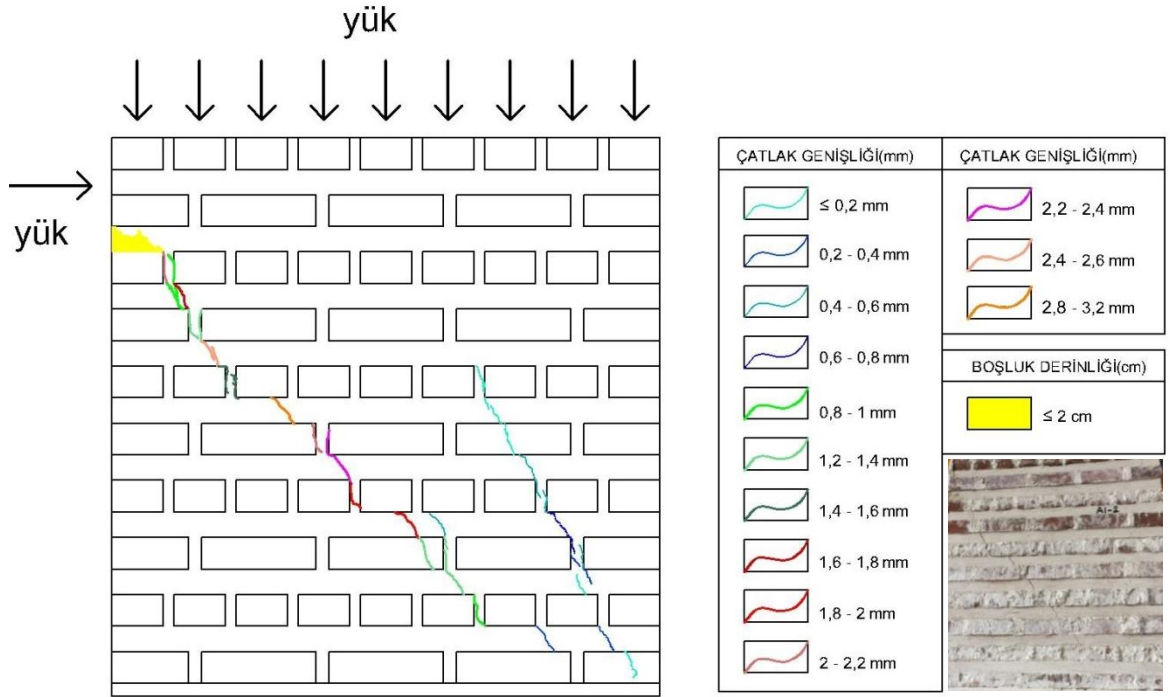


Şekil 5. 79 A-1 Duvarı arka yüzeyi, enjeksiyon öncesi yükleme deneyi çatlak haritası

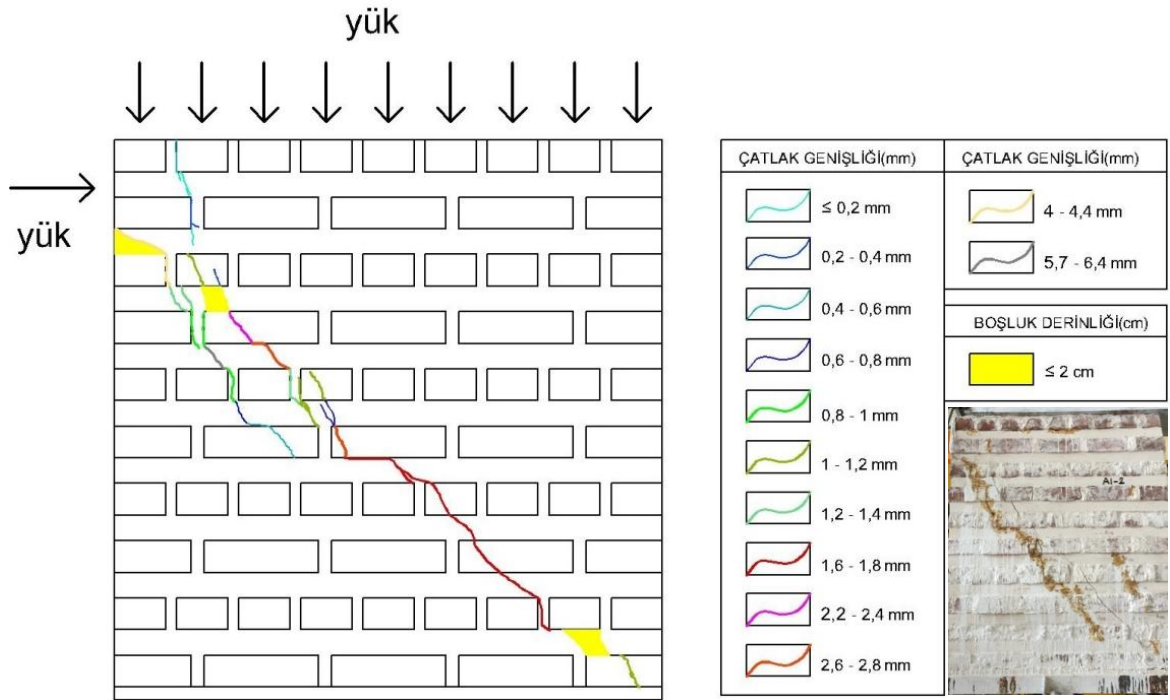


Şekil 5. 80 A-1 Duvarı arka yüzeyi, enjeksiyon sonrası yükleme deneyi çatlak haritası

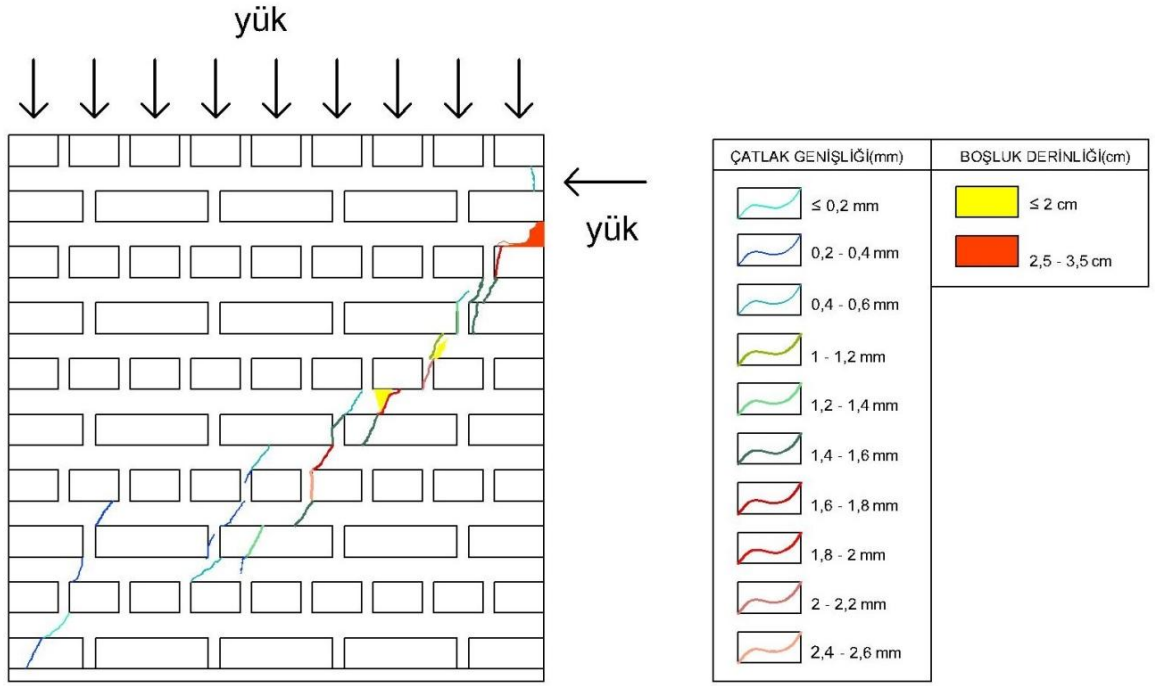
A-2 Duvarı Çatlak Haritaları



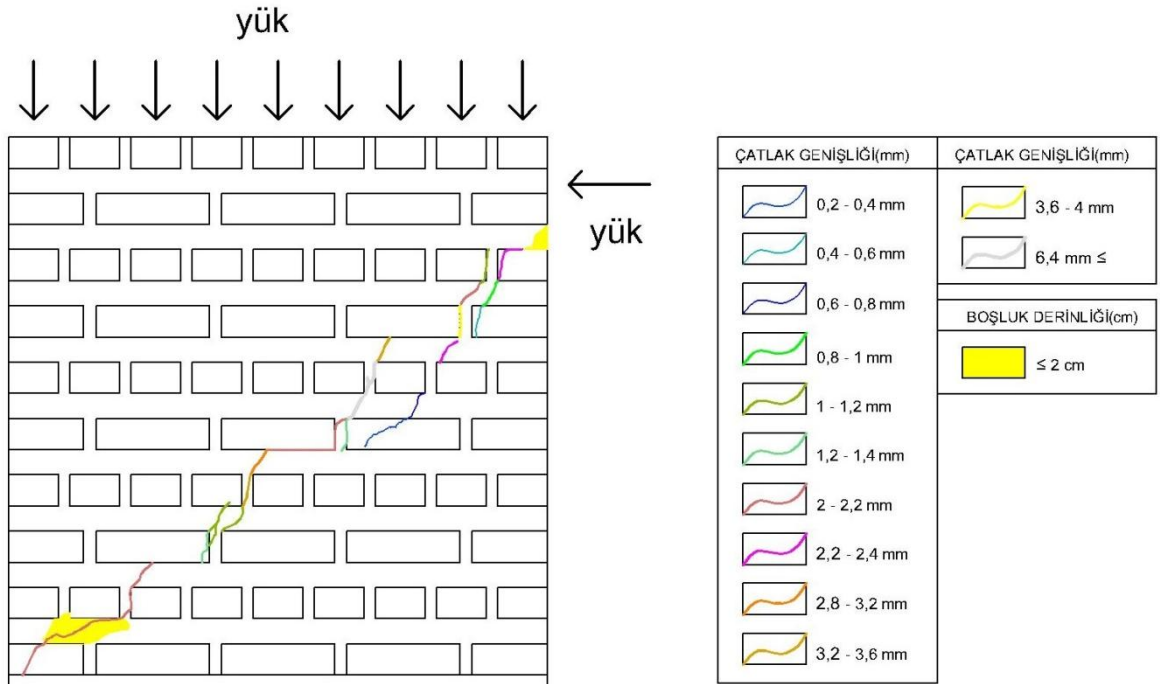
Şekil 5. 81 A-2 Duvarı ön yüzeyi, enjeksiyon öncesi yükleme deneyi çatlak haritası



Şekil 5. 82 A-2 Duvarı ön yüzeyi, enjeksiyon sonrası yükleme deneyi çatlak haritası

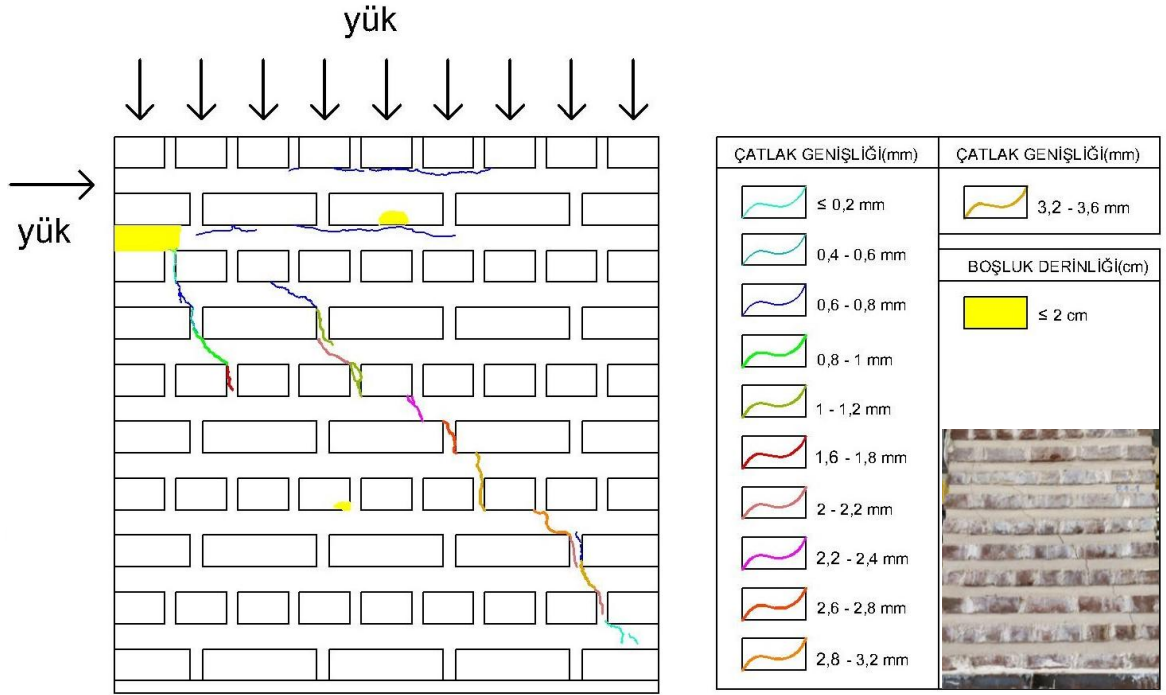


Şekil 5. 83 A-2 Duvarı arka yüzeyi, enjeksiyon öncesi yükleme deneyi çatlak haritası

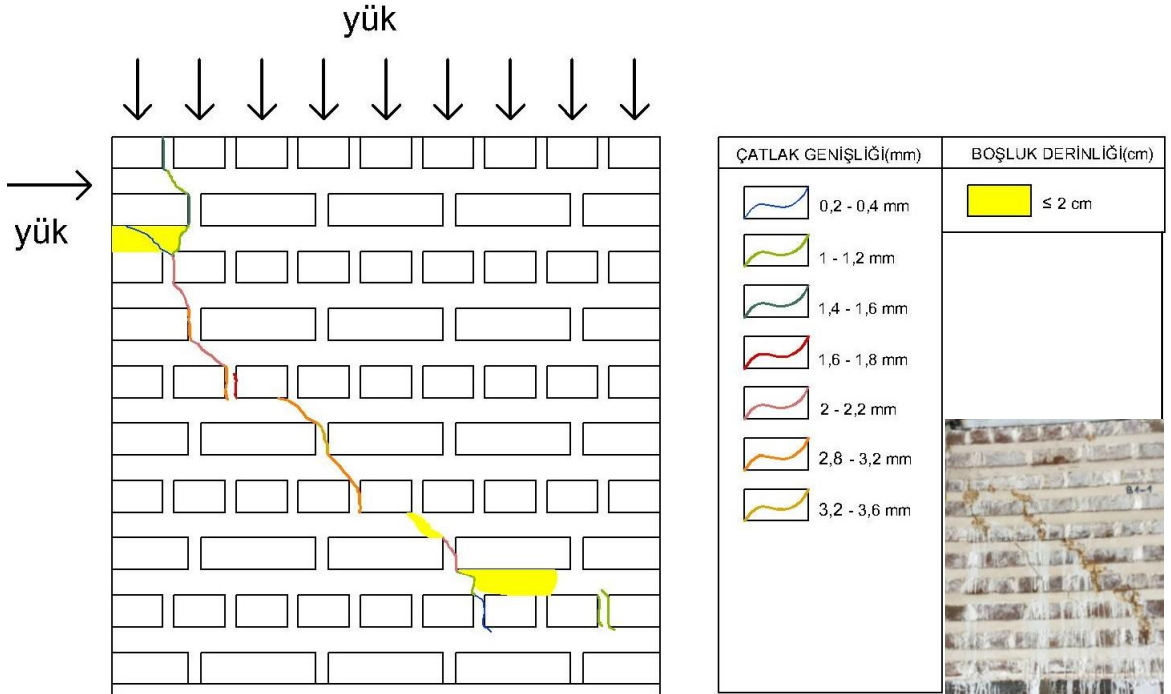


Şekil 5. 84 A-2 Duvarı arka yüzeyi, enjeksiyon sonrası yükleme deneyi çatlak haritası

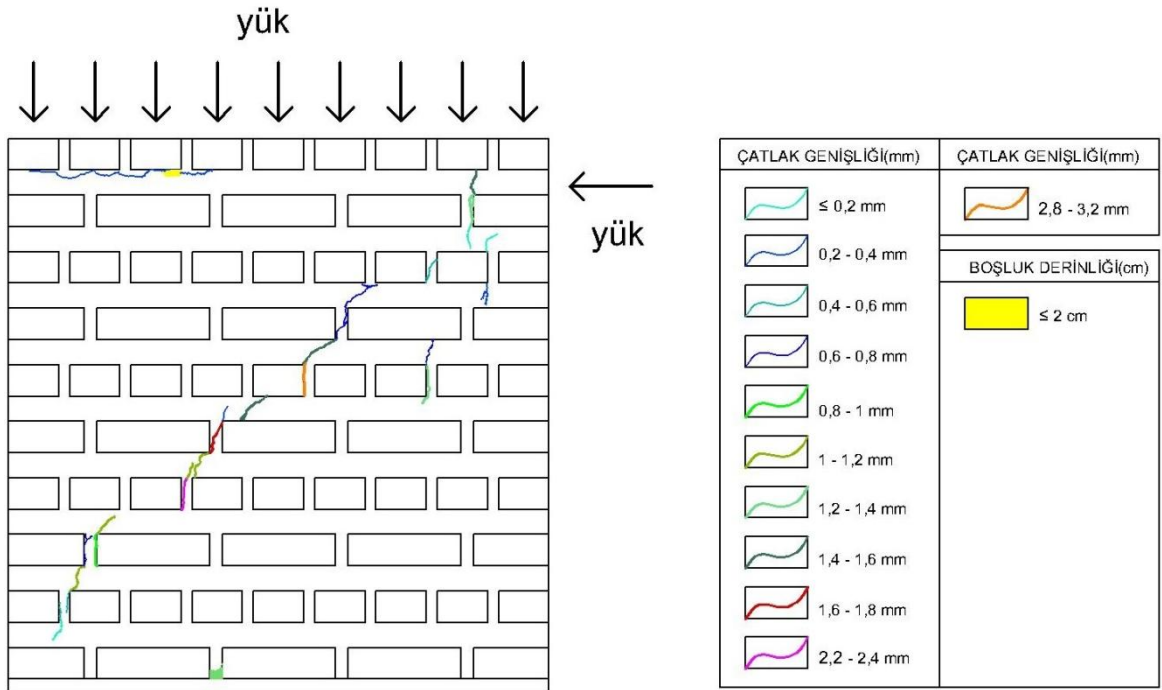
B-1 Duvarı Çatlak Haritaları



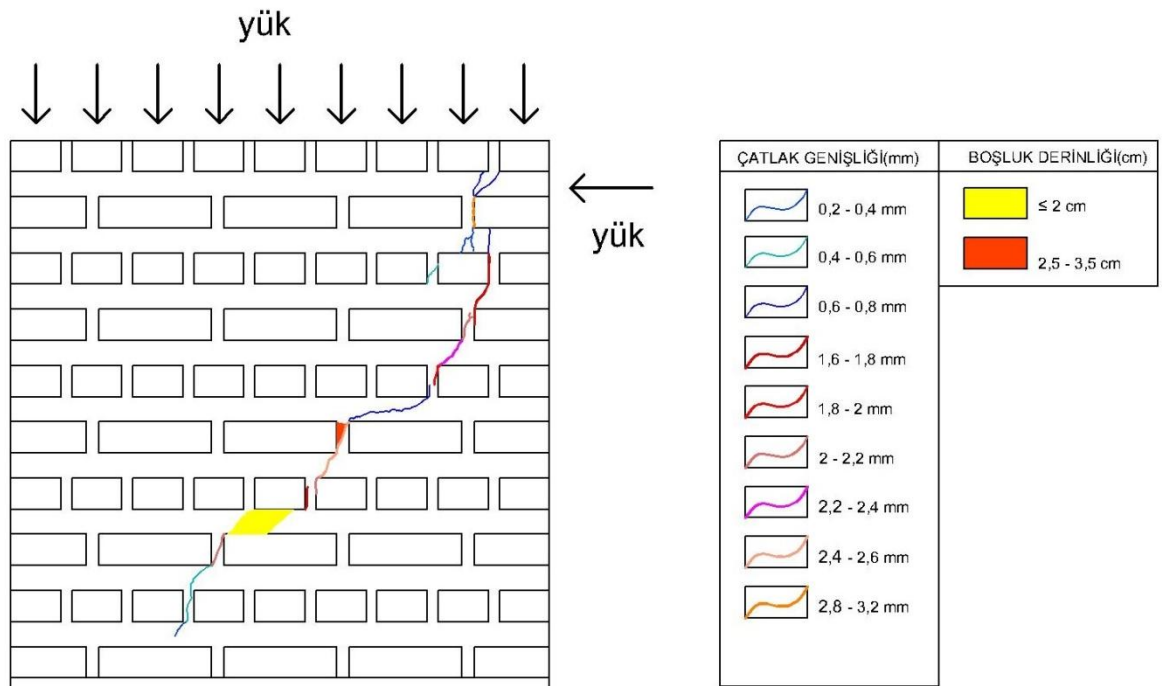
Şekil 5. 85 B-1 Duvarı ön yüzeyi, enjeksiyon öncesi yükleme deneyi çatlak haritası



Şekil 5. 86 B-1 Duvarı ön yüzeyi, enjeksiyon sonrası yükleme deneyi çatlak haritası

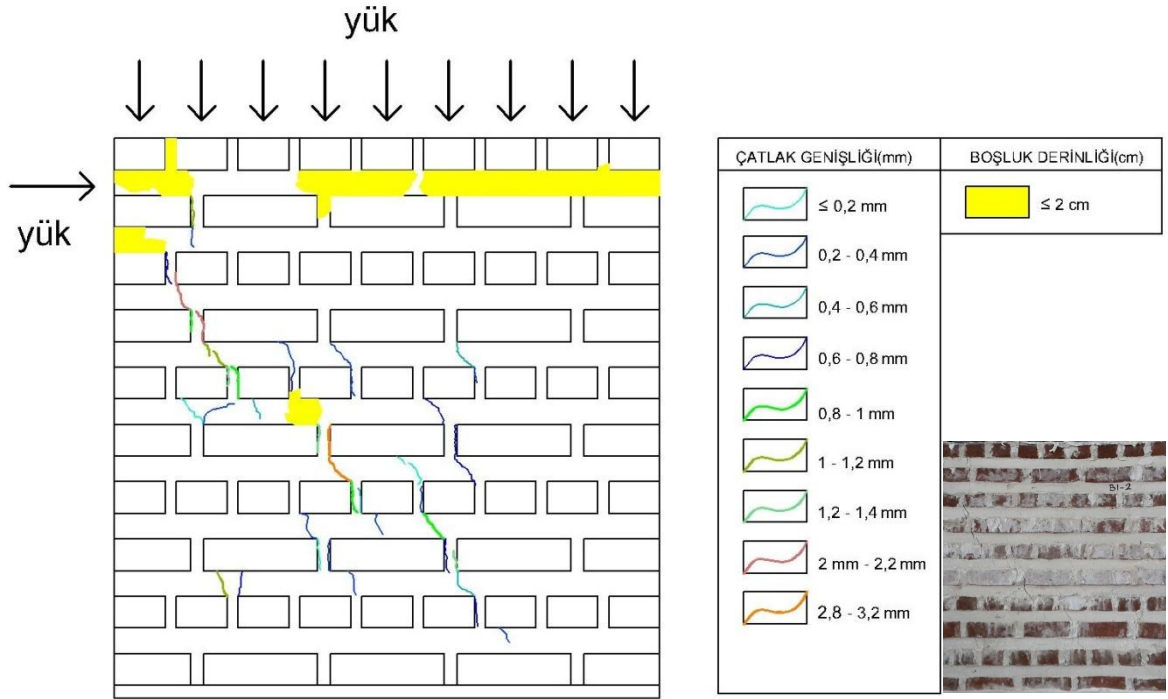


Şekil 5. 87 B-1 Duvarı arka yüzeyi, enjeksiyon öncesi yükleme deneyi çatlak haritası

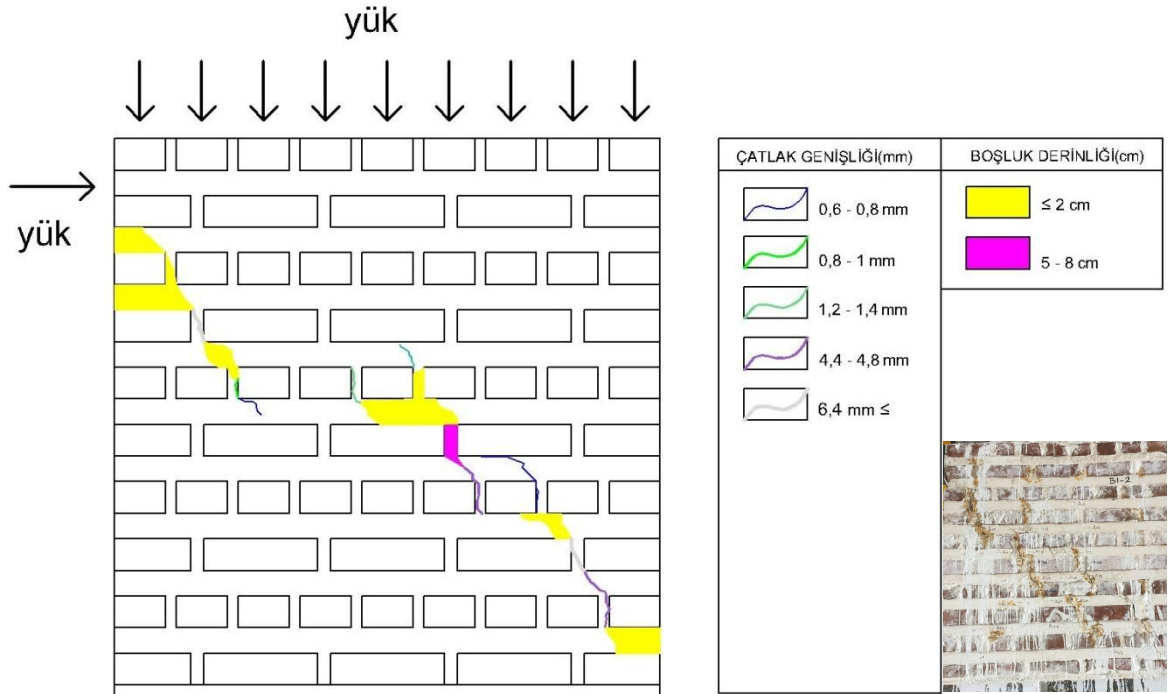


Şekil 5. 88 B-1 Duvarı arka yüzeyi, enjeksiyon sonrası yükleme deneyi çatlak haritası

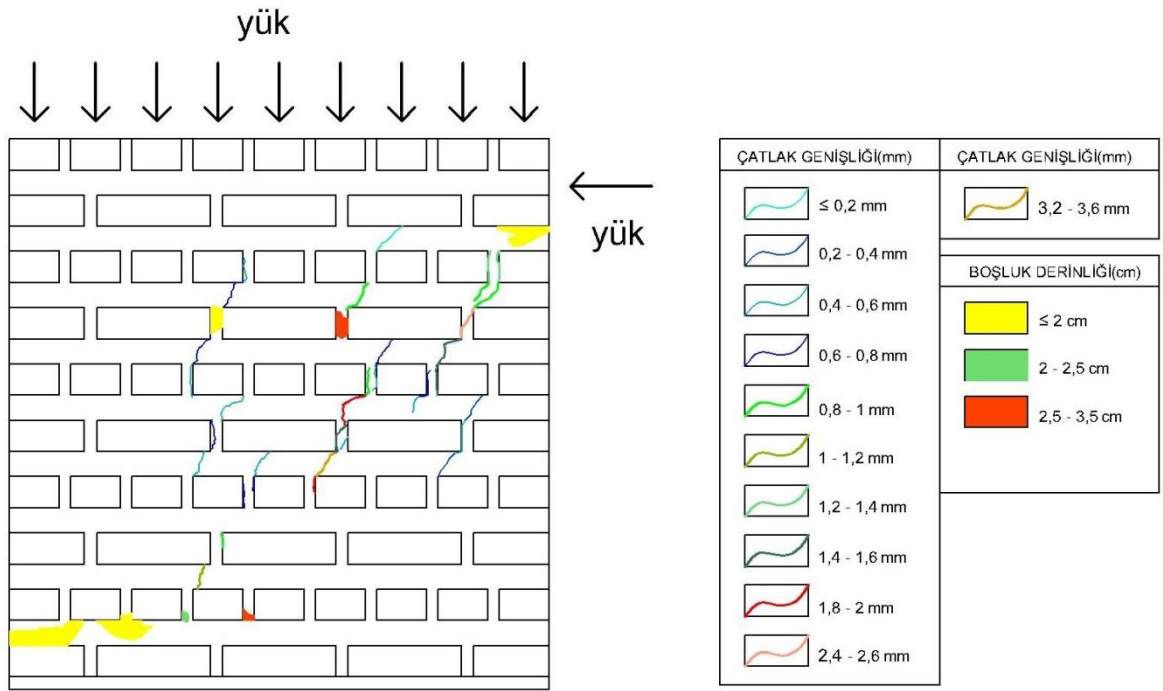
B-2 Duvarı Çatlak Haritaları



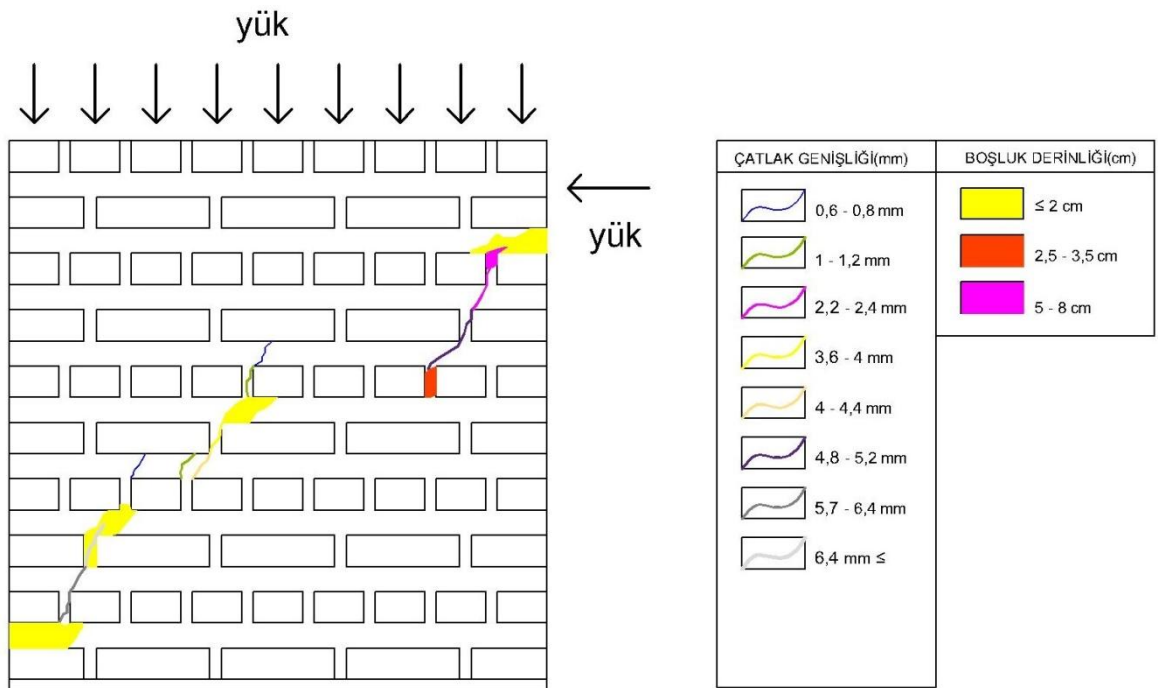
Şekil 5. 89 B-2 Duvarı ön yüzeyi, enjeksiyon öncesi yükleme deneyi çatlak haritası



Şekil 5. 90 B-2 Duvarı ön yüzeyi, enjeksiyon sonrası yükleme deneyi çatlak haritası



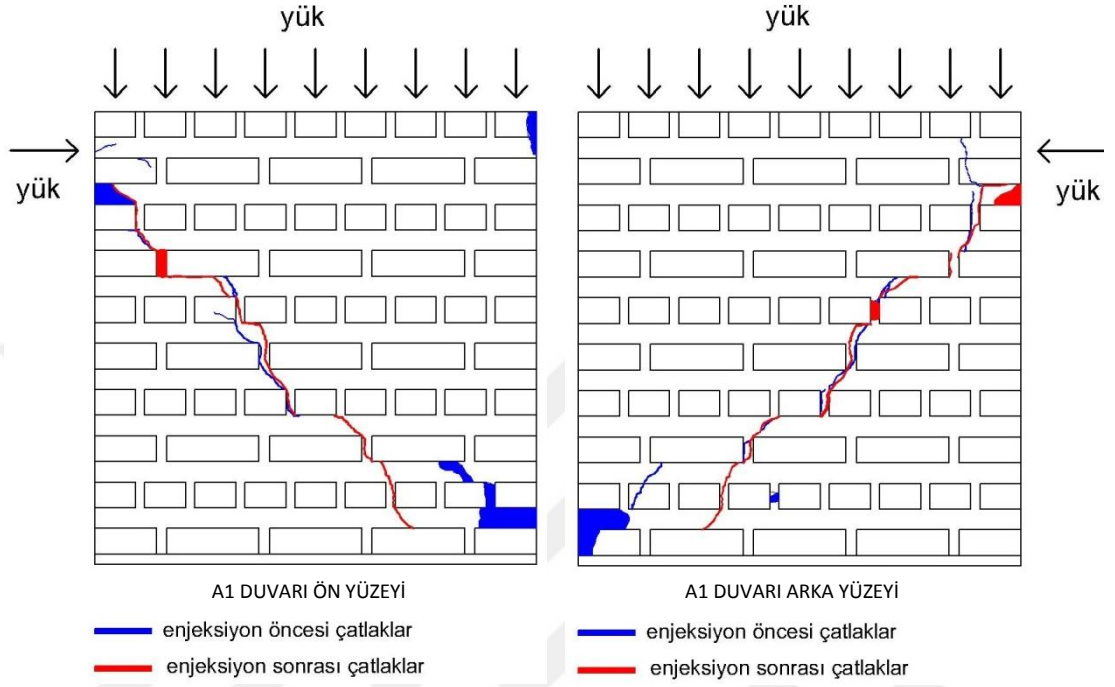
Şekil 5. 91 B-2 Duvarı arka yüzeyi, enjeksiyon öncesi yükleme deneyi çatlak haritası



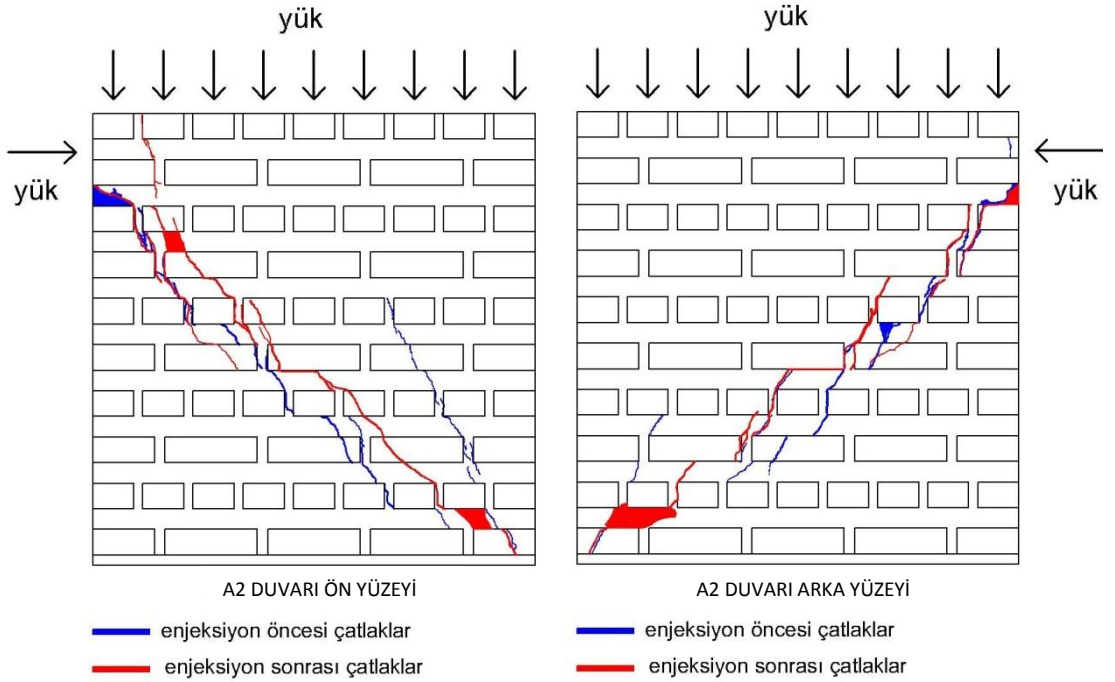
Şekil 5. 92 B-2 Duvarı arka yüzeyi, enjeksiyon sonrası yükleme deneyi çatlak haritası

Çatlak Haritalarının Değerlendirilmesi

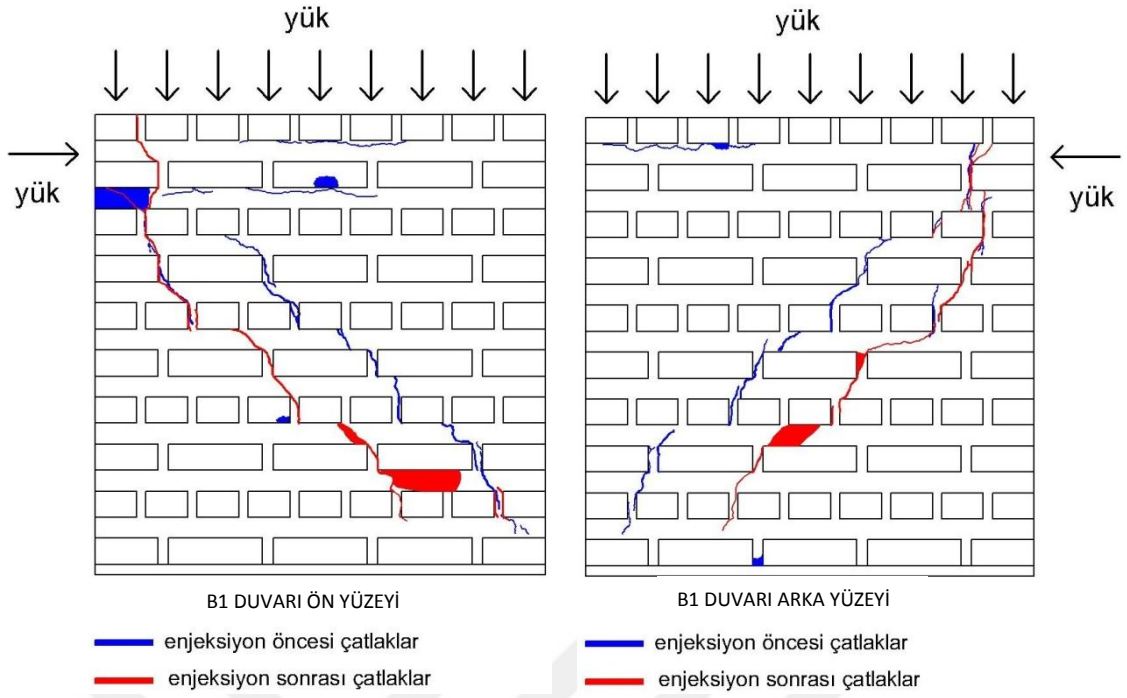
G2 şerbetinin enjekte edilmesi ile onarılan duvarlarda enjeksiyon öncesi ve sonrası yapılan yükleme deneyi sonucunda oluşan çatlakların haritaları çıkarılmış, çatlak genişliğinin 0.2-7mm arasında değiştiği gözlemlenmiştir.



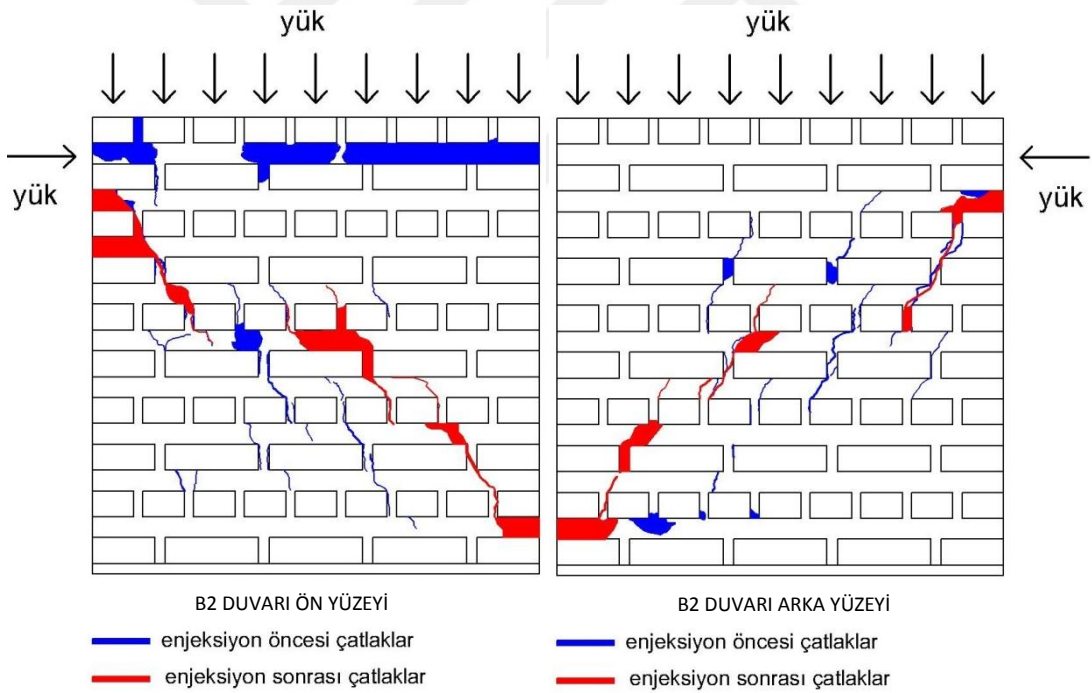
Şekil 5. 93 A-1 duvarı enjeksiyon öncesi ve sonrası çatlak haritalarının karşılaştırılması



Şekil 5. 94 A-2 duvarı enjeksiyon öncesi ve sonrası çatlak haritalarının karşılaştırılması



Şekil 5. 95 B-1 duvarı enjeksiyon öncesi ve sonrası çatlak haritalarının karşılaştırılması



Şekil 5. 96 B-2 duvarı enjeksiyon öncesi ve sonrası çatlak haritalarının karşılaştırılması

Onarım sonrası yapılan yükleme deneylerinde oluşan diyagonal çatlakların, onarım öncesi yapılan yükleme deneyinde oluşana çok yakın olduğu ancak farklı bölgelerde olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan bu görsel inceleme sonucunda enjeksiyon malzemesi ile duvar malzemeleri arasındaki aderansın sağlandığı söylenebilir.

5.6.7 Ultra-ses deneyi ile enjeksiyon performansının değerlendirilmesi

Enjeksiyonun performans değerlendirmesinin yapılması için ikinci olarak TS EN 12504-4 [153] te belirtildiği şekilde ultrases deneyi yapılmıştır.

Ultrases deneyinin prensibi taşıyıcı sistemin arasından eksenel ses dalgalarının iletilmesi ile malzemelerin doluluk ve boşluk oranları ve bünyesinde barındırdıkları çatlaklar hakkında bilgi edinmektir.

Cismin boşlukları çok ve bünyesinde çatlaklar var ise ses dalgalarının yayılımı, dolayısıyla ses geçiş hızı düşük olur. Cismin boşlukları az ve bünyesinde çatlaklar yok ise ses dalgalarının yayılımı, dolayısıyla ses geçiş hızının yüksek olduğu görülür.

Ultrases deneyi sırasında ses dalgalarını gönderen ve alan piezoelektrik transducerler (alıcı ve verici probalar) cisme boşluk bırakılmadan temas ettirilir. Bu nedenle ilk olarak problemlerin üzerine ultrason jeli enjekte edilerek problemlerin duvara temas etmesi ve ses dalgalarının geçişi kolaylaştırılmıştır. Daha sonra problemler duvara temas ettirilmiş, alıcı ve verici problemler arasındaki ses dalgalarının iletim süresi ve hızı zaman ölçer devre ile ölçülmüştür (Şekil 5.97)



Şekil 5. 97 Ultra-ses ölçümünün yapılması (YTÜ Malzeme Laboratuvarı, 2015. Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

Ultrases ölçüm aleti ile şekil 5.97'de görüldüğü gibi aynı yüzeylerden ölçüm yapılarak ses geçiş süresi (t , μs) ve ölçüm yapılan uzaklık (L , mm) ölçülmüştür ve (5.10) bağıntısı ile ses geçiş hızı (V_{ses} , mm/ μs) hesaplanmıştır.

$$V_{ses} = \frac{L}{t} \text{ (mm/}\mu\text{s)} \quad (5.10)$$

İlk olarak enjeksiyon öncesi hasar oluşturulan duvarların çatlak olan bölgelerinde ölçüm yapılmış ancak okuma alınamamıştır. Bu nedenle, sadece gözle görülür çatlak bulunmayan dolu harç ve tuğla sıralarında aynı yüzeylerden ölçümler yapılabilmiştir (Çizelge 5.16)

Çizelge 5. 16 Dolu yüzeylerde ultrases ölçümleri

Model Duvarlar	Harçlarda ultrases hızı (V, mm/μs)	Tuğlada ultrases hızı (V, mm/μs)
Hidrolik kireçli duvar (A-1)	1.24	1.16
Hidrolik kireçli duvar (A-2)	1.23	1.09
Hava kireçli duvar (B-1)	0.54	1.19
Hava kireçli duvar (B-2)	0.52	1.20

Onarım yapıldıktan 28 gün sonra ultra-ses deneyleri tekrarlanmıştır. Bu sefer ultrases deneylerinde problemler onarılmış çatlakların iki yanına yerleştirilerek ölçümler alınabilmiştir. Tüm ölçümler harç yüzeylerinde ve tuğla yüzeylerinde en az üçer kez tekrarlanmıştır. Çatlak etrafında, tuğla ve harç yüzeyde, enjeksiyon öncesi ve sonrası yapılan ultrases deneyi sonuçları Çizelge 5.17’de verilmiştir.

Çizelge 5. 17 Çatlak etrafında yapılan ultrases ölçümleri

Model Duvarlar	Harçlarda ultrases hızı (V, mm/μs)		Tuğlada ultrases hızı (V, mm/μs)	
	Enjeksiyon öncesi	Enjeksiyon sonrası	Enjeksiyon öncesi	Enjeksiyon sonrası
Hidrolik kireçli duvar (A-1)	- *	1.09	- *	1.10
Hidrolik kireçli duvar (A-2)		1.11		0.85
Hava kireçli duvar (B-1)		0.63		1.02
Hava kireçli duvar (B-2)		0.62		0.98

* Ölçüm alınamamıştır

Enjeksiyon öncesi ve sonrasında yapılan ölçüm sonuçlarına göre, ilk olarak çatlak olan yüzeylerden ölçüm alınamadığı, daha sonra enjeksiyon şerbeti ile onarılan duvar yüzeylerinden ölçüm alınabildiği için boşlukların büyük oranda doldurulduğu söylenebilir.

Hatta dolu yüzeylerdeki veriler göz önünde bulundurulduğunda, şerbet enjeksiyonu sonrası yapılan ölçümlerin dolu yüzey verilerine yakın olduğu görülmektedir.

Genelde yerinde yapılan çalışmalarda, malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan tahribatsız deneylerden olan ultrases yöntemi, laboratuvar ortamında üretilen model duvarlar üzerinde enjeksiyon uygulamasının performansının değerlendirilmesi için uygulanmıştır. Ultrases yöntemi, laboratuvar ortamında kullanılabileceği gibi, yerinde yapılan çalışmalarda da enjeksiyon uygulamasının performansının değerlendirilmesi için kullanılabilecek yöntemlerden biri olabilir.



SONUÇ VE ÖNERİLER

Araştırma kapsamında ele alınan 2 farklı ticari (hazır) enjeksiyon şerbeti, "G1" ve "G2" olarak adlandırılmıştır. Hidrolik kireç esaslı harç "A", hava kireci esaslı harç "B" olarak adlandırıldığı gibi; enjeksiyon malzemesinin performansını değerlendirmek için, hidrolik kireç esaslı harç ve harman tuğlasından üretilen model duvarlar "A-1" ve "A-2", hava kireci esaslı harç ve harman tuğlasından üretilen duvarlar "B-1" ve "B-2" olarak adlandırılmıştır.

Deneysel çalışmalar sonucunda tarihi yağma yapıların onarımında kullanılan enjeksiyon malzemesinin (grout) performansı değerlendirilmiş, elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Toz haldeki farklı hazır enjeksiyon malzemelerinin koku ve renk olarak birbirlerinden farklı oldukları gözlemlenmiştir. G1 açık kahve-bej renge sahipken G2'nin rengi daha açık, beyaza yakındır. Ayrıca, toz veya sıvı haldeki G1 su ile silindiğinde leke bırakmamasına karşın G2'nin su ile silindiğinde önce lekenin ortadan kalktığı daha sonra yine kireç gibi tekrar ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.
- Malzemelerin XRF ve master size analiz sonuçlarına göre G2 malzemesinin tane boyut dağılımının ve özgül ağırlığının G1 malzemesine göre hidrolik kirece daha benzer özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Yine G2 malzemesi hava kirecine kıyasla hidrolik kirece daha yakın özelliklere sahiptir. G1 ve G2 malzemelerinin granülometri eğrisinden, G1 malzemesinin G2 malzemesine göre daha büyük tane boyutlarına sahip olduğu anlaşılmaktadır.

- G1 şerbetinin üretimi sırasında, üretici firmanın bilgi reçetesinde önerilen su/bağlayıcı oranı ve karıştırma şekliyle hazırlanan numunelerle gerçekleştirilen deneylerde beklenen özellikler sağlanamamıştır. Beklenen özelliklerin sağlanabilmesi için üretim prosedürü değiştirilmiş, çırpma hızı ve çırpma süresi arttırılmış, sadece 0.5 su/bağlayıcı oranında ve %1 oranda polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı kullanılarak üretilen numune beklenen özellikleri sağlamıştır.
- Ticari olarak üretilen hazır enjeksiyon malzemeleri içlerinde süper akışkanlaştırıcılar barındırmakta ve fazladan enjekte edilen süper akışkanlaştırıcılar malzemenin penetrasyonu etkilemektedir. Ancak G1 şerbetinin akışkanlık ve penetrasyon sınır değerlerini sağlamak için su/bağlayıcı oranı arttırıldığında malzemenin hacim sabitliği sınır değerini aştığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle G1 şerbeti için süper akışkanlaştırıcı kullanmak zorunda kalmıştır.
- G1 şerbeti ile yapılan tüm üretimlerde malzemenin ayrıştığı gözlemlenmiştir. Çökme su/bağlayıcı oranı arttırıldığında önemli ölçüde azalmıştır. Ancak tam anlamıyla homojen bir karışım hiç bir karıştırma prosedüründe elde edilememiştir.
- G2 şerbetinin üretimi sırasında da, üretici firmanın bilgi reçetesinde önerilen su/bağlayıcı oranı ve karıştırma şekliyle hazırlanan numunelerle gerçekleştirilen deneylerde beklenen özellikler sağlanamamıştır. Bu nedenle, üretim prosedürü değiştirilmiş, çırpma hızı ve çırpma süresi artırılarak 0.6 su/bağlayıcı oranı ile beklenen özellikler sağlanabilmiştir. G2 şerbeti için de süper akışkanlaştırıcı karışımlar denense de şerbetin ön deneyleri geçebilmesi için süper akışkanlaştırıcıya gerek kalmamıştır.
- G1 şerbeti terleme deneyinde, 3. saat terleme değerleri sınır değerlere yaklaşmış olmasına rağmen 24. saat terleme değerleri sınır değerlerin çok altında kalmıştır. G1 şerbeti ile üretilen ve süper akışkanlaştırıcı kullanılan diğer şerbetlerde de aynı durum gözlemlenirken, süper akışkanlaştırıcı kullanılmayan şerbetlerde aksine 24. saatte terlemede artış gözlemlenmiştir.
- Süper akışkanlaştırıcı kullanılmadan üretilen G2 şerbeti ise terlemenin 1., 2., 3. ve 24. saatinde yapılan tüm ölçümlerde sınır değerlerin altında kalmıştır. Ancak, bu

şerbette süper akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerde 1.,2. ve 3. saatteki ölçümler sınır değerlerin altında kalırken, 24. saatteki ölçümler sınır değerlerin çok üzerine çıkmıştır. Literatür verilerinde de süper akışkanlaştırıcıların enjeksiyon şerbetlerinin hacim sabitliği özelliğine etkisinden bahsedildiği ve deneylerle de görüldüğü için G1 şerbetinde 24. saatteki terlemedeki düşüşün ve G2 şerbetinde 24. saatteki terleme artışının polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcıdan kaynaklandığı düşünülmektedir.

- G1 ve G2 malzemeleri 28 gün kür koşullarında bekletilmiş, ancak G1 malzemesinin kür sonunda deney yapılamayacak kıvamda (hamur kıvamı) olduğu gözlemlenmiş ve bu aşamadan sonraki deneylere G2 malzemesi ile devam edilmiştir. G1 malzemesinin tarihi yığma yapıların onarımında kullanılabilecek nitelikte olmadığı saptanmıştır.
- G2 malzemesinin 28. günde gerçekleştirilen eğilme ve basınç deneylerinden edinilen sonuçlara göre, malzemenin eğilme ve basınç dayanımının hidrolik özellik gösteren kireç harçlarına yakın olduğu görülmüştür. Bu bağlamda, enjeksiyon malzemesinin özgün malzeme ile mekanik uyumluluk gösterdiği söylenebilir.
- G2 malzemesinin kılcalık katsayısı hava kireci esaslı harca çok yakın, hidrolik kireç esaslı harç ve harman tuğlasından yüksek bulunmuştur. Bu nedenle hazır enjeksiyon malzemesinin kılcalık katsayısının hava kireci esaslı harçlara benzerlik gösterdiği söylenebilir.
- Silindir enjeksiyon deneyi sonucunda üretilen 3 çeşit silindirde (tuğla-A, tuğla-B ve sırf tuğla) de şerbet enjeksiyonunun başarılı bir şekilde gerçekleştiği, enjeksiyon süresinin kısa ve enjeksiyon malzemesi hacminin (m/p) toplam boşluk hacmine oranının (V_v) 1'e yakın olduğu, dolayısıyla enjeksiyon uygulamasının yeterli olduğu görülmüştür. Harç içeren silindirlerde enjeksiyon süresinin sırf tuğla içeren silindirlere kıyasla daha kısa olduğu gözlemlenmiştir. Tuğla ve harç içeren silindir numuneleri daha yüksek enjekte edilebilirlik değeri ve enjeksiyon yapılacak strüktüre daha benzer özellikler gösterse de yerinde uygulama (in-situ) öncesi güvenli tarafta kalmak için silindir enjeksiyon deneyi sırf tuğla içeren silindir numunelerine uygulanabilir.

- Silindirler üzerine uygulanan tek eksenli basınç deneylerinden sonra, çatlakların genellikle tuğla-şerbet ara yüzünde olduğu gözlemlenmiştir ve deney sonucu hesaplanan elastisite modülü değerleri literatür verilerine yakındır. Ancak, "Tuğla-şerbet" ten oluşan ve "tuğla-hava kireci esaslı harç-şerbet" ten oluşan silindirlerin basınç dayanımı, enjeksiyon şerbetinin basınç dayanımından düşük çıkmıştır. Bunun aksine "tuğla-hidrolik kireç esaslı harç-şerbet" ten oluşan silindirlerin basınç dayanımı, enjeksiyon şerbetinin basınç dayanımından yüksektir. Bu farklılıklar enjeksiyon malzemesinin basınç dayanımının, onarım sırasında mekanik etkinliği belirlemede kriter olamayacağını göstermektedir.
- Laboratuvar ortamında üretilen, düşey ve yanal yükler altında diyagonal olarak çatlatılan A-1, A-2, B-1 ve B-2 duvarları, yine bu çalışma kapsamında yeni üretim yöntemi geliştirilen kireç esaslı ticari (hazır) enjeksiyon malzemesi (G2) ile onarılmıştır. Uygulama boyunca malzemenin etkili bir şekilde penetre olduğu ve uygulama yapılan noktanın üzerinde bulunan noktalardan dışarı çıktığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, model duvarlarda oluşan çatlak ve boşlukların enjeksiyon şerbeti ile büyük ölçüde doldurulduğu söylenebilir.
- Bütün duvar verileri göz önünde bulundurulduğunda, hidrolik kireç esaslı ve hava kireci esaslı duvarlarda enjeksiyon şerbeti ile yapılan onarım öncesi ve onarım sonrası yükleme verilerinde düşüş gözlemlenmemiştir. Kireç esaslı hazır enjeksiyon şerbetinin hidrolik kireç esaslı harç ve hava kireci esaslı harç ile örülmüş 19.yy tuğla duvarlarının mekanik dayanımını olumlu yönde etkilediği söylenebilir.
- Çatlak haritaları göstermiştir ki; onarım sonrası yapılan yükleme deneylerinde oluşan diyagonal çatlaklar, onarım öncesi yapılan yükleme deneyinde oluşanlara çok yakın ancak farklı bölgelerde oluşmuşlardır. Yapılan bu görsel inceleme sonucunda enjeksiyon performansında en önemli kriterlerden biri olan, enjeksiyon malzemesi ile duvar malzemeleri arasındaki aderansın sağlandığı söylenebilir.
- Ultrases deneyi ile enjeksiyon öncesi ve sonrasında yapılan ölçüm sonuçlarına göre, ilk olarak çatlak olan yüzeylerden ölçüm alınamadığı, daha sonra enjeksiyon şerbeti ile onarılan duvar yüzeylerinden ölçüm alınabildiği için boşlukların büyük oranda doldurulduğu söylenebilir. Hatta dolu yüzeylerde yapılan ölçümler

incelendiğinde, şerbet enjeksiyonu sonrası yapılan ölçümlerin dolu yüzey verilerine yakın olduğu görülmektedir.

- Genelde yerinde yapılan çalışmalarda, malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan tahribatsız deneylerden olan ultrases yöntemi, laboratuvar ortamında üretilen model duvarlar üzerinde enjeksiyon uygulamasının performansının değerlendirilmesi için uygulanmıştır. Ultrases yöntemi, laboratuvar ortamında kullanılabileceği gibi, yerinde yapılan çalışmalarda da enjeksiyon uygulamasının performansının değerlendirilmesi için kullanılabilecek yöntemlerden biri olabilir.

Sonuç olarak, özgün malzeme özelliklerine göre üretilmiş tuğla model duvarlar üzerine yapılan şerbet enjeksiyonu başarılı olmuş ve enjeksiyon malzemesi tüm duvarların mekanik özelliklerini geliştirmiş, duvarların taşıma kapasitelerini arttırmıştır. Ancak, ön deneyler sırasında görülmüştür ki, üretici firmaların bilgi reçeteleri ile oluşturulan enjeksiyon şerbetleri ile beklenen özellikler sağlanamamıştır. Bu nedenle enjeksiyon uygulaması öncesi ön deneyler mutlaka yapılmalı, malzeme özellikleri analiz edilmeli, özgün malzemeler ile uyumu araştırılmalıdır.

Tarihi yığma yapıların onarımı için kullanılan enjeksiyon malzemesinin performansına yönelik yapılacak çalışmalarda, enjeksiyon malzemesinin her seferinde ve yapı özelinde özgün malzemeyle uyumu araştırılmalıdır. Bu çalışma kireç esaslı ticari enjeksiyon şerbetinin 19. yüzyıl fabrikasyon tuğla duvarlar üzerinde performans değerlendirmesi ile sınırlandırılmıştır. Farklı boyutlarda ve özelliklerde tuğla duvarlar ile almalı duvarlar üzerinde ticari enjeksiyon şerbetlerinin performans analizleri ile bu çalışma kapsamında yer almayan reolojik özelliklerden olan enjeksiyon şerbetinin vizkosite ve su tutma özellikleri de araştırma konuları arasında değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] Ekşi-Akbulut, D., (2006). Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılacak Harçların Seçimine Yönelik Bir Öneri, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] Carta del Restauro Tüzüğü, (1932).
www.icomos.org.tr/Dosyalar/ICOMOSTR_0691053001353672473.doc, 27 Ocak 2016.
- [3] ICOMOS, (1964). Venedik Tüzüğü,
www.icomos.org/venicecharter2004/turkish.pdf, 27 Ocak 2016.
- [4] Yüzer, N., Oktay, D., Ulukaya, S. ve Gökyiğit-Arpacı, Y., (2015). "Mechanical Behavior of Two-Wythe Brick Masonry Walls Injected with Hydraulic Lime Grout", REHAB 2nd International Conference on Preservation, Maintenance and Rehabilitation of Historical Buildings and Structures, 2:879-889, 22-24 July 2015, Porto.
- [5] Miltiadou-Fezans, A., Kalagri, A. ve Delinikolas, N., (2007). "Design of Hydraulic Grout and Application Methodology for Stone Masonry Structures Bearing Mosaics and Mural Paintings: The Case of the Katholikon of Dafni Monastery", International Symposium Studies on Historical Heritage, 649-656, Yıldız Technical University, Antalya.
- [6] Uranjek, M., Bosiljkov, V., Zarnic, R. ve Bokan-Bosiljkov, V., (2011). "In Situ Tests and Seismic Assessment of A Stone-Masonry Building", Materials and Structures, 45(6):861-879.
- [7] UNESCO, (1976). "Recommendation Concerning the Safeguarding and Contemporary Role of Historic Areas", Records of the General Conference Nineteenth Session, 26 October to 30 November 1976, Nairobi.
- [8] Arun, G., (2011). Yığma Yapı Davranışı, Ders Notu, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] Ekşi-Akbulut, D. ve Yüzer, N., (2013). Tarihi Yapılarda Malzeme Özellikleri, Yayınlanmamış Ders Notu, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] Eriç, M., (2002). Yapı Fiziği ve Malzemesi, 2.Baskı, Literatür yayınları, İstanbul.
- [11] Er, A. C., (2013). "Geleneksel Harman Tuğlası ve Üretimi", Mesleki Bilimler Dergisi, 2(2):61-70.

- [12] Ünal, O., (2012). Yapı Malzemesi, Ders Notu, AKÜ Mühendislik Fakültesi, Afyon.
- [13] Arcasoy, A., (1983). Seramik Teknolojisi, 2. Baskı, Marmara Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Seramik Anasanat Dalı Yayınları, İstanbul.
- [14] Bayraktar, A., (2006). Tarihi Yapıların Analitik İncelenmesi ve Sismik Güçlendirme Metotları, Cilt No: 975-2955-87-8, Beta Yayınları, İstanbul.
- [15] Dabanlı, Ö., (2008). Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [16] Çiftçi, A. ve Yergün, U. (2012). Osmanlı Mimarlığının Modernleşme Sürecinde Temel Bir Yapı Malzemesi: Tuğla. Modernite ve Mimari, 177-191, Esenler Belediyesi Şehir Düşünce Merkezi Şehir Yayınları, İstanbul.
- [17] Arseven, C.E., (1965). Sanat Ansiklopedisi, Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları, İstanbul, 372.
- [18] Yergün, U., (2002). Batılılaşma Dönemi Mimarisinde Yapım Teknolojisindeki Değişim ve Gelişim, Doktora Tezi (yayımlanmamış), YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] Chamaky, R. Y., (2014). Tarihi Yığma Yapıların Deprem Analizi ve Uygun Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [20] Ünay, A.İ., (2002). Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, ODTÜ Mimarlık Fakültesi Yayınları, Ankara.
- [21] TS EN 771-1:2011+A1, (2015). Kagir Birimler - Özellikler - Bölüm 1: Kil Kagir Birimler, TSE, Ankara.
- [22] Kuban, D., (2010). Mimarlık Kavramları-Tarihsel Perspektif İçinde Mimarlığın Kuramsal Sözlüğüne Giriş, Yapı Endüstri Merkezi Yayınları, İstanbul.
- [23] Çamlıbel, N., (1983). Geleneksel Yapılarda Stabilitenin İyileştirilmesi, YTÜ Mimarlık Fakültesi, İstanbul.
- [24] TS EN 459-1, (2012). Yapı Kireci - Bölüm 1: Tarifler Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara.
- [25] Böke, H., Akkurt, S. ve İpekoğlu, B., (2004). "Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı ve Sıvalarının Özellikleri" Yapı Dergisi, 269 : 90-95, İstanbul.
- [26] Postacıoğlu, B., (1981). Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri - İç Yapı ve Mekanik Özellikler, Cilt 1, İTÜ Yayınları, İstanbul.
- [27] TS EN 459-2, (2010). Yapı Kireci - Bölüm 2: Deney Metodları, TSE, Ankara.
- [28] TS EN 196-1, (2009). Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini, TSE, Ankara.
- [29] Bayülke, N., (1992). Yığma Yapılar, T.C. İmar ve İskan Bakanlığı Deprem Araştırma Enstitüsü, Ankara.

- [30] Kara, H. G., (2009). Tarihi Yığma Yapıların Taşıyıcı Sistemleri Güvenliğinin İncelenmesi Onarımı ve Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [31] Eldem, S. H., (2000). Yapı Birinci Seri, ISBN: 975-511-000-3, Birsen Yayınevi, İstanbul
- [32] Ching, F.D.K., (1995). A Visual Dictionary of Architecture, ISBN: 0-471-28451-3, John Wiley & Sons Inc, New York.
- [33] Ching, F.D.K. ve Adams, C., (2001). Building Construction Illustrated, John Wiley & Sons Inc, New York.
- [34] Ahunbay, Z., (1999). Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon, Yapı Endüstri Merkezi Yayınları, İstanbul.
- [35] Croci, G., (2000). The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage, Computational Mechanics Publications, Great Britain.
- [36] Aköz, A. H., (2008). Deprem Etkisi Altındaki Tarihi Yığma Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [37] Karakuş, F., (2012). Geleneksel Yığma Yapılarda Strüktürel Sorunlar ve Çözüm Yolları, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [38] Bayülke, N., (1984). Depremde Hasar Gören Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi, T.M.M.O.B. İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara.
- [39] Aköz, F., (1989). Teras Çatılardaki Çok Katlı Su Tutucu Tabakanın Servis Ömrünü Tahmin İçin Matematiksel Model Oluşturulması, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [40] Aköz, F., (2005). "Suyun Yapılara Zararlı Etkileri ve Yalıtım", Tesisat Enerji Teknolojileri ve Mekanik Tesisat Dergisi, 111: 150-160.
- [41] Vatan-Kaptan, M., (2010). Anıtsal Yığma Binalarda Risk Düzeyinin Tespitine İlişkin Bir Öndeğerlendirme Yöntemi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [42] Kuzuimamlar, D., (1995). Kagir Tarihi Yapılarda Nem Problemlerinin Teşhis ve Çözümü, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [43] Kocataşkın, F., (2000). Yapı Malzemesi Bilimi, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [44] Coşgun, N., İpekçi, C.A. ve Yılmaz, Y., (2002). "Yapı Hatalarının Analizi", 1.Ulusal Malzeme Kongresi ve Sergisi, TMMOB Mimarlar Odası Büyükşehir Şubesi, İstanbul.
- [45] Mahrabel, H. A., (2006). Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Özellikleri Hasarlar Onarım ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [46] Aköz, F., (2005). "Yığma Kagir Yapılarda Hasar Tespiti", YDGA 2005, ODTÜ Ankara.

- [47] Özşen,G., Aköz, F., Yüzer, N. ve Özkaraman, M., (1998). Küçük Ayasofya Camii Taşıyıcı Sistem ve Malzeme Özelliklerinin Araştırılması, YTÜ Araştırma Fonu Bitirme Raporu, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [48] Güleç, A., (1992). Bazı Tarihi Anıt Harç ve Sıvalarının İncelenmesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [49] Küçükkaya, A., (2004). Taşların Bozulma Nedenleri Koruma Yöntemleri, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [50] Kılıç, A., (2003). "Tarihi Eserlerin Yangın Talihsizliği", İnşaat Life, 1:64-67, İstanbul.
- [51] Koçu, N., (1995). "Yapı Dış Kabuğunda Oluşan Hasar ve Kusurları Önleme Önerileri", Yapı Endüstri Merkezi Bildirileri, İstanbul.
- [52] TS EN 12504-1, (2011). Beton - Yapıda Beton Deneyleri - Bölüm 1: Karot Numuneler - Karot Alma Muayene ve Basınç Dayanımının Tayini, TSE, Ankara.
- [53] Sesigür, H., Çelik O. C. ve Çılı, F., (2007). "Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Bileşenler, Hasar Biçimleri, Onarım ve Güçlendirme", İstanbul Bülten, 89: 10-21.
- [54] Aköz, F. ve Yüzer, N., (2005). "Tarihi Yapılarda Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesinde Uygulanan Yöntemler", Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, İnşaat Mühendisleri Odası Antalya Şubesi, Antalya.
- [55] Testo,Nem Ölçüm Cihazları, https://www.testo.com.tr/resources/9b/20/ac4d9a8059ca-testo-635-control-drying-process-wall_t12r.jpg, 13 Ocak 2016.
- [56] Krstevska, L., Tashkov, L. J., Arun, G. and Aköz, F., (2007). "Evaluation of Seismic Behaviour of Historical Monuments", International Symposium Studies on Historical Heritage, September 17-21, Antalya.
- [57] Aköz, F., Yüzer, N., Çakır, Ö., Kabay, N., Kızılkant, A. ve Özçiftçi, N., (2004). Temel Yapı Malzemesi Deneyleri, Y.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İnşaat Bölümü, Basım Yayın Merkezi, İstanbul.
- [58] Costanzo, A., Minasi, M., Casula, G., Musacchio, M. ve Buongiorno, M. F., (2014). "Combined Use of Terrestrial Laser Scanning and IR Thermography Applied to a Historical Building", Sensors, 15(1): 194-213, Italy
- [59] ASTM C 1196-92, (Reapproved 1997). Standard Test Method for In Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flatjack Measurements, USA.
- [60] Yüzer, N., (2015). Tarihi Yapıların Tuğla Duvar Özgün Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi ve Yük Altında Davranışının Model Deneylerle Araştırılması, TÜBİTAK 1001 Kodlu Araştırma Projesi, Proje No: 111M568
- [61] Arslan, F., (2006). Depremden Zarar Görmüş Tarihi Yapıların Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [62] TS EN 1015-10/A1, (2013). Kagit Harcı - Deney Metotları - Bölüm 10: Sertleşmiş Harcın Boşluklu Kuru Birim Hacim Kütlesinin Tayini, TSE, Ankara.

- [63] Toydemir, N., Gürdal, E. ve Tanaçan, L., (2000). Yapı Elemanı Tasarımında Malzeme, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- [64] Kahya, Y., (1992). İstanbul Bizans Mimarisinde Kullanılan Tuğlanın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [65] TS EN 1015-18, (2004). Kagit Harcı - Deney Yöntemleri - Bölüm 18: Sertleşmiş Harcın Kapiler Etkiden Kaynaklanan Su Emme Katsayısının Tayini, TSE, Ankara.
- [66] TS EN 1015-11, (2000). Kagit harcı - Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini, TSE, Ankara.
- [67] Oktay, D. ve Yüzer, N., (2013). "Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılan Enjeksiyon Yönteminin (Grout) Değerlendirilmesi", 4. Tarihi Yapıların Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, 27-29 Kasım 2013, İstanbul.
- [68] Saraylı, A., (1987). Yapı Malzemeleri Bilimi, ders notu, YTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [69] Uyan, M., (1975). Beton ve Harçlarda Kılcallık Olayı, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul.
- [70] Ellis, P., (2002). The Analysis of Mortar, The Past 20 years, <http://www.buildingconservation.com/articles/mortar/mortar.htm>, 20 Ocak 2016.
- [71] Yergün, U., (2002). Batılılaşma Dönemi Mimarisinde Yapım Teknolojisindeki Değişim ve Gelişim, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [72] Jokilehto, J., (2002). A History of Architectural Conservation, ISBN: 075-0655-11-9, Butterworth-Heinemann.
- [73] Güler, M. ve Ekinci, Y., (2010). "Tarihi Çevre Korumanın Yönetmel Boyutu ve Alan Yönetimi", Çağdaş Yerel Yönetimler, 19(3): 1-24.
- [74] ICOMOS, <http://www.icomos.org.tr/?Sayfa=Icerik&ayrinti=Icomos&dil=tr>, 27 Ocak 2016.
- [75] ICOMOS, (1995). Suomenlinna Kararları: Anıtlar, Topluluklar ve Alanlar, <http://www.kumid.net/euproject/admin/userfiles/dokumanlar/K-Suomenlinna-Kararlari,-ICCROM,-1995.pdf>, 27 Ocak 2016.
- [76] ICOMOS, (1994). Nara Özgünlük Belgesi, http://www.icomos.org.tr/Dosyalar/ICOMOSTR_0280118001353669454.pdf, 04 Mayıs 2016.
- [77] ICOMOS, (1999). ICOMOS Geleneksel Mimari Miras Tüzüğü, http://www.icomos.org.tr/Dosyalar/ICOMOSTR_0901543001353670596.pdf, 27 Ocak 2016.
- [78] Eriş, M. Ü., (2012). Asar-ı Atika Nizamnamelerinden 2863 Sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanununa Mevzuatın Karşılaştırmalı Bir İncelemesi, Uzmanlık Tezi, T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü, Ankara.

- [79] Akıncı, F. N., (2000)., Geleneksel Sivil Mimarının Sosyo-Kültürel ve İşlevsellik Bağlamında Tarihsel Sürekliliği için Planlama/Finans Modeli, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [80] Mardan, E., (2001). Kültürel Varlıkların Korunması, ODTÜ Mimarlık Fakültesi, Ankara.
- [81] ICOMOS Türkiye, (2013). ICOMOS Türkiye Mimari Mirası Koruma Bildirgesi, http://www.icomos.org.tr/Dosyalar/ICOMOSTR_0623153001387886624.pdf, 28 Ocak 2016.
- [82] Wong, K. H., (2006). Assessment of the Grout Used for the Structural Stabilization of the Early Phrygian Citadel Gate at Gordion Turkey, Master of Science Thesis, University of Pennsylvania, Graduate Program in Historic Preservation, USA.
- [83] BASF-Yapı Kimyasalları, (2008). Tarihi Yapı Onarım ve Güçlendirme Rehberi.
- [84] Harris, C. M., (2000). Dictionary of Architecture and Construction, Mc Graw-Hill, New York.
- [85] Ignoul, S., Van Gemert, D. ve Van Rickstal, F., (2003). "Application of Mineral Grouts for Structural Consolidation of Historical Monuments" International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, 9(4):365-382.
- [86] Binda, L., Moderna, C., Baroni, G. ve Gelmi, A., (1994). "Experimental Qualification of Injection Admixtures Use for Repair and Strengthening of Stone Masonry Walls", 10th International Brick & Block Masonry Conference, July 5-7 1994, Calgary, Canada.
- [87] Ferragni, D., Forti, M., Malliet, J., Teutonico, J. M. ve Torraca, G., (1984). "Injection Grouting of Mural Paintings and Mosaics", Adhesive Consolidants, IIC: 110-116, Paris.
- [88] Peroni, S., Tersigni, C., Torraca, G., Cerea, M., Forti, M., Guidobaldi, F., Rossi-Doria, P., De Rege, A., Picchi, D., Pietrafitta, F.J. ve Benedetti, G., (1981). "Lime-based Mortars for the Repair of Ancient Masonry and Possible Substitutes", Mortars, Cements and Grouts Used in the Conservation of Historic Buildings, November 3-6 1981, Rome.
- [89] Mora, L., Mora, P., Torraca, G. ve Bonito, V. A., (1986). "A Coordinated Methodology for the Treatment and Study of the Peristyle Garden Wall of the House of Menander, Pompeii: An Interim Report", Case Studies in the Conservation of Stone and Wall Paintings, IIC Conference, September 21-26 1986, Bologna.
- [90] Unger, P., Getty Images, House of Menander <http://www.gettyimages.com/photos/house-ofmenander?family=creative&license=rm&phrase=House%20of%20Menander&sort=best&excludenudity=true>, 25 Ocak 2016.
- [91] Teutonico, J. M., Mc Caig, I., Burns, C., Ashurst, J., (1994). "The Smeaton Project: Factors Affecting the Properties of Lime-Based Mortars", APT Bulletin, 3(4):34-49.

- [92] Binda, L., (1990). "Repair of Masonries by Injection Technique: Effectiveness, Bond and Durability Problems", Structural Conservation of Stone Masonry - International Technical Conference, ICCROM, Athens.
- [93] Binda, L., Modena, C., Baronio, G., Abbaneo, S., (1997). "Repair and Investigation Techniques for Stone Masonry Walls", Construction and Building Materials, 11(3):133-142, Great Britain
- [94] Toumbakari, E., Van Gemert, D. ve Tassios, T. P., (2000). "Methodology for the Design of Injection Grouts for Consolidation of Ancient Masonry", International RILEM Workshop on Historic Mortars: Characteristics and Tests, May 12-14 2000, Paisely, Scotland.
- [95] Valuzzi, M. R., (2005). "Requirements for the Choice of Mortar and Grouts for Consolidation of Three-Leaf Stone Masonry Walls", RILEM Workshop on Repair Mortars for Historic Masonry, Delft.
- [96] Vintzileou, E. ve Miltiadou-Fezans, A., (2007). "Mechanical Properties of Three-Leaf Stone Masonry Grouted with Ternary of Hydraulic Lime-Based Grouts", Science Direct, Engineering Structures 30:2265-2276.
- [97] Kalagri, A., Miltiadou-Fezans, A. ve Vintzileou, E., (2010). "Design and Evaluation of Hydraulic Lime Grouts for the Strengthening of Stone Masonry Historic Structures", Materials and Structures, 43:1135-1146.
- [98] Bras, A. ve Henriques, F. M. A., (2008). "The Influence of the Mixing Procedures on the Optimization of Fresh Grout Properties", Materials and Structures, 42:1423-1432.
- [99] Bras, A., Henriques, F. M. A. ve Cidade, M. T., (2010). "Effect of Environmental Temperature and Fly Ash Addition in Hydraulic lime Grout Behaviour", Construction and Building Materials, 24:1511-1517.
- [100] Oliveira, D. V., Silva, R. A., Garbin, E. ve Lourenço, P. B., (2012). "Strengthening of Three-Leaf Stone Masonry Walls: An Experimental Research, Materials and Structures, 45:1259-1276.
- [101] Luso, E. ve Lourenço, P. B., (2016). "Experimental Characterization of Commercial Lime Based Grouts for Stone Masonry Consolidation", Construction and Building Materials, 102:216-225.
- [102] Adami, C. E., Vintzileou, E., Mouzakis, C., Badogiannis, E. ve Kalagri, A., (2012). "The Effect of Hydraulic Lime Pozzolan Grouts on the Mechanical Properties of Three-Leaf Stone Masonry in Compression", 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, October 15-17 2012, 1:751-759, Poland.
- [103] Uranjek, M., Zarnic, R., Bokan-Bosiljkov, V. ve Bosiljkov, V., (2012). "Performance of NDT, MDT and DT Techniques in Assessing the Effectiveness of Grouting", 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, October 15-17 2012, 3:2544-2551, Poland.
- [104] Miltiadou-Fezans, A. ve Tassios, T. P., (2012). "Fluidity of Hydraulic Grouts for Masonry Strengthening", Materials and Structures, 45:1817-1828.

- [105] Miltiadou-Fezans, A. ve Tassios, T. P., (2012). "Stability of Hydraulic Grouts for Masonry Strengthening", *Materials and Structures*, 46:1631-1652.
- [106] Miltiadou-Fezans, A. ve Tassios, T. P., (2013). "Penetrability of Hydraulic Grouts", *Materials and Structures*, 46:1653-1671.
- [107] Baltazar, L. G., Henriques, F. M. A., Jorne, F. ve Cidade, M. T., (2014). "Combined Effect of Superplasticizer, Silica Fume and Temperature in the Performance of Natural Hydraulic Lime Grouts", *Construction and Building Materials*, 50: 584-597.
- [108] Van Rickstal, F., Leuven, K. U., Toumbakari, E. E., Ignoul S. ve Van Gemert, D., (2003). "Development of Mineral Grouts for Consolidation Injection", *Katholieke Universiteit Leuven Publications*, Belgium.
- [109] Papayianni, I., Stefanidou, M. ve Pacht, V., (2010). "Grouts for Injection of Historical Masonries: Influence of the Binding System and Other Additions on the Properties of the Matrix", 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop, 22-24 September 2010, Prague, Czech Republic.
- [110] Baltazar, L., Henriques, F. M. A. ve Jorne, F., (2012). "Optimisation of Flow Behaviour and Stability of Superplasticized Fresh Hydraulic Lime Grouts Through Design of Experiments", *Construction and Building Materials*, 35: 838–845.
- [111] Baltazar, L., Henriques, F. M. A. ve Jorne, F., (2012). "Hydraulic Lime Grouts for Masonry Injection- Effects of Admixtures on the Fresh Grout Properties", 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, October 15-17 2012, 2: 1763-1770, Poland.
- [112] Badogiannis, E., Miltiadou, A., Kalagri, A., Ipsilanti, E., Dedeloudis, C. ve Vintzileou, E., (2012). "Mix Design and Performance Evaluation of Grouts with Superfine Natural Pozzolan", 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, October 15-17 2012, 1: 773-780, Poland.
- [113] Luso, E. ve Monteiro, A., (2014). "Study of the Influence of Adjuvant on Performance of Lime-based Grouts", 9 Congresso Nacional de Mecânica Experimental, October 15-17 2014, Aveiro, Portugal.
- [114] Vakıflar Dergisi, (2010). Sayı:34, Vakıflar Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- [115] Uz-Taşkesen, A. N., (2011). "Amasya II. Bayezıt Camisi Şadırvanı Duvar Resimlerinin Restorasyonu ve İkonografik Çözümlemesi", *Vakıflar Dergisi*, Sayı:35, Vakıflar Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- [116] Yar, M. ve Küçük, C., (2014). "Sivas Çifte Minareli Medrese Minarelerinin ve Taç Kapısının Restorasyonu", *Vakıf Restorasyon Yıllığı*, Sayı:8, Vakıflar Genel Müdürlüğü İstanbul 1. Bölge Müdürlüğü, İstanbul.
- [117] Sesigür, H. ve Çılı, F., (2014). "Edirnekapı Mihrimah Sultan Camisinde Yapılan Onarım ve Güçlendirme Çalışmaları", *Vakıf Restorasyon Yıllığı*, Sayı:9, Vakıflar Genel Müdürlüğü İstanbul 1. Bölge Müdürlüğü, İstanbul.

- [118] Ersen, A., Olgun, N., Akbulut, S. S., Şenyurt-Yıldırım, B., (2011). "Süleymaniye Camii 2007-2010 Yılları Restorasyonu ve Restorasyon Kararları", Vakıf Restorasyon Yıllığı, Sayı:3, Vakıflar Genel Müdürlüğü İstanbul 1. Bölge Müdürlüğü, İstanbul.
- [119] Çebi, M. Y., (2010). "Bir Restorasyon Öyküsü Pertevniyal Valide Sultan Camii", Vakıf Restorasyon Yıllığı, Sayı:1, Vakıflar Genel Müdürlüğü İstanbul 1. Bölge Müdürlüğü, İstanbul.
- [120] Ceylan, O. ve Ocakcan, T. K., (2013). "Fatih Camii 2007-2012 Restorasyonu Uygulamaları", Vakıf Restorasyon Yıllığı, Sayı:7, Vakıflar Genel Müdürlüğü İstanbul 1. Bölge Müdürlüğü, İstanbul.
- [121] Alioğlu, E. F. ve Aydemir, O., (2012). "Nuruosmaniye Cami ve 2010-2012 Yılları Restorasyonu", Vakıf Restorasyon Yıllığı, Sayı:5, Vakıflar Genel Müdürlüğü İstanbul 1. Bölge Müdürlüğü, İstanbul.
- [122] Alioğlu, E. F., Aydemir, O. ve Sünnetçi, E., (2012). "Haseki Hürrem Sultan Külliyesi 2010-2012 Yılları Restorasyonu", Vakıf Restorasyon Yıllığı, Sayı:4, Vakıflar Genel Müdürlüğü İstanbul 1. Bölge Müdürlüğü, İstanbul.
- [123] Eriş, İ., Yüzereroğlu, U. Ve Demir, N., (2013). "Atik Valide Külliyesi 201-2013 Yılları Restorasyonu ve Uygulamaları", Vakıf Restorasyon Yıllığı, Sayı:6, Vakıflar Genel Müdürlüğü İstanbul 1. Bölge Müdürlüğü, İstanbul.
- [124] Ayvalık Rahmi Koç Müzesi,
www.rmk-museum.org.tr/taksiyarhis/restorasyon.html, 04.Mayıs.2016.
- [125] Van Rickstal, F., (2000). Grout Injection of Masonry- Specific Approach and Modeling, PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- [126] Binda, L., Saisi, A. ve Tedeschi, C., (2006). Compatibility of Materials Used for Repair of Masonry Buildings: Research and Applications, Fracture and Failure of Natural Building Stones - Applications in the Restoration of Ancient Monuments, Springer, Netherlands.
- [127] Valuzzi, M., Binda, L. ve Modena, C., (2002). "Experimental and Analytical Studies for the Choice of Repair Techniques Applied to Historic Buildings", Materials and Structures, 37(5): 285-292.
- [128] Collepardi, M., (1990). "Degredation and Restoration of Masonry Walls of Historical Buildings, Materials and Structures, 23: 81-102.
- [129] Penazzi, D., Valuzzi, M. R., Saisi, A., Binda, L. ve Modena, C. (2001). "Repair and Strengthening of Historic Masonry Buildings in Seismic Areas", International Congr. of More Than Two Thousand Years in The History of Architecture Safe Guarding The Structure of Our Architectural Heritage, 2(5): 1-6, Bethlehem, Palestine.
- [130] Uranjek, M., Zarnic, R., Bokan-Bosiljkov, V. ve Bosiljkov, V., (2010). "Problems Related to Grout Injection of Heritage Buildings Walls", 8th International Masonry Conference, July 4-7 2010, Dresden.
- [131] BASF-Yapı Kimyasalları, (2015). Tarihi Yapı Onarım ve Güçlendirme Rehberi.

- [132] TS EN 459-2, (2012). Yapı Kireci – Bölüm 2: Deney Yöntemleri, TSE, Ankara.
- [133] Papayianni, I. ve Pachta, V., (2014). "Experimental Study on the Performance of Lime-Based Grouts Used in Consolidating Historic Masonries", Materials and Structures, Published online.
- [134] Bras, A. ve Henriques, F.M.A., (2012). "Natural Hydraulic Lime Based Grouts – The selection of Grout Injection Parameters for Masonry Consolidation", Construction and Building Materials, 26: 135-144.
- [135] TS EN 1015-6, (2000). Kagit Harcı için Deney Metotları - Bölüm 6: Taze Harcın Boşluklu Birim Hacim Kütlesinin Tayini, TSE, Ankara.
- [136] TS EN 445, (2012). Şerbet-Öngerilmeli Tendonlar İçin Deney Yöntemleri, TSE, Ankara.
- [137] ASTM D 6910, (2009). Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Clay Construction Slurries, USA.
- [138] TS EN 447, (2012). Şerbet-Öngerilmeli Tendonlar İçin Temel Gereklere, TSE, Ankara.
- [139] ASTM C 940, (2010). Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory, USA.
- [140] Lombardi, G., (1985). "The Role of Cohesion in Cement Grouting of Rock", 15th Congress on Large Dams, Luasanne, Switzerland.
- [141] Bras, A., Henriques, F. M. A. ve Cidade, M. T., (2013). "Rheological Behaviour of Hydraulic Lime-Based Grouts. Shear-Time and Temperature Dependence" Mechanics Time-Dependent Materials, 17:223–242.
- [142] BS EN 1771, (2004). Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures - Test Methods - Determination of Injectability and Splitting Tests, British Standards, United Kingdom.
- [143] Chaudhry, C., (2007). Evaluation of Grouting as a Strengthening Technique for Easthen Structures in Seismic Areas Case Study Chiripa, Master of Science Thesis, University of Pennsylvania, Pennsylvania.
- [144] Güldal, E., Altaş, G.K. ve Özgünler, S.A., (2010). "İstanbul'da Bulunan Erken Bizans Dönemi Dini Yapılarında Kullanılan Horasan Harçlarının Özelliklerinin İncelenmesi" Restorasyon-Konservasyon-Arkeoloji ve Sanat Yıllığı, 1:63-72.
- [145] Ulukaya, S., Yüzer, N., Selçuk, M.E. ve Yıldırım, M., (2012). "Tarihi Kireç Harçlarının Tanımlanmasında Uygulanan Deney Yöntemlerinin İrdelenmesi", Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliğinde 100. Yıl Teknik Kongresi, İstanbul.
- [146] TS EN 15801, (2010). Kültürel Varlıkların Korunması - Deney Metotları - Suyun Kılcal Emiliminin Tayini, TSE, Ankara.
- [147] Jorne, F., Henriques, F.M.A. ve Baltazar, L.G., (2014). "Evaluation of Consolidation of Different Porous Media with Hydraulic Lime Grout Injection" Journal of Cultural Heritage, Article in Press.

- [148] Valuzzi M. R., (2004). "Behavior and Modeling of Strengthened Three-Leaf Stone Masonry Walls" Materials and Structures, 37:184-192.
- [149] ASTM C 943, (2010). Standard Practice for Making Test Cylinders and Prisms for Determining Strength and Density of Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory, USA.
- [150] TS EN 13286-43, (2004). Bağlayıcısız ve Hidrolik Bağlayıcılı Karışımlar-Bölüm 43: Deney Metodu Hidrolik Bağlayıcılı Karışımların Elastiklik Modülünün Tayini, TSE, Ankara.
- [151] Moropoulou, A., Bakolas, A. ve Anagnostopoulou, S., (2005). "Composite Materials in Ancient Structures", Cement and Concrete Composites, 27:295-300.
- [152] TS EN 1015-2, (2000). Kagit Harcı - Deney Metotları - Bölüm 2: İmalatta Kullanılan Harç Yığınlarından Numune Alma ve Deney için Hazırlama, TSE, Ankara.
- [153] TS EN 12504-4, (2012). Beton Deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik Darbe Deneyi, TSE, Ankara.
- [154] Türk Dil Kurumu, (2007). BSTS / Kimya Terimleri Sözlüğü (II).
- [155] Türk Dil Kurumu, (2010). BSTS / İnşaat Terimleri Sözlüğü.
- [156] Türk Dil Kurumu, (1998). BSTS / Biyoloji Terimleri Sözlüğü.
- [157] FONO, (2002). İngilizce-Türkçe Teknik Terimler Sözlüğü, FONO Yayınları Sözlük Dizisi, İstanbul.
- [158] İnşaat Terimleri Sözlüğü,
www.sozluk.insaatbolumu.com/terimler/puzolan-nedir/ ,09.Mayıs.2016.
- [159] Hasol, D., (2009). Mimarlık Cep Sözlüğü, Yapı-Endüstri Merkezi Yayınları, İstanbul.

**TARİHİ YIĞMA YAPILARIN ONARIMINDA KULLANILAN ENJEKSİYON
MALZEMESİ İLE ÜRETİLEN NUMUNELERİN REOLOJİK VE FİZİKSEL DENEY
SONUÇLARI**

Tarihi yığma yapıların onarımı için kullanılan G1 ve G2 ticari enjeksiyon malzemelerinden üretilen şerbetlerin taze birim ağırlık sonuçları Çizelge Ek-A.1'de verilmiştir.

Tarihi yığma yapıların onarımı için kullanılan G1 ve G2 ticari enjeksiyon malzemelerinden üretilen şerbetlerin akışkanlık (akış konisi ve marsh hunisi) deney sonuçları Çizelge Ek-A.2'de verilmiştir.

Tarihi yığma yapıların onarımı için kullanılan G1 ve G2 ticari enjeksiyon malzemelerinden üretilen şerbetlerin hacim sabitliği (terleme) ve penetrasyon (kum kolonu) deney sonuçları ise Çizelge Ek-A.3'te verilmiştir.

Her numune en az 3 kez test edilmiş, tüm ölçümler $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ortam sıcaklığı ve $\%40\pm 5$ bağıl nemde gerçekleştirilmiştir.

Tarihi yığma yapıların onarımı için kullanılan G2 ticari enjeksiyon malzemesinin üretiminin ardından 28 gün kür koşullarında bekledikten sonra uygulanan kılcal su emme deneyi sonuçları Çizelge Ek-A.4'te verilmiştir. Deneyler 3 adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge Ek-A.1 G1 ve G2 enjeksiyon şerbetlerinin karıştırma prosedürleri ve taze birim ağırlık sonuçları

	Su/Bağlayıcı oranı	Kimyasal Katkı (%)	Karıştırma Hızı (rpm)	Karıştırma Süresi	Birim Ağırlık (g/cm ³)
G1-01	0.30	-	500-600	4 dk karıştırıldı, 4 dk beklendi, 30 s karıştırıldı.	1.83±0.02
G1-02	0.30	-	2000	4 dk karıştırıldı, 4 dk beklendi, 30 s karıştırıldı.	1.83±0.02
G1-03	0.30	1.0	2000	%90su+toz 4dk karıştırıldı, %10su+Süper akışkanlaştırıcı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı.	1.85±0.02
G1-04	0.35	1.5	2000	%90su+toz 4dk karıştırıldı, %10su+Süper akışkanlaştırıcı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı	1.79±0.02
G1-05	0.40	-	2000	4 dk karıştırıldı, 4 dk beklendi, 30 s karıştırıldı.	1.70±0.01
G1-06	0.40	1.0	2000	%90su+toz 4dk karıştırıldı, %10su+Süper akışkanlaştırıcı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı	1.71±0.01
G1-07	0.40	1.2	2000	%90su+toz 4dk karıştırıldı, %10su+Süper akışkanlaştırıcı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı	1.71±0.01
G1-08	0.40	1.5	800	%90su+toz 4dk karıştırıldı, %10su+Süper akışkanlaştırıcı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı	1.72±0.01
G1-09	0.40	1.5	2000	%90su+toz 4dk karıştırıldı, %10su+Süper akışkanlaştırıcı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı	1.72±0.01
G1-10	0.45	-	2000	8 dk 30 s karıştırıldı	1.66±0.01
G1-11	0.45	1.5	2000	%90su+toz 4dk karıştırıldı, %10su+Süper akışkanlaştırıcı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı	1.67±0.01
G1-12	0.50	-	2000	4 dk karıştırıldı, 4 dk beklendi, 30 s karıştırıldı.	1.60±0.01
G1-13	0.50	-	2000	8 dk 30 s karıştırıldı	1.60±0.01
G1-14	0.50	1.0	2000	%90su+toz 4dk karıştırıldı, %10su+Süper akışkanlaştırıcı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı	1.61±0.01
G1-15	0.60	-	2000	8 dk 30 s karıştırıldı	1.57±0.01
G2-01	0.30	-	500-600	4 dk karıştırıldı, 4 dk beklendi, 30 s karıştırıldı.	-*
G2-02	0.30	-	2000	8 dk 30 s karıştırıldı	1.82±0.01
G2-03	0.50	1.0	2000	%90su+toz 4dk karıştırıldı, %10su+Süper akışkanlaştırıcı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı	1.65±0.01
G2-04	0.50	-	2000	8 dk 30 s karıştırıldı	1.64±0.01
G2-05	0.60	1.0	2000	%90su+toz 4dk karıştırıldı, %10su+Süper akışkanlaştırıcı 30s de eklendi, 4dk karıştırıldı	1.58±0.01
G2-06	0.60	-	2000	8 dk 30 s karıştırıldı	157±0.01

*Ölçüm yapılamamıştır

Çizelge Ek-A.2 G1 ve G2 enjeksiyon şerbetlerinin akışkanlık (akış konisi, marsh hunisi) deneyleri sonuçları

	Akışkanlık			
	Akış Konisi d=10mm (t ₀ , s)	Akış Konisi d=10mm (t ₃₀ , s)	Marsh Hunisi d=4.7mm (t ₀ , s)	Marsh Hunisi d=4.7mm (t ₃₀ , s)
Standard	TS EN 445 / TS EN 447		ASTM D 6910	
Adı				
Limit	<25	0.8x t ₀ ≤t ₃₀ ≤ x1.2t ₀	<45*	
Değer				
G1-01	44±0.5	30±0.5	348±5	200±3
G1-02	18±0.5	16±0.5	253±5	196±4
G1-03	19±0.5	14.5±0.5	152±4	103±4
G1-04	14±0.5	12±0.5	74±3	60±3
G1-05	9.5±0.5	9.5±0.5	48±2	46±2
G1-06	9.5±0.5	9.5±0.5	47±2	45±2
G1-07	9±0.5	9±0.5	45±1	45±1
G1-08	11±0.5	10±0.5	60±2	47±2
G1-09	9±0.5	8.5±0.5	45±1	42±1
G1-10	8±0.5	7.5±0.5	33±1	34±1
G1-11	8±0.5	8±0.5	33±1	32±1
G1-12	7.5±0.5	8±0.5	24±1	29±1
G1-13	7.5±0.5	7.5±0.5	24±1	27±1
G1-14	7.5±0.5	7.5±0.5	27±1	26±1
G1-15	7.5±0.5	7.5±0.5	23±1	27±1
G2-01	_**			
G2-02	45±1	28±1	370±2	157±1
G2-03	10±0.5	9±0.5	43±1	34±1
G2-04	9.5±0.5	9±0.5	40±2	35±2
G2-05	8±0.5	7.5±0.5	28±1	25±1
G2-06	8±0.5	7.5±0.5	28±1	25±1

*Limit değer literatür verilerine göre belirlenmiştir

**Ölçüm yapılamamıştır

Çizelge Ek-A.3 G1 ve G2 enjeksiyon şerbetlerinin hacim sabitliği (terleme) ve penetrasyon (kum kolonu) deneyleri sonuçları

	Hacim Sabitliği				Penetrasyon (kum kolonu)	
	Terleme (1.s, %)	Terleme (2.s, %)	Terleme (3.s, %)	Terleme (24.s,%)	T ₃₆ , (s)	Enjekte edilebilirlik
Standard	TS EN 445 / ASTM C 940				BS EN 1771	
Adı						
Limit	<3*				<50*	Geçebilirlik kolay
Değer						/mümkün/zor
G1-01	0	0	1±0.2	5.5±0.5	Grout ilerlemedi	Geçebilirliği zor
G1-02	0	0	1.3±0.2	7 ±0.4	Grout ilerlemedi	Geçebilirliği zor
G1-03	0	0	1.7±0.2	1.3±0.5	Grout ilerlemedi	Geçebilirliği zor
G1-04	0	0.5±0.1	1.8±0.2	1.3±0.5	Grout ilerlemedi	Geçebilirliği zor
G1-05	0.8±0.1	1.2±0.2	1.9±0.2	9.3±0.5	Grout ilerlemedi	Geçebilirliği zor
G1-06	0.9±0.1	1.3±0.2	1.9±0.2	1.5±0.4	Grout ilerlemedi	Geçebilirliği zor
G1-07	1.0±0.2	1.3±0.2	2.0±0.2	1.4±0.4	Grout ilerlemedi	Geçebilirliği zor
G1-08	1.2±0.2	1.6±0.2	2.0±0.2	1.3±0.4	Grout ilerlemedi	Geçebilirliği zor
G1-09	0.8±0.2	1.3±0.2	2.1±0.2	1.3±0.4	T ₃₆ ya ulaşmadı	Geçebilirliği zor
G1-10	1.2±0.2	1.8±0.2	2.3±0.2	12.5±0.2	Grout ilerlemedi	Geçebilirliği zor
G1-11	1.3±0.1	2.4±0.2	2.6±0.2	1.4±0.4	T ₃₆ ya ulaşmadı	Geçebilirliği zor
G1-12	1.5±0.2	2.3±0.2	2.6±0.2	14.1±0.2	-	-
G1-13	1.4±0.2	1.8±0.2	2.1±0.2	13.6±0.4	T ₃₆ ya ulaşmadı	Geçebilirliği zor
G1-14	1.5±0.2	2.5±0.2	2.7±0.2	1.6±0.4	7.5±1	Geçebilirliği kolay
G1-15	1.6±0.2	2.7±0.2	3.2±0.2	16.1±0.4	8.5±1	Geçebilirliği kolay
G2-01	- **					
G2-02	0	0	0	0	Grout ilerlemedi	Geçebilirliği zor
G2-03	0.4±0.1	0.7±0.1	0.7±0.1	5.2±0.4	T ₃₆ ya ulaşmadı	Geçebilirliği zor
G2-04	0.4±0.1	0.8±0.1	1±0.2	2.4±0.4	T ₃₆ ya ulaşmadı	Geçebilirliği zor
G2-05	0.7±0.1	1.1±0.2	2.5±0.3	11.5±0.5	6±1	Geçebilirliği kolay
G2-06	0.8±0.1	0.9±0.1	1.8±0.5	2.6±0.5	6±1	Geçebilirliği kolay

*Limit değer literatür verilerine göre belirlenmiştir

**Ölçüm yapılamamış

Çizelge Ek-A.4 G2 enjeksiyon malzemesi ile üretilen numunelerin kılcal su emme deneyi sonuçları

	G2-06-1	G2-06-2	G2-06-3	Ortalama
a kenarı, (m)	0.04082	0.04071	0.04034	-
b kenarı, (m)	0.03945	0.03957	0.03966	-
Alan , A (m²)	0.00161	0.00161	0.00160	-
Kuru Tartım, W₀ (kg)	0.2754	0.2747	0.2733	0.2745
W₆₄ (kg)	0.2814	0.2804	0.2791	0.2803
W₁₄₄ (kg)	0.2845	0.2832	0.2820	0.2832
W₂₅₆ (kg)	0.2874	0.2860	0.2847	0.2860
W₅₇₆ (kg)	0.2924	0.2905	0.2893	0.2907
W₁₀₂₄ (kg)	0.2975	0.2952	0.2941	0.2956
W₁₆₀₀ (kg)	0.3021	0.2998	0.2989	0.3003
W₂₅₀₀ (kg)	0.3076	0.3052	0.3048	0.3059
W₃₆₀₀ (kg)	0.3136	0.3112	0.3112	0.3120
W₇₂₀₀40.82 (kg)	0.3877	0.3854	0.3853	0.3861

19.YÜZYIL TUĞLA YAPILARA ÖRNEKLER, CUNDA



Şekil EK-B.1 19. Yüzyıl tuğla yapı örnekleri ve tuğla detayları, Cunda-Balıkesir, 2016
(Fotoğraf: E. Yasemin Gökyiğit Arpacı)

SÖZLÜK

ADERANS: Farklı molekülleri birarada tutan çekim veya kuvvet.Yapışma, bağlanma, adezyon [154]

AGREGA: Kum, çakıl, kırmataş gibi yapı malzemelerinin adı [155]

DESİKATÖR: Örneklerden suyun çekilmesi ve maddenin kuru hâlde kalması için, içinde nem alıcı madde bulunan, sıkı kapanan kap, kurutma kabı [156], kurutma aygıtı, kurutucu [157]

ENJEKTE EDİLEBİLİRLİK: Boşluk içerisine sıvı verebilme, zerk edebilme [155]

ETÜV: Maddeleri ısıtmak ve kurutmak için kullanılan en fazla 200 °C'ye çıkabilen cihaz [155]

GRANÜLOMETRİ: Kum, çakıl, kırmataş gibi yapı malzemelerin elek analizleri sonucunda tane dağılımlarının belirlenmesi, tane ölçüm [155], tane boyutu dağılımı [157]

KAPİLARİTE: Kılcallık [155]

KAROT: Yapılardan özel aygıt (karotiyer) ile alınan silindirik örnek [155]

PENETRASYON: İçine işlemek, içine girmek, içinden geçmek [154], girim, nüfuz [157]

POROZİTE: Gözeneklilik [157], bir boşluğun birim dolu hacmine oranı [155]

PUZOLAN: Kendi başlarına bağlayıcı özelliği bulunmayan, ancak ince öğütülmüş halde ve rutubetli ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girip bağlayıcı özelliğe sahip bileşenler meydana getiren silisli veya silisli ve alüminli malzemeler [158], (İtalya'daki Pozzuoli kentinin adından) Normal sıcaklıkta kireçle birleşerek su karşısında sertleşme

yeteneği kazanan ve bu özelliğinden dolayı da bağlayıcı olarak kullanılan bir çeşit volkanik toprak [159]

REOLOJİK ÖZELLİKLER: Maddenin akış ve biçim bozulması ile ilgili özellikleri [154], akışbılım özellikleri [157]

RÖTRE: Malzemenin taze haldeyken içerdii suyun ortam rutubetine bırakıldığında buharlaşma yolu ile kaybolması sonucu malzemenin büzülmesi [155]

RÖTRE ÇATLAKLARI: Malzemedede rötre sonucu oluşan çatlaklar [155], Büzülme nedeniyle oluşan çatlak, büzülme çatlağı [159]

VİZKOSİTE: Bir sıvımsı maddenin akmaya karşı gösterdiği karşı koyma [155], ağdalılık, akışmazlık, kıvamlılık [157]

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Enise Yasemin GÖKYİĞİT ARPACI
Doğum Tarihi ve Yeri : 24.02.1983, İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : yasemingokyigit@gmail.com, yasemin@gokyigit.com.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Mimarlık	Yeditepe Üniversitesi	2008
Lise	Fen Bilimleri	Kadıköy Anadolu Lisesi	2002

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011- devam ediyor.	Gökyiğit Aydınlatma Mimarlık	Mimar
2010-2011	Gökyiğit International Cam Sanayi	Tasarımcı
2009-2010	NLine Mimarlık	Mimar

YAYINLARI

Makale

1. Gökyiğit-Aracı, E. Y., Yüzer, N., Oktay, D., Ulukaya, S., Ekşi-Akbulut, D., (2016). "Performance Evaluation of the Lime-Based Grout Used for Consolidation of Brick Masonry Walls", Construction and Building Materials, (Hakem İncelemesinde).

Bildiri

1. Yüzer, N., Oktay, D., Ulukaya, S. and Gökyiğit-Aracı, E. Y., (2015). "Mechanical Behavior of Two-Wythe Brick Masonry Walls Injected with Hydraulic Lime Grout", REHAB 2nd International Conference on Preservation, Maintenance and Rehabilitation of Historical Buildings and Structures, 2:879-889, 22-24 July 2015, Porto.

ÖDÜLLERİ

1. En İyi Bildiri Ödülü (2015). Yüzer, N., Oktay, D., Ulukaya, S. and Gökyiğit-Aracı, E. Y., (2015). "Mechanical Behavior of Two-Wythe Brick Masonry Walls Injected with Hydraulic Lime Grout", REHAB 2nd International Conference on Preservation, Maintenance and Rehabilitation of Historical Buildings and Structures, 2:879-889, 22-24 July 2015, Porto.