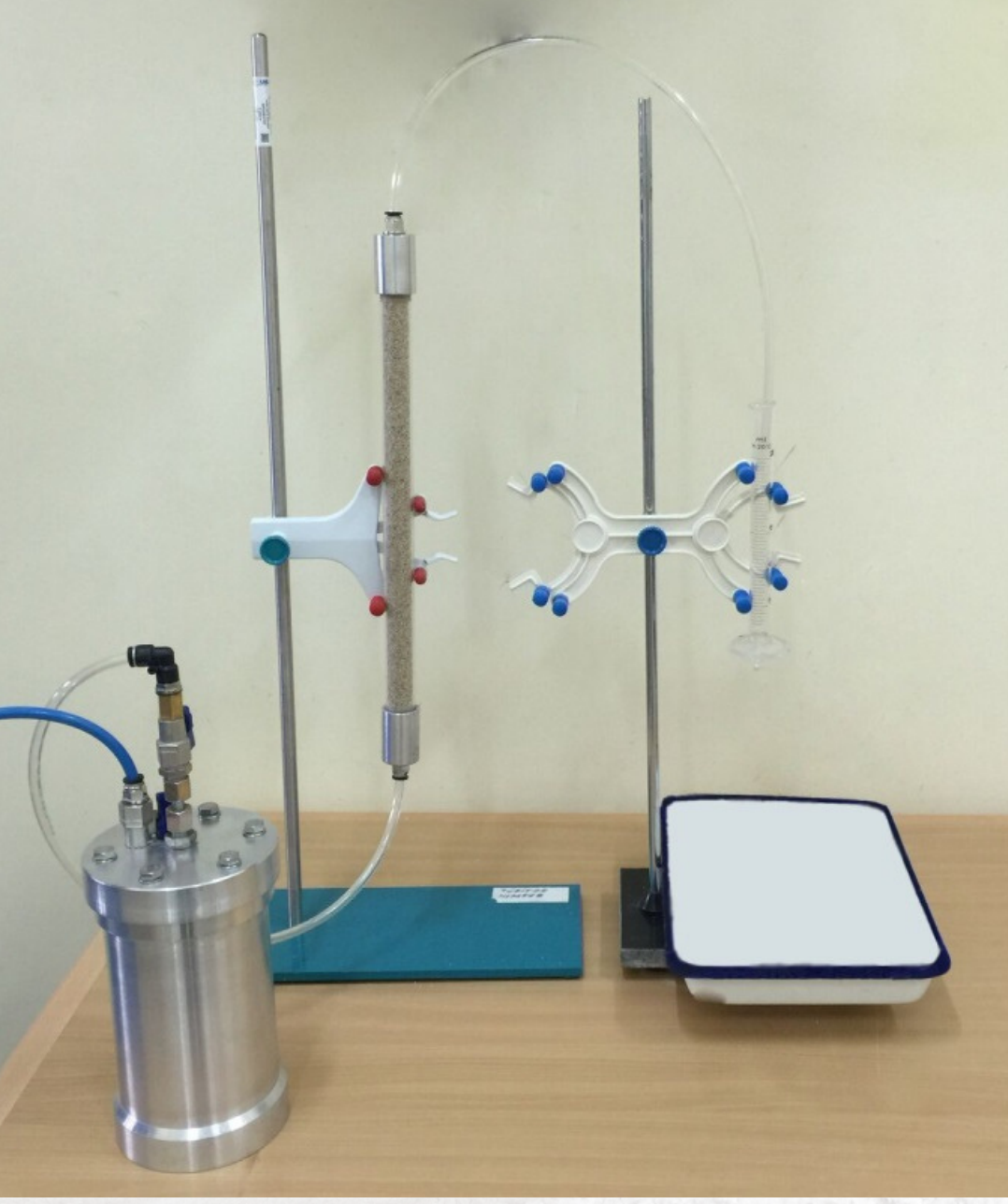


TARİHİ YAPILARDA ENJEKSİYON

PROF.DR. NABİ YÜZER
DR.ÖĞR.ÜYESİ DİDEM OKTAY



ÖNSÖZ

Enjeksiyon uygulaması tarihi yapıların onarım ve sağlamlaştırılmasında kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Bununla birlikte önemli taşınmaz kültürel mirasa sahip ülkemizde, tarihi yapıların onarım ve koruma işlemlerinde, uygulama öncesi ve sonrası gereken deneysel araştırmaların yapılmadığı görülmektedir. İlgili yasa ve yönetmeliklerde, tarihi yapıların korunması için yapılan onarım, koruma ve sağlamlaştırma çalışmalarında, yapının tarihi değerinin, mimari özelliklerinin ve malzeme özgünlüğünün korunmasına vurgu yapılmış olmakla birlikte, enjeksiyon uygulaması konusunda yayınlanmış ulusal ve uluslararası yönetmelik bulunmamaktadır. Enjeksiyon uygulaması genellikle sağlamlaştırma sırasında kullanılan bir onarım tekniği olup geri dönüşü olmayan bir yöntemdir. Bu yöntem ile yığma yapılardaki pasif çatlaklar ve boşluklar uygun malzeme ile doldurulmak suretiyle elemanlar arası süreksizlikler giderilerek, yapının yekpare çalışması amaçlanır. Bu kitapta, başarılı bir enjeksiyon uygulaması için laboratuvar ve yapıda uygulanması gereken çalışmalara yer verilmiş, uygulayıcı ve denetleyicilere öneriler getirilmiştir.

Bu konudaki çalışmalarımıza, “Enjeksiyon Yöntemi (Grouting) ile Onarılmış Tarihi Tuğla Duvarların Yük Altında Davranışının İncelenmesi” adlı, 114M256 no’lu projeyi destekleyerek katkıda bulunan TÜBİTAK Araştırma Destek Programları Mühendislik Araştırma Grubu’na ve “Tarihi Kireç Harçlarına Uygun Enjeksiyon Malzemelerinin Üretilmesi ve Model Duvarlarda Uygulanmasının Değerlendirilmesi” başlıklı, 2014-05-01-DOP02 no’lu araştırma projemizi destekleyen Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ) Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü’ne teşekkür ederiz.

Bizleri bu konuda çalışmalara yönlendiren Prof. Dr. Fevziye Aköz ve Prof. Dr. Görün Arun’a ve desteklerini hep yanıımızda hissettiğimiz ailelerimize şükranlarımızı sunarız.

Kitapta görülen muhtemel hata ve eksiklikleri tarafımıza bildirecek olan tüm okurlara ve kitabın basımını üstlenen Yıldız Teknik Üniversitesi’ne içtenlikle teşekkür ederiz.

Prof. Dr. Nabi YÜZER ve Dr. Öğr. Üyesi Didem OKTAY
İstanbul, 2020

“Yıkmak insanlara yapmak gibi kıymet mi verir?
Onu en olpa herifler de, emin ol, becerir.
Sâde sen gösteriver “işte budur kubbe!” diye,
İki ırgadla iner şimdi Süleymâniyye.
Ama gel kaldıralım dendi mi, heyhât, o zaman,
Bir Süleyman daha lâzım yeniden, bir de Sinan.”

Mehmet Akif Ersoy

İÇİNDEKİLER

		Sayfa
	ÖNSÖZ	i
	ŞEKİL LİSTESİ	v
	ÇİZELGE LİSTESİ	vii
	SİMGELER	viii
	1.BÖLÜM GİRİŞ	1
	2.BÖLÜM TARİHİ YAPILARIN ONARIMINDA KULLANILAN ENJEKSİYON MALZEMELERİ	3
2.1	Bağlayıcı Malzemeler	3
2.1.1	Kireç	4
2.1.1.1	Hava Kireci	5
2.1.1.2	Hidrolik Kireç	5
2.1.2	Puzolanlar	7
2.1.2.1	Doğal Puzolanlar	8
2.1.2.2	Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu	8
2.1.2.3	Uçucu Kül	8
2.1.2.4	Silis Dumanı	9
2.1.2.5	Horasan	9
2.2	Kimyasal Katkılar	10
	3.BÖLÜM ENJEKSİYON MALZEMELERİNİN TAZE HALDEKİ ÖZELLİKLERİ	11
3.1	Akışkanlık	11
3.2	Hacim Sabitliği	12
3.3	Penetrasyon	12
3.4	Su Tutma Kapasitesi	14
3.5	Viskozite ve Eşik Kayma Gerilmesi	14
	4.BÖLÜM ENJEKSİYON MALZEMELERİNİN SERTLEŞMİŞ HALDEKİ ÖZELLİKLERİ	17
4.1	Fiziksel Özellikler	17
4.1.1	Kılcal Su Emme	17
4.1.2	Görünür Yoğunluk, Gerçek Yoğunluk ve Porozite	18
4.1.3	Ağırlıkça ve Hacimce Su Emme	19
4.1.4	Boşluk Parametreleri	19
4.2	Renk Analizi	20
4.3	Kimyasal ve Mineralojik Analizler	20
4.3.1	Suda Çözünebilir Tuz Analizleri	21

4.3.2	XRF Analizi ile Kimyasal Kompozisyonun Belirlenmesi	22
4.3.3	XRD ve FTIR Analizi ile Mineralojik Kompozisyonun Belirlenmesi	22
4.4	Dayanıklılık Özellikleri	24
4.4.1	Donma-Çözülme Deneyi	24
4.4.2	Sülfat Etkisi	25
4.5	Mekanik Özellikler	26
4.5.1	Eğilme ve Basınç Deneyi	26
4.5.2	Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Belirlenmesi.....	27
4.6	Model Duvar Deneyleri	28
	5.BÖLÜM YAPIDA ENJEKSİYON UYGULAMASI VE YAPILAN DENEYLER	30
5.1	Tahribatsız Deneyler	31
5.2	Yarı Tahribatlı Deneyler	33
	KAYNAKLAR	37

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa
Şekil 1.2	Enjeksiyon tekniğinin uygulama yöntemi	2
Şekil 2.1	Yapı kirecinin TS EN 459-1'e göre sınıflandırılması	4
Şekil 2.2	Hegzagonal kristal yapıdaki serbest kireç	7
Şekil 2.3	Çimento ve cürufun 2000 büyütme SEM görüntüsü	8
Şekil 2.4	Uçucu kül ve silis dumanının 2000 büyütme SEM görüntüsü	9
Şekil 2.5	Frattini deneyi sonuçları	10
Şekil 3.1	a) Akış Konisi, b) Marsh Hunisi	11
Şekil 3.2	a) Fitol göstergeli deney, b) Terleme deneyi	12
Şekil 3.3	Kum kolonu deneyi	13
Şekil 3.4	Silindir enjeksiyon deneyi	14
Şekil 3.5	Su tutma kapasitesinin belirlenmesi	14
Şekil 3.6	Reometre ve farklı ölçüm uçları	15
Şekil 3.7	Enjeksiyon malzemelerinin akma eğrileri	15
Şekil 3.8	Enjeksiyon malzemelerinin viskozite eğrileri	16
Şekil 3.9	Plastik viskozite-akış süresi arasındaki ilişki	16
Şekil 4.1	Kılcal su emme deneyi	17
Şekil 4.2	Enjeksiyon malzemelerine ait örnek Qi-ti grafiği	18
Şekil 4.3	Civalı porozimetre ve numuneye enjekte edilen hazne	19
Şekil 4.4	Görsel analiz için spektrofotometre ile renk ölçümü	20
Şekil 4.5	Donma (a) çözülme (b) etkisine maruz bırakılan numuneler	24
Şekil 4.6	a) 1. Çevrimde hasar gören hava kireci içeren enjeksiyon m. b) 12. Çevrimde çatlak oluşan hidrolik kireç içeren enjeksiyon m.	24
Şekil 4.7	a) Sülfat çözeltisindeki numuneler b) Etüvde kurutulan numuneler c) Oda sıcaklığında soğumaya bırakılan numuneler ..	25
Şekil 4.8	a) 4. Çevrimde tamamen dağılan hava kireci içeren enjeksiyon malzemesi, b) 11. Çevrimde çatlak oluşan hidrolik kireç içeren enjeksiyon malzemesi	25
Şekil 4.9	Sülfat etkisine maruz kalan e. malzemesinin SEM görüntüsü	26
Şekil 4.10	Eğilme ve basınç deneyi	26
Şekil 4.11	Elastisite modülü ve poisson oranının belirlenmesi	27
Şekil 4.12	Enjeksiyon malzemesine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği	27
Şekil 4.13	Bir enjeksiyon malzemesinin yanal birim şekil değiştirme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği	27
Şekil 4.14	Model duvarda oluşturulan diyagonal çatlak	28
Şekil 4.15	Model duvarda enjeksiyon uygulaması	29
Şekil 4.16	Uygulama sonrası deney ve sonuçları	29
Şekil 4.17	Model duvar üzerinde a) yapı radarı ölçümü ve b) ultrases ölçümü	29
Şekil 5.1	Duvar üzerinde radar uygulaması	31

Şekil 5.2	Uygulama öncesi ve sonrası yapı radarı görüntüleri.....	32
Şekil 5.3	Ultrases aleti ile a) doğrudan ölçüm ve b) dolaylı ölçüm.....	32
Şekil 5.4	Ultrases aleti ile çatlak derinliği ve çatlak yönünün belirlenmesi ..	33
Şekil 5.5	İnfrared tomografi yöntemi ile elde edilen görüntü	33
Şekil 5.6	Çift plaka ile ölçüm	34
Şekil 5.7	Kayma deneyi düzeneği	34
Şekil 5.8	Tekli flat-jack ile yerinde basınç gerilmesinin belirlenmesi	35

ÇİZELGE LİSTESİ

		Sayfa
Çizelge 2.1	Kalsiyum kireci için kimyasal gerekler	5
Çizelge 2.2	Dolomitik kireç için kimyasal gerekler	5
Çizelge 2.3	Doğal hidrolik kirecin kimyasal gerekleri ve basınç dayanımları	6
Çizelge 2.4	Tasarlanmış kireç için kimyasal gerekler	6
Çizelge 2.5	Tasarlanmış kirecin basınç dayanımları	6
Çizelge 2.6	Hidrolik kirecin kimyasal gerekleri ve basınç dayanımları	6
Çizelge 2.7	Hidrolik ve bağlayıcılık indeksine göre kireç sınıfları	7
Çizelge 4.1	Enjeksiyon malzemesinde spot tuz testi sonuçları	21
Çizelge 4.2	Bazı enjeksiyon malzemelerinin XRF analizi sonuçları	22
Çizelge 4.3	Bazı enjeksiyon malzemelerinin XRD analizi sonuçları	23
Çizelge 4.4	FTIR spektrumlarında yer alan kimyasal gruplar ve dalga boyları	23

SİMGELER

A	Kesit alanı
A_n	Duvarın net harçlı kesit alanı
a^*	Kırmızı/yeşil koordinatı (+ a^* kırmızılığı, - a^* yeşilliği gösterir)
a_s	Ağırlıkça su emme
b^*	Sarı/mavi koordinatı (+ b^* sarılığı, - b^* maviliği gösterir)
β	Malzemenin görünür yoğunluğu
CL	Kalsiyum kireci
CH	Kalsiyum hidroksit
CSH	Kalsiyum silikat hidrate
CI	Bağlayıcılık indeksi
DL	Dolomitik kireç
d	Boşluk çapı
$\Delta E^*_{2,1}$	2 Ölçüm arasındaki toplam renk farkı
ΔL^*	Rengin açıklık farkı
Δa^*	Kırmızı/yeşil farkı
Δb^*	Sarı/mavi farkı
FL	Tasarlanmış kireç
f_c	Basınç dayanımı
f_e	Eğilme dayanımı
ϕ	Civanın numuneye temas açısını
γ	Malzemenin gerçek yoğunluğu
γ_g	Yüzey gerilimi
HL	Hidrolik kireç
h_0	İlk yükseklik
h_s	Hacimce su emme
h_w	Terleme suyunun yüksekliği
i	Hidrolik indeksi
I	Enjekte edilebilirlik değeri
L^*	Açıklık koordinatı (0 (siyah) – 100 (beyaz) arasında)
m	Kalıbı dolduran enjeksiyon malzemesinin ağırlığı
m_0	Numunenin kuru ağırlığı
m_i	t_i anında numunenin ağırlığı
μ	Sürtünme katsayısı
NHL	Doğal hidrolik kireç
P	Basınç
P	Kırılma yükü
P_{CE}	Basınç kuvveti
p	Porozite
ρ	Enjeksiyon malzemesinin yoğunluğu
ρ_{su}	Suyun yoğunluğu
σ_v	Normal gerilme
t	Malzemenin kalıbın üst yüzüne çıkma süresi
t_0	Akış süresi
T_{36}	Malzemesinin 36 cm uzunluğundaki tüpün üst kısmına ulaştığı süre
τ	Kayma dayanımı indeksi
τ_0	Kayma indeksi
τ_{me}	Yığma duvarın kayma dayanımı

V_{net}	Numunenin net hacmi
V_v	Silindirin toplam boşluk hacmi
W_0	Numunenin kuru ağırlığı
W_{SH}	Suya doymun haldeki numunenin havadaki ağırlığı
W_{SS}	Suya doymun haldeki numunenin su içindeki ağırlığı

1. BÖLÜM

GİRİŞ

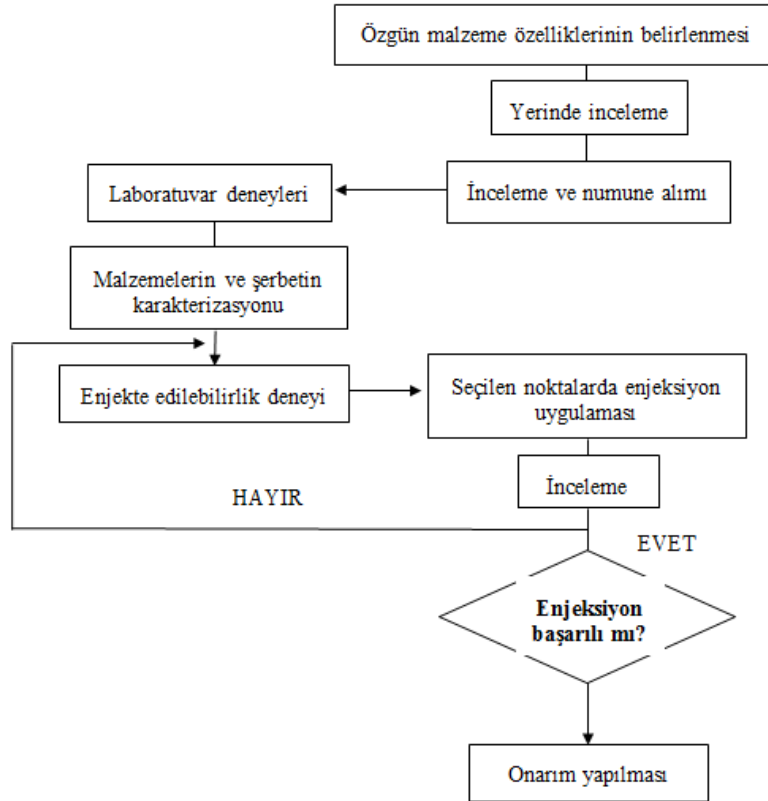
Yüzyıllardır ayakta kalabilmiş olan tarihi yapılar çeşitli nedenlerle; yapının fonksiyonu, yapım tekniği, yörenin koşulları ve sonradan gördüğü onarımlara bağlı olarak bozulmalara uğrayabilir ve hasar görebilirler. Tarihi mirasın korunmasına yönelik müdahalelerde yapının özgünlüğünün tüm boyutlarıyla korunması ve bu bağlamda kullanılacak malzemelerin ilgili proje özelinde tanımlanacak testler ile belirlenmesi gerektiği saptanmıştır. Onarım sırasında kullanılacak yeni malzemeler özgün malzemeler ile uyumlu olmalı, bu sayede aksi durumda oluşabilecek yeni hasarlardan kaçınılmalıdır. Onarımda genel ilke öncelikle yapının hasar görmesine neden olan faktörleri ortadan kaldırmak ve ardından hasarlı bölgeye müdahalede bulunmaktır (Akbulut vd., 2018).

Tarihi yığma yapılar hem yatay hem de düşey yükler etkisinde davranış olarak zayıf yönleri olan yapılardır. Duvarları çok fazla tabakadan oluşmuş olup iç yüzeydeki zayıf malzemeler, boşluklar ve elemanlar arasındaki zayıf bağlantılar nedeniyle bu tip yapılarda duvarlar yapıdan ayrılma eğilimi göstermektedir. Bu tip yapılar için en uygun onarım ve güçlendirme tekniği enjeksiyon yöntemidir. Bu yöntem duvar içine belirli bir basınçla, temel olarak bağlayıcı ve sudan oluşan akışkan bir enjeksiyon malzemesinin enjekte edilmesidir. Enjekte edilen bu harcın boşlukları ve çatlakları doldurması hedeflenmektedir. Böylece yapının yekpare davranışı sağlanır (Baltazar vd., 2015a).

Bu yöntem, hasarlı yapıların morfolojik özelliklerini ya da yük taşıma kapasitelerini değiştirmeksizin süreklilik, uyum ve gücünü yeniden kazanmasını sağlar. Enjeksiyon yöntemi geri dönüşümü olmayan bir işlem olması nedeniyle enjeksiyon malzemesinin tasarımı ve yapılarda uygulanma yöntemi oldukça önemlidir. Bu nedenle enjeksiyon malzemesi uygulanmadan önce ve uygulama sonrasında malzemenin enjekte edilebilirlik yeteneği, mekanik ve dayanıklılık özellikleri de göz önünde bulundurularak test edilmeli; yapı türüne, boyutlarına, doğal malzeme özelliklerine, çatlak genişliğine, boşluk dağılımına uygun olup olmadığı kontrol edilmelidir (Kalagri vd., 2010). Kullanılan enjeksiyon malzemesi (grout) tarihi yapılardaki özgün malzemeye uygun olarak kullanıldığı müddetçe, çağdaş restorasyon kuramı oluşturmak için yapılan düzenlemelerin en önemlilerinden olan Venedik Tüzüğü tarafından da kabul gördüğü belirtilmiştir (Van Rickstal, 2000).

Yapılan araştırmalar sonucunda enjeksiyon yöntemi uygulanırken uyulması gereken adımlar Şekil 1.1’de verilmiştir (Binda et al., 1997; Oktay 2017). Buna göre tarihi yapılarda enjeksiyon yöntemi kullanılarak yapılacak onarım ve sağlamlaştırma çalışmaları kapsamında, başarılı bir uygulama yapılması ve uygunluğunun değerlendirilmesi için uygulama öncesinde (i) tarihi yapının özgün malzeme özellikleri belirlenmeli (ii) enjeksiyon malzemelerinin üretiminde kullanılacak malzemelerin inceliğine karar vermek için uygulama yapılacak tarihi yapıdaki boşluk dağılımı

belirlenmeli (iii) yapıdaki çatlak genişlikleri ölçülmeli (iv) özgün malzeme özelliklerine uygun enjeksiyon şerbeti üretilmeli, çatlak genişliğine bağlı olarak gerektiğinde kireç esaslı nano hidrolik kireç içeren enjeksiyon malzemesi kullanılmalı (v) enjeksiyon malzemelerinin akışkanlık ve geçebilirlik özellikleri gibi fiziksel özelliklerinin yanı sıra yeni üretilen malzemelerin mekanik, kimyasal, mineralojik ve dayanıklılık özellikleri incelenmeli ve uygunluğu araştırılmalı (vi) Flatjack yöntemi ile elemanın gerilme-şekil değiştirme davranışı, elastisite modülü ve poisson oranı gibi malzeme parametreleri belirlenmeli (vii) kayma deneyi ile kayma dayanım indeksi belirlenmeli (viii) uygun aralık, derinlik ve açılarda delikler açıldıktan sonra eleman üzerine borular yerleştirilerek uygulama öncesi hazırlıklar tamamlanmalı (ix) malzemelerin karıştırma süresi, karıştırma hızı, kimyasal katkının sürece dahil edilmesi gibi ön deneyler ile belirlenen prosedürün şantiyede titizlikle uygulandığı denetlenmeli (x) uygulamalar enjeksiyon için en uygun ortam sıcaklığı olan 20-30 °C sıcaklıklarda ve enjeksiyon malzemesi üretilir üretilmez gerçekleştirilmeli (xi) onarım gören elemanda uygulama sonrası boşluk dağılımını belirlemek ve enjeksiyonun ne ölçüde başarılı olduğunu görmek için boşluk dağılımı tekrar belirlenmeli; bu amaçla yapı radarı ve ultrases ölçüm tekniklerinden yararlanılmalı (xii) kullanılan enjeksiyon malzemesi gerekli dayanıma ulaştıktan sonra tahribatsız ve yarı tahribatlı deneyler tekrarlanarak malzeme değişkenleri ve elemanın davranışı incelenmeli (xiii) onarım yapılmadan önceki veriler ile karşılaştırma yapılarak kullanılan yöntemin ve malzemenin uygunluğu irdelenmelidir.



Şekil 1.1 Enjeksiyon tekniğinin uygulama yöntemi (Binda vd., 1997)

Uygulama öncesi ve sonrası yapılacak çalışmalar; taze ve sertleşmiş haldeki özgün malzemeye uygun kireç esaslı enjeksiyon malzemesi üzerinde yapılması gereken deneyler; başarılı bir uygulama için dikkate alınması gereken hususlar, uygulama sonrası yapı üzerinde enjeksiyon performansının değerlendirilmesi için gereken deneysel çalışmalar bu kitapta açıklanmıştır.

2. BÖLÜM

TARİHİ YAPILARIN ONARIMINDA KULLANILAN ENJEKSİYON MALZEMELERİ

Tarihi yapılardaki özgün malzeme özelliklerinin çeşitlilik göstermesi sebebi ile hasar görmüş tarihi yapıda kullanılacak olan enjeksiyon malzemesinin seçiminde, her yapıya özel durumun belirlenmesi gerekir. Seçilen malzeme özgün malzemeye, estetik, fiziksel, termo-fiziksel, kimyasal, mineralojik ve mekanik özellikler bakımından uyumlu olmalıdır. Tarihi yapıların onarımında kullanmak üzere tasarlanan farklı enjeksiyon malzemelerinin bileşenleri aşağıda açıklanmıştır.

2.1 Bağlayıcı Malzemeler

Enjeksiyon malzemeleri; bileşiminde bağlayıcı malzeme, su ve kimyasal katkı içeren, akışkan özellikte malzemelerdir. Kullanım amaçlarına ve yerlerine bağlı olarak çeşitli enjeksiyon malzemeleri üretilmektedir. Enjeksiyon malzemelerinde kullanılan bağlayıcılar organik ve inorganik olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır. Tarihi yapıların onarımında çoğunlukla inorganik bağlayıcı enjeksiyon malzemeleri kullanıldığı için, bu bölümde inorganik bağlayıcılar detaylı olarak açıklanmıştır. Kireçler, çimentolar ve bu malzemelerin puzolan ile birlikte kullanıldığı tüm karışımlar inorganik bağlayıcı enjeksiyon malzemeleridir.

Hidrolik özellik göstermeyen hava kireçli enjeksiyon malzemeleri, dayanım kazanmak için CO₂ varlığına ihtiyaç duymaktadır fakat CO₂'in yapıya girmesi yavaş ilerleyen bir süreçtir. Bu durum, malzemenin sertleşmesini ve dolayısıyla dayanım kazanmasını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle, yapıların onarımında hava kireci kullanılarak üretilen enjeksiyon malzemeleri tercih edilmemelidir (Bras, 2011; Biçer-Simsir vd., 2009).

Hidrolik bağlayıcı enjeksiyon malzemeleri, özgün malzeme ile uyumlu olduğu durumda enjeksiyon işlemi için daha uygun malzemelerdir. Çimento ve hidrolik kireç esaslı olmak üzere iki temel kategoride incelenebilir. Sadece çimento kullanılan enjeksiyon malzemeleri tarihi yapıların özgün malzemeleri ile fiziksel, kimyasal ve mekanik açıdan uyumlu olmadığı ve tuz hasarlarına neden olduğu için tarihi yapıların onarımında kullanılmamalıdır. Bu tip malzemelerin, enjekte edilebilirlik özelliklerinin küçük çatlakları onarmak için yetersiz olduğu da kanıtlanmıştır (Vintzileou ve Miltiadou-Fezans, 2008; Eklund ve Stille, 2008; Axelsson vd., 2009).

Hidrolik kireç esaslı enjeksiyon malzemeleri, fiziksel, kimyasal, mineralojik ve mekanik açıdan özgün malzemeye en yakın olan malzemeler olduğu için tarihi yapıların onarımında yaygın olarak tercih edilmektedir (Valluzzi, 2005; Jorne vd., 2015a; Bras ve Henriques, 2012; Jorne vd., 2015b; Vintzileou ve Miltiadou-Fezans, 2008; Papayianni ve Pacht, 2015; Jorne vd., 2014; Xu vd., 2015; Baltazar vd.,

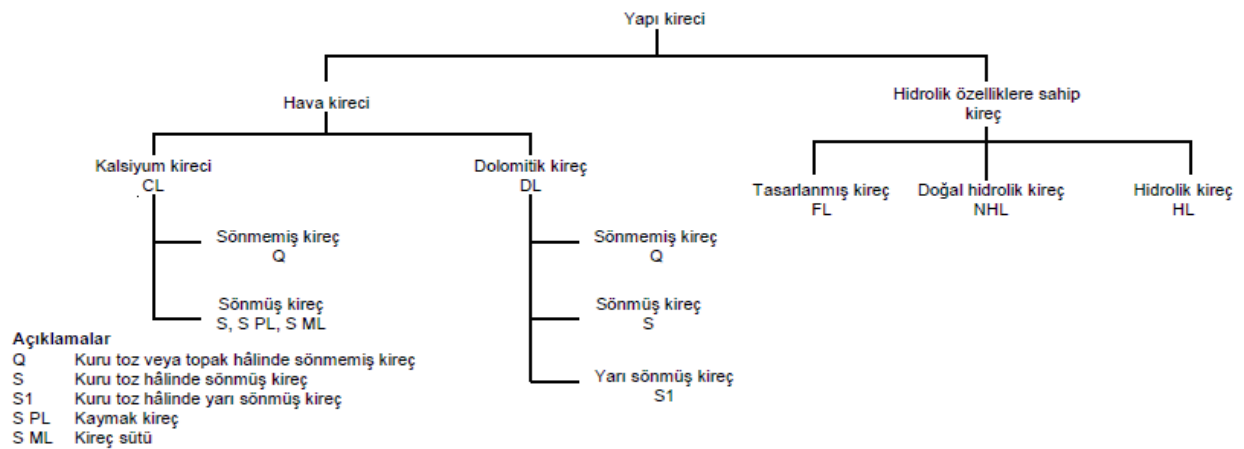
2013a; Baltazar vd., 2012, Baltazar vd., 2015a). Yapılan araştırmalarda hidrolik kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin enjekte edilebilirlik ve reolojik özellikleri incelenerek; karışım oranları, optimum kimyasal katkı oranı, karışım süresi ve karışım hızı gibi parametreler hakkında çalışmalar yapılmıştır (Jorne vd., 2015a; Bras ve Henriques, 2012; Jorne vd., 2015b; Baltazar vd., 2012, Baltazar vd., 2015a). Malzemelerin tasarımı yapılırken enjekte edilebilirlik özelliklerinin yanı sıra mekanik özellikler de göz önünde bulundurularak su oranları seçilmelidir.

Yapay ya da doğal puzolan ilavesinin hidrolik kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerine etkisini incelemek amacıyla düşük oranda uçucu kül ve silis dumanı içeren enjeksiyon malzemeleri de üretilmiştir (Bras ve Henriques, 2012; Baltazar vd., 2015a; Bras vd., 2010; Bras ve Henriques, 2013; Baltazar vd., 2014; baltazar vd., 2013b). Uçucu kül, küresel tane şekli sayesinde enjeksiyon malzemesinin akışkanlık ve eşik kayma gerilmesi gibi taze özelliklerini iyileştirmekte ancak basınç dayanımının azalmasına neden olmaktadır. Silis dumanı ilavesi ise basınç dayanımını arttırmasına rağmen enjeksiyon malzemesinin reolojik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir (Baltazar vd., 2015b). Daha ince çatlakların doldurulabilmesi için nano hidrolik kireç üretimi çalışmaları da sürdürülmektedir (Oktay vd., 2020).

Bizans ve Osmanlı dönemi yapılarının malzeme özellikleri incelendiğinde horasan harcının yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu yığma yapıların onarımında kullanılacak enjeksiyon malzemesinin de özgün malzemeye uygun olarak kireç ve horasandan (tuğla tozu) oluşması gerekir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde %15'ten %40'a varan oranda tuğla tozu kullanılarak üretilen enjeksiyon malzemelerinin priz süresi ve dayanımının arttığı fakat akışkanlığın azaldığı görülmüştür (Papayianni ve Pacht, 2015; Wong, 2006; Papayianni vd., 2010). Tuğla tozunun kullanımında, özgün malzemelere uygun pişirme sıcaklıklarında ve uygun kil'in kullanımı önem arz etmektedir.

2.1.1 Kireç

Kireç, TS EN 459-1'de verilen sınıflandırmaya göre genel olarak hava ve su (hidrolik) kireci olarak ikiye ayrılmıştır (Şekil 2.1). Bu sınıflandırmada yer alan ve enjeksiyon malzemesi üretiminde de kullanılan kireç türleri aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 2.1 Yapı kirecinin TS EN 459-1'e göre sınıflandırılması

2.1.1.1 Hava Kireci

Hava kireci yüksek miktarda CaCO_3 içeren kalkerlerin 700-900 °C'de pişirildikten sonra söndürülmesiyle oluşan atmosferdeki CO_2 ile havada katılan beyaz renkli toz halindeki yapı malzemesidir. Hava kireci adından da anlaşıldığı gibi havadan CO_2 alarak katılır ve suda erir. Bu nedenle suya ve dış etkilere karşı su kirecine göre daha dayanıksızdır. Tarihçesi çok eski uygarlıklara dayanan hava kireci kalsiyum kireci (CL) ve dolomitik kireç (DL) olarak sınıflandırılmıştır. İçerisinde puzolanik madde bulunmayan kalsiyum oksit ve/veya kalsiyum magnezyum hidroksit esaslı kirece kalsiyum kireci denir. Dolomitik kireç de içerisinde puzolanik madde bulundurmaz ancak kalsiyum magnezyum oksit ve/veya kalsiyum magnezyum hidroksit esaslıdır.

Kalsiyum kireci (CL) ve dolomitik kireç (DL) tiplerinin kimyasal gereklilikleri TS EN 459-1'de belirtilen deneyler ile ortaya konulur. Kalsiyum kirecinin sınıfları ve bu sınıfların kimyasal gerekleri Çizelge 2.1'de, dolomitik kirecin sınıf ve kimyasal gerekleri ise Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Kalsiyum kireci için kimyasal gerekler

Kalsiyum kireci tipi	Kütlece yüzde olarak değerler				
	CaO+ MgO	MgO	CO_2	SO_3	Serbest Kireç
CL90	≥ 90	≤ 5	≤ 4	≤ 2	≥ 80
CL80	≥ 80	≤ 5	≤ 7	≤ 2	≥ 65
CL70	≥ 70	≤ 5	≤ 12	≤ 2	≥ 55

Çizelge 2.2 Dolomitik kireç için kimyasal gerekler

Dolomitik kirecin tipi	Kütlece yüzde olarak değerler			
	CaO+MgO	MgO	CO_2	SO_3
DL 90-30	≥ 90	≥ 30	≤ 6	≤ 2
DL 90-5	≥ 90	> 5	≤ 6	≤ 2
DL 85-30	≥ 85	≥ 30	≤ 9	≤ 2
DL 80-5	≥ 80	> 5	≤ 9	≤ 2

Hava kireci, sönmemiş ve sönmüş kireç olarak ikiye ayrılır. Sönmemiş kireç Q harfi ile gösterilir. Sönmüş kireçler ise fiziksel durumuna göre S (kuru toz), S PL (kaymak kireç) ve S ML (Kireç Şerbeti veya Sütü) olarak gösterilir.

2.1.1.2 Hidrolik Kireç

Hidrolik kireç, marn adı verilen killi kalkerin pişirilerek daha sonra öğütülmesiyle oluşan hem havada hem de suda atmosferden alınan karbondioksit ile sertleşebilen hidrolik bir bağlayıcıdır. Su ile sertleştiğinden dolayı su kireci de denilir ve ham madde dışında hava kirecinden farkı içerisindeki CaO+MgO miktarının daha az olmasıdır. Hidrolik kireç TS EN 459-1'de "doğal hidrolik kireç", "tasarlanmış kireç" ve "hidrolik kireç" olarak üç ana başlık halinde sınıflandırılmıştır.

Doğal hidrolik kireç (NHL), katkı maddesi ihtiva etmeyen ve az veya çok killi kalkerin pişirilip öğütülmesi ile elde edilir. Bu kireç türünün sınıflarına ait kimyasal gerekler ve basınç dayanımları Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3 Doğal hidrolik kirecin kimyasal gerekleri ve basınç dayanımları

Doğal hidrolik kireç	Kütlece serbest kireç (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	
		7 günlük	28 günlük
NHL 2	≥ 35	-	≥ 2 ila ≤ 7
NHL 3,5	≥ 25	-	≥ 3,5 ila ≤ 10
NHL 5	≥ 15	≥ 2	≥ 5 ila ≤ 15

Tasarlanmış kireç ise hava veya hidrolik kirece puzolanik madde ilavesi ile elde edilir. Tasarlanmış kireç sınıfları için TS EN 459'da verilen kimyasal gerekler Çizelge 2.4'te ve basınç dayanımları Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Çizelge 2.4 Tasarlanmış kireç için kimyasal gerekler

Doğal hidrolik kireç	SO ₃	Kütlece serbest kireç (%)
FL A	≤ 2	≥ 40 ila < 80
FL B	≤ 2	≥ 25 ila < 50
FL C	≤ 2	≥ 15 ila < 40

Çizelge 2.5 Tasarlanmış kirecin basınç dayanımları

Tasarlanmış Kireç Türü	Basınç Dayanımı (MPa)	
	7 günlük	28 günlük
FL 2'nin bütün tipleri	-	≥ 2 ila ≤ 7
FL 3,5'in bütün tipleri	-	≥ 3,5 ila ≤ 10
FL 5'in bütün tipleri	≥ 2	≥ 5 ila ≤ 15

Hidrolik kireç ise kirece çimento, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi yüksek puzolanik aktiviteye sahip puzolanların katılmasıyla elde edilir. Hidrolik kireç sınıflarına ait kimyasal gerekler ve basınç dayanımları Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6 Hidrolik kirecin kimyasal gerekleri ve basınç dayanımları

Hidrolik kireç	Kütlece serbest kireç (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	
		7 günlük	28 günlük
HL 2	≥ 10	-	≥ 2 ila ≤ 7
HL 3,5	≥ 8	-	≥ 3,5 ila ≤ 10
HL 5	≥ 4	≥ 2	≥ 5 ila ≤ 15

Kireçler hidrolik özelliği açısından da sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmada hidrolik indeksi (*i*) ve bağlayıcılık indeksi (*CI*) dikkate alınmaktadır. Bu değerler sırasıyla denklem (2.1) ve (2.2) ile hesaplanır.

$$i = \frac{\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}{\%CaO + 1,4\%MgO} \quad (2.1)$$

$$CI = \frac{2,8\%SiO_2 + 1,1\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}{\%CaO + 1,4\%MgO} \quad (2.2)$$

Hidrolik indeksi ve bağlayıcılık indeksine göre kireç sınıfları literatür çalışmalarına göre Çizelge 2.7’de verilmiştir. Hidrolik indeksi ne kadar fazla ise malzemenin hidrolik özelliği de o kadar fazladır (Callebaut vd., 2001).

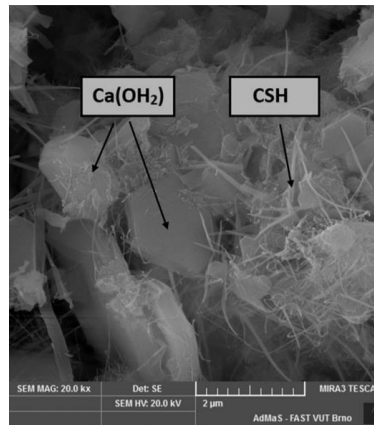
Çizelge 2.7 Hidrolik ve bağlayıcılık indeksine göre kireç sınıfları

Hidrolik İndeksi (Böke vd., 2008)	Bağlayıcılık İndeksi (Boynton, 1980)	Kireç Tanımı (Boynton, 1980)
0,1-0,2	0,3-0,5	Zayıf Hidrolik
0,2-0,4	0,5-0,7	Orta Hidrolik
>0,4	0,7-1,1	Yüksek Hidrolik

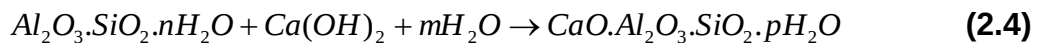
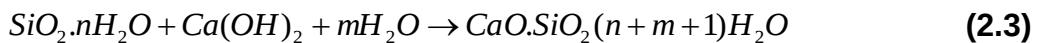
2.1.2 Puzolanlar

Tek başına bağlayıcı niteliği olmayan, ancak ince öğütülmüş olarak kireç veya çimento ile birlikte kullanıldığında hidrolik bağlayıcı özelliği kazanan silisli veya silisli ve alüminli malzemelere puzolan adı verilir. Granüle yüksek fırın cürufu gibi **Bağlayıcı Özelliği Olanlar**; kalkersi uçucu kül, bazı bitümlü şist külleri gibi **Bağlayıcı ve Puzolanik Özellikte Olanlar**; silis dumanı, pirinç kabuğu külü gibi **Puzolanik Aktivitesi Yüksek Olanlar**; silissi uçucu kül, doğal veya kalsine puzolanlar gibi **Normal Puzolanlar** ve yavaş soğumuş yüksek fırın cürufu gibi **Aktivitesi Düşük Puzolanlar** olarak sınıflandırılabilir.

Hava kirecinin veya hidrolik kirecin su ile reaksiyonu sonucu açığa çıkan, hegzagonal kristal yapıda ve suda çözünen serbest kireç ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), silisli veya silisli ve alüminli malzemeden oluşan puzolan ile reaksiyona **girerek suda çözünmeyen** CSH jeline dönüşür (Şekil 2.2). Puzolanik aktivite 2.3 ve 2.4 reaksiyonları ile gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Hegzagonal kristal yapıdaki serbest kireç (Cerný vd., 2018)

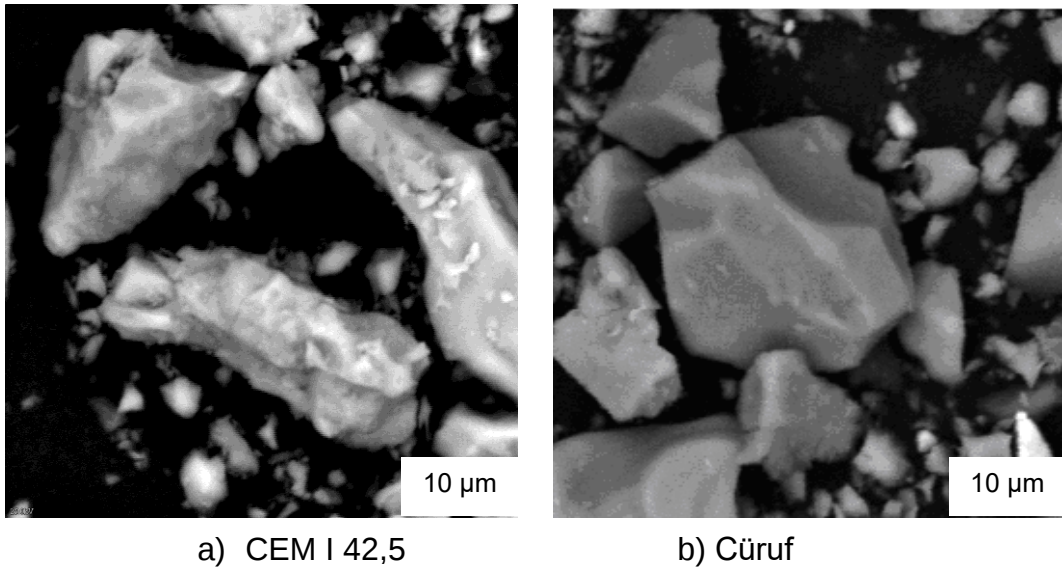


2.1.2.1 Doğal Puzolanlar

Doğada bulunan puzolanik özellikteki madde ve kayalardır. Genellikle volkanik kökenlidir. Puzolanik özellikleri ısıtılarak kazanılarak elde edilen doğal madde ve kayalar ise kalsine edilmiş doğal puzolan olarak adlandırılır.

2.1.2.2 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

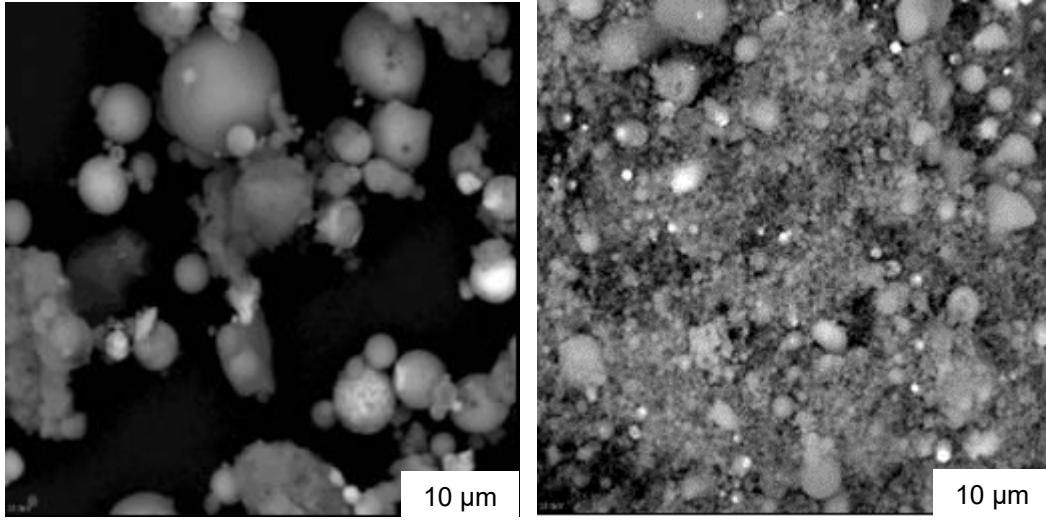
Yüksek fırında pik demir elde edilirken demir cevheri içindeki SiO_2 ve Al_2O_3 içeren gayri saflıklar, yumuşatıcı olarak katılan kalkerdeki CaO tarafından bağlanır. Bu şekilde oluşan ve öğütülerek kullanılan cürufun bileşimi portland çimentosuna büyük benzerlik gösterir (Şekil 2.3); bu nedenle kendi başına da bağlayıcılık özelliği vardır. Çimento kullanımı için yapılan öneriler bu endüstriyel atık puzolan için de geçerlidir.



Şekil 2.3 Çimento (a) ve cürufun (b) 2000 büyütme SEM görüntüsü

2.1.2.3 Uçucu Kül

Çok ince öğütülmüş kömür yakan fırınların baca gazlarına karışan ve çoğunlukla çimentodan ince olan kül tanecikleri elektrostatik yöntemlerle tutularak ayrılırlar. Genellikle kömür ile çalışan termik elektrik santrallerinde elde edilir. SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 toplamı en az %70 olanlar F Tipi, en az %50 olanlar C Tipi uçucu kül olarak isimlendirilir. Reaktif CaO oranı %10'dan az olan puzolanik özellikteki uçucu küllere Silissi Uçucu Kül, %10'dan fazla olan bağlayıcı ve/veya puzolanik özellikteki uçucu küllere ise Kalkersi Uçucu Kül denir. Küresel tane şekli sayesinde işlenebilirlik özelliklerini kolaylaştırır (Şekil 2.4).



a) Uçucu kül

b) Silis Dumanı

Şekil 2.4 Uçucu kül (a) ve silis dumanının (b) SEM görüntüsü (2000 büyütme)

2.1.2.4 Silis Dumanı

Silisyum ve ferrosilisyum alaşımlarının üretimi sırasında elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsın kömürle indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli ve yüksek puzolanik aktivite gösteren baca tozudur. Reaktif SiO_2 miktarı en az %85 olup BET özgül yüzeyi en az $15 \text{ m}^2/\text{g}$ 'dir. Çimentodan yüz kat daha ince olan bu endüstriyel atığın 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsünde bile taneler ayırt edilememektedir. Yüzey alanının çok fazla olması nedeni ile su ihtiyacı artmakta, akışkanlık özelliği için süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımı zorunlu hale gelmektedir.

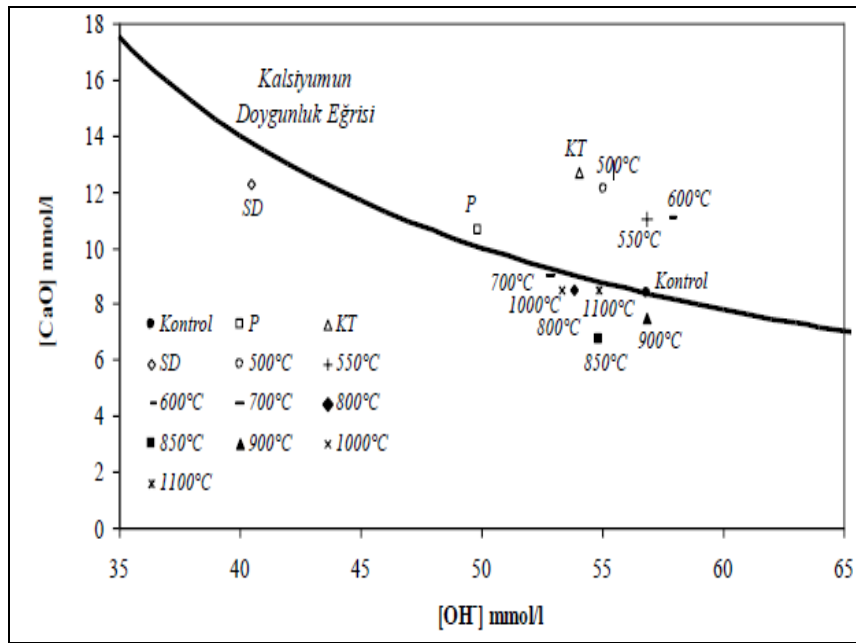
2.1.2.5 Horasan

Terim olarak horasan, tuğla, kiremit, çömlek gibi pişmiş kil ürünlerin kırıklarına ve tozuna verilen isimdir (Akman vd., 1986). Bazı araştırmacılar tarafından horasan'ın ilk olarak Roma eserlerinde kullanıldığı ifade edilse de (Moropoulou vd., 2000), horasanın hangi uygarlık tarafından keşfedildiği açık değildir (Akman, 2003). Horasanın puzolanik özellikte olması sebebiyle bu malzeme ile üretilen kireç harçları hidrolik özellik göstermektedir ve Roma döneminden Osmanlı'ya, su kemeri, sarnıç, hamam gibi birçok su yapısında kullanılmıştır. Osmanlılarda anıtsal yapılarda horasan kullanımının 15. Yüzyıla uzandığı ve hazırlanan şartnamelerde "horasan harcı üretiminde kullanılacak tuğlaların yeni ve iyi pişirilmiş olması gerektiği (Akman vd., 1986, Denel, 1982); normal kireç harcı 6 senede sertlik kazanırken horasan harcının 3 senede sertlik kazanacağı" belirtilmiştir.

Son dönemde yapılan çalışmalarda puzolanik horasanın elde edilmesi için iki ana unsurun dikkate alınması gerektiği ifade edilmiştir. Puzolanik potansiyeli ile ilgili olarak öncelikle uygun kil tipine karar verilmelidir. Kaolinit bu amaç için uygun bir kil minerali olarak önerilmektedir. İkinci faktör kilin pişirme sıcaklığıdır. İçerdiği minerallere bağlı olarak 600-900 °C aralığındaki pişirme sıcaklıkları denenmeli; elde

edilen ürünlerin puzolanik aktivitesi doğrudan ve dolaylı test yöntemleri ile değerlendirilmelidir. Bu amaçla XRD ve DTA / TG analizleri ile Frattini testlerinden yararlanılabilir (Ulukaya, 2016).

Piştirilmemiş (P) ve farklı sıcaklıklarda pişirilen (500, 550, 600, 700, 800, 850, 900, 1000 ve 1100 °C) kil ile silis dumanı (SD) ve kuvarz tozunun (KT) puzolanik aktivitesinin araştırıldığı Frattini deneyi sonuçları Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre 700°C ve üzeri sıcaklıklarda pişirilen tüm killerin grafik üzerinde işaretlenen derişim noktaları, doygunluk eğrisinin altında kaldığı için bu malzemeler puzolan olarak tanımlanmıştır. 700°C'nin altında pişirilen killer ve piştirilmemiş ham kil puzolanik özellik göstermemiştir. Gösterge olarak kullanılan silis dumanı, beklenildiği gibi puzolanik özellik gösterirken; inert malzeme olarak değerlendirilen kuvars tozu ise puzolanik özellik göstermemiştir (Ulukaya, 2016; Ulukaya ve Yüzer, 2016).



Şekil 2.5 Frattini deneyi sonuçları (Ulukaya, 2016)

2.2 Kimyasal Katkılar

Enjeksiyon şerbetine bağlayıcı malzeme, puzolan ve su dışında organik veya inorganik kökenli kimyasal katkı malzemeleri de ilave edilmektedir. Özellikle akışkanlığın sağlanabilmesi için süper hatta yeni nesil hiper akışkanlaştırıcıların kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Enjeksiyon malzemesinin hacim sabitliğinin korunabilmesi için su tutucu ya da viskozite düzenleyici kimyasal katkılardan da yararlanılmaktadır (Oktay, 2017; Dinç-Şengönül vd., 2020). Kimyasal katkının tipi ve miktarı enjeksiyon malzemesinin taze haldeki özelliklerinden beklenen gerekliliklere göre yapılacak ön deneyler ile belirlenmelidir.

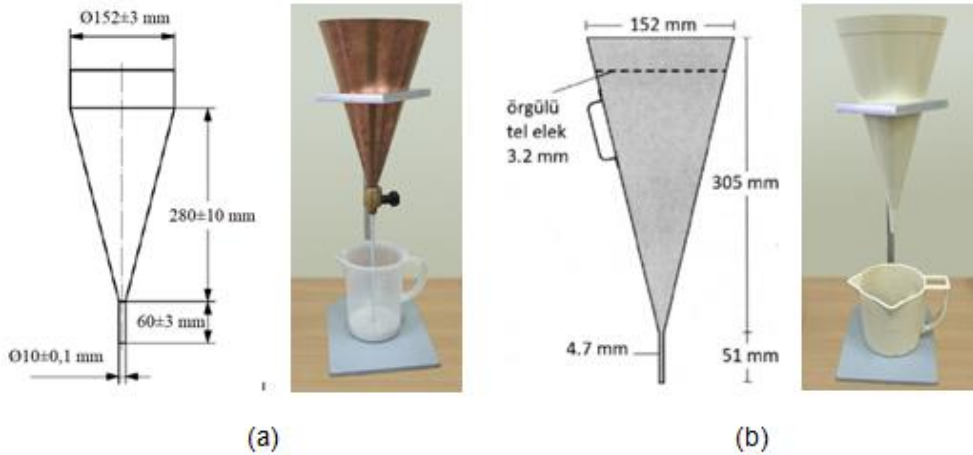
3. BÖLÜM

ENJEKSİYON MALZEMELERİNİN TAZE HALDEKİ ÖZELLİKLERİ

Enjeksiyon malzemesinin yapıdaki tüm boşlukları doldurabilmesi amaçlanmalıdır. Bunun için malzemenin yapının içinde doğru şekilde akışa geçmesini sağlayacak reolojik davranışının kontrol altına alınması gerekir. Enjeksiyon malzemesinin reolojik davranışının denetlenmesi ve taze haldeki özellikleriyle doğrudan ilgilidir (Bras vd., 2010) . Bu özellikler, akışkanlık, hacim sabitliği ve penetrasyon gibi taze halde enjeksiyon deneyleri yapılarak belirlenir (Oktay ve Yüzer, 2013) . Başarılı bir enjeksiyon uygulaması yapılabilmesi için enjeksiyon malzemelerinin enjekte edilebilirlik özelliklerinin sınır şartlarını sağlaması ve uygulama süresince bu özellikleri koruması gerekir (Jorne vd., 2015c). Yerinde uygulama yapılmadan önce, enjeksiyon malzemelerinin reolojik özellikleri laboratuvarında doğrulanmalı; yeni enjeksiyon malzemesi tasarlanırken de karışım oranları bu üç özelliğin sınır şartlarını sağlayacak şekilde seçilmelidir. Aşağıda bu deneyler açıklanmıştır.

3.1 Akışkanlık

Enjeksiyon uygulamasının amacı çatlaklı ve boşluklu bir yapıya sahip olan hasarlı yapıların enjeksiyon malzemesi ile onarılmasıdır. Bu nedenle, enjeksiyon malzemeleri en dar boşluklardan bile tıkanma yapmadan geçebilmelidir (Miltiadou-Fezans and Tassios, 2012). Enjeksiyon malzemelerinin akışkanlık özelliği farklı koniler kullanılarak belirlenir. TS EN 445'te (2012) belirtilen "Akış Konisi" ve ASTM D6910'e (2009) göre uygulanan "Marsh Hunisi" yaygın olarak kullanılan iki farklı tip konidir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 a) Akış Konisi, b) Marsh Hunisi (Gökyiğit-Arpacı, 2016)

Alt çıkış uçlarının çapları 10 mm ve 4,7 mm olan bu konilerde sırasıyla 1000 ve 500 ml enjeksiyon malzemesinin kaptan akış süresi ölçülerek akışkanlık özelliği incelenir. TS EN 447'de (2012) verilen sınır şartlarına göre, akış konisi ile yapılan deneyde karışım işleminden sonra ölçülen akış süresinin (t_0) 25 saniyeden küçük olması gerekir. Marsh hunisi deneyinde standartta belirtilen bir sınır şart olmamakla birlikte, literatürde yer alan çalışmalarda, akış süresinin 45 saniyenin altında olması gerektiği belirtilmiştir (Kalagri vd., 2010; Miltiadou-Fezans and Tassios, 2012).

3.2 Hacim Sabitliği

Aşırı terleyen veya segregasyon görülen bir enjeksiyon malzemesi ile yapılan uygulamada, boşluklarda tıkanmalar oluşur ve enjeksiyon işlemi başarısızlığa uğrar. Bu nedenle enjeksiyon malzemeleri, uygulama boyunca hacim sabitliğini ve homojenliğini korumalıdır (Miltiadou-Fezans and Tassios 2013).

Hacim sabitliği, TS EN 445 (2012) veya ASTM C940'a (2010) göre yapılan terleme deneyi ile incelenir. Buna göre 1000 ml'lik kap içerisine doldurulan yaklaşık 800 ml şerbetin ilk yüksekliği (h_0) kaydedilir ve buharlaşmayı engellemek için kap yüzeyi kapatılır (Şekil 3.2). Enjeksiyon malzemesinin ve terleme suyunun (h_w) yüksekliği 24. saatin sonunda ölçülür. Enjeksiyon malzemelerinin 24. saat sonundaki terleme değerleri (3.1) eşitliği yardımıyla hesaplanır. Enjeksiyon malzemelerinin terleme değerleri ilk hacminin %5'ini geçmemelidir (Kalagri et al., 2010; Miltiadou-Fezans and Tassios 2013; Bras and Henriques 2012).

$$Terleme = \frac{h_w}{h_0 \times 100} (\%) \quad (3.1)$$

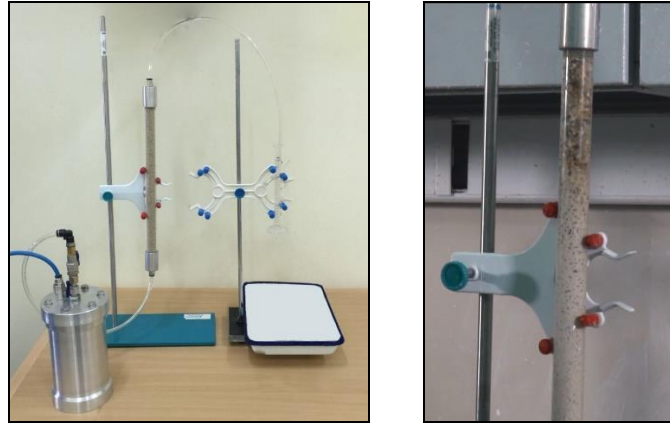


Şekil 3.2 Terleme deneyi (Oktay, 2017)

3.3 Penetrasyon

Enjeksiyon malzemesinin enjekte edilebilirliğinin bir göstergesi olan penetrasyon özelliği, uygulamanın yapılacağı minimum çatlağın genişliğine ve malzeme içerisinde kullanılan bağlayıcıların tane boyut dağılımına bağlıdır (Miltiadou-Fezans and Tassios 2013). Penetrasyon özelliği BS EN 1771'e (2004) göre yapılan kum kolonu deneyi ile belirlenir (Şekil 3.3). Bu deneyde amaç yapıdaki boşlukların belirli granülometrideki agrega ile modellenerek, enjeksiyon malzemesinin bu boşlukları nasıl doldurduğunu belirlemektir. Deney düzeneğinde 360 mm uzunlukta ve $22,2 \pm 0,3$ mm çaplı plastik ve şeffaf bir tüpün içerisi, boşluklu ortamı modellemek

üzere belirli tane dağılımına sahip silis esaslı doğal dere kumu ile doldurulmaktadır. Örneğin 1,25 - 2,5 mm aralığında seçilen kum ile 0,2 - 0,4 mm, 2,5 – 4,0 mm aralığında seçilen kumla ise 0,4 mm'den büyük çaplı boşluklar temsil edilmektedir (Yüzer vd., 2017). Enjeksiyon malzemesi $0,075 \pm 0,0025$ mPa sabit basınçla kompresör yardımıyla tüpün içerisine enjekte edilerek malzemenin 36 cm uzunluğundaki tüpün üst kısmına ulaştığı süre (T_{36}) belirlenir. Bu sürenin 50 saniyeden küçük olması gerekir (Kalagri et al., 2010). Kum kolonu deneyi ile belirlenen bir diğer parametre malzemelerin enjekte edilebilirlik özellikleridir. BS EN 1771'e göre, enjekte edilebilirlik 3 ayrı sınıfta değerlendirilir. Buna göre; enjeksiyon malzemesi tüpün üst ucuna ulaşip toplama kabında 20 ml toplandığında "**kolay**", malzeme tüpün üst ucuna ulaşip kapta toplanan bir malzeme olmadığında "**uygulanabilir**" ve malzeme tüpü doldurmadan enjeksiyon durduysa "**zor**" olarak sınıflandırılmıştır. Bu durumda üretilen enjeksiyon malzemesinin uygulamada kullanılabilmesi için enjekte edilebilirlik sınıfının kolay veya uygulanabilir olması gerekir.



Şekil 3.3 Kum kolonu deneyi (Gökyiğit-Arpacı, 2016)

Penetrasyon özelliğinin incelenebileceği bir diğer yöntem ise silindir enjeksiyon deneyidir. Yerinde yapılan uygulamalardan önce özgün malzeme özellikleri dikkate alınarak hazırlanan silindir kalıplara enjeksiyon yapılarak malzeme performansı değerlendirilir (Kalagri et al., 2010; Jorne at al., 2015a; Jorne et al., 2015; Yüzer et al., 2015). ASTM C943'e (2003) göre yapılan deneyde (Şekil 3.4) onarılabacak yığma yapıyı modellemek için özgün malzemeler (taş, tuğla vb.) ve yapıdaki boşluk oranı dikkate alınarak silindir numuneler hazırlanır.



Şekil 3.4. Silindir enjeksiyon deneyi (Gökyiğit-Arpacı, 2016)

Enjeksiyon malzemelerinin enjekte edilebilirlikleri (3.2) bağıntısı ile değerlendirilmektedir (Jorne vd., 2015c). Bağıntıda yer alan I : enjekte edilebilirlik değerini (s^{-1}), t : malzemenin kalıbın üst yüzüne çıkma süresini (s), m : kalıbı dolduran enjeksiyon malzemesinin ağırlığını (kg), ρ : enjeksiyon malzemesinin yoğunluğunu (kg/m^3), V_v : silindirin toplam boşluk hacmini (m^3) ifade etmektedir.

$$I = \frac{m}{t \times \rho \times V_v} s^{-1} \quad (3.2)$$

Enjeksiyon işleminin başarılı olarak tanımlanabilmesi için, enjeksiyon süresinin olabildiğince kısa ve enjeksiyon malzemesi hacminin (m/ρ) toplam boşluk hacmine oranının (V_v) 1'e yakın olması gerekir (Jorne vd., 2015b)

3.4 Su Tutma Kapasitesi

Enjeksiyon malzemesinin boşluklu ortamda akışa geçebilmesi ve boşlukları doldurması için bileşiminde bulunan ve malzemenin taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini doğrudan etkileyen karışım suyunu bünyesinde uzun süre tutabilme kapasitesine sahip olması gerekir. Viskozite düzenleyici gibi bazı kimyasal katkı maddeleri kullanılarak enjeksiyon malzemelerinin su tutma kapasitesi artırılmaktadır (Assaad, 2015; Bras and Henriques, 2009). Kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin su tutma kapasitelerini belirlemek için ASTM C941-02'de (2002) tanımlanan yöntem kullanılmaktadır. Deneyde; enjeksiyon malzemesi üretimden hemen sonra içerisinde filtre kağıdı bulunan huni içerisine dökülür ve vakum pompası yardımıyla huni içindeki enjeksiyon malzemesi bünyesinde bulunan karışım suyunun dereceli silindire akışı sağlanır (Şekil 3.5). Bu işlem kireç esaslı malzemeler için standartta belirtilen 95 kPa yerine 5 kPa vakum uygulanarak gerçekleştirilmektedir (Baltazar vd., 2012). 30 ve 45 mL su toplanana kadar geçen süreler belirlenir. Uygulama sırasında dikkate alınması gereken bu süre ne kadar uzun olursa, enjeksiyon malzemesinin uygulama ve sonrasındaki homojenliği de o kadar iyi olacaktır.



Şekil 3.5 Su tutma kapasitesinin belirlenmesi

3.5 Viskozite ve Eşik Kayma Gerilmesi

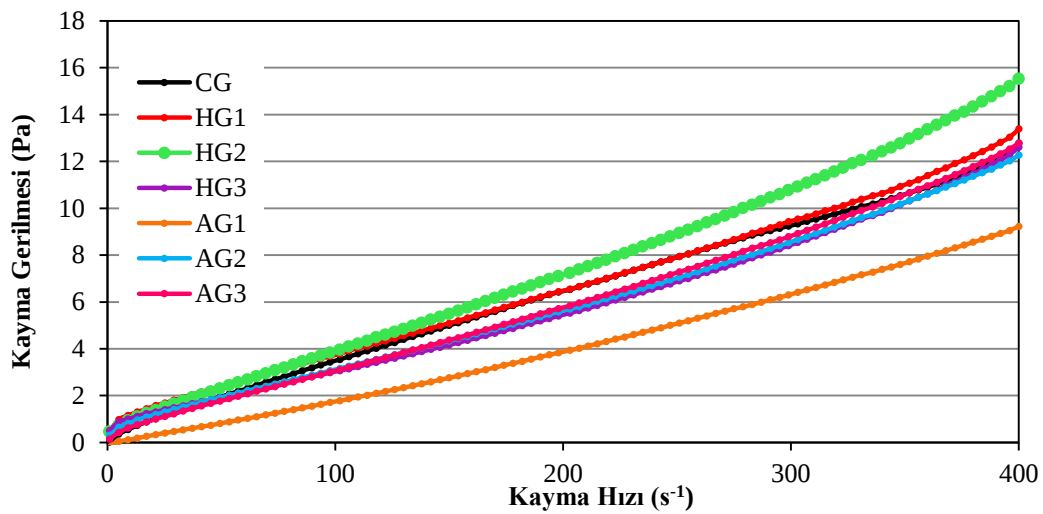
Taze enjeksiyon şerbetinin enjekte edilebilirlik özelliğini ortaya koyabilecek diğer reolojik özellikler plastik viskozite ve eşik kayma gerilmesidir. Eşik kayma

gerilmesi bir akışın başlayıp başlamayacağını gösteren bir eşik değerdir; plastik viskozite ise akmaya karşı gösterilen dirençtir (Roussel vd., 2010). Enjeksiyon malzemelerinin reolojik özellikleri, reometre yardımı ile belirlenmekte, kireç esaslı enjeksiyon malzemeleri için yapılan ölçümlerde malzemenin viskozitesine bağlı olarak eşmerkezli silindirik veya kanatlı ölçüm ucu tercih edilmektedir (Şekil 3.6).

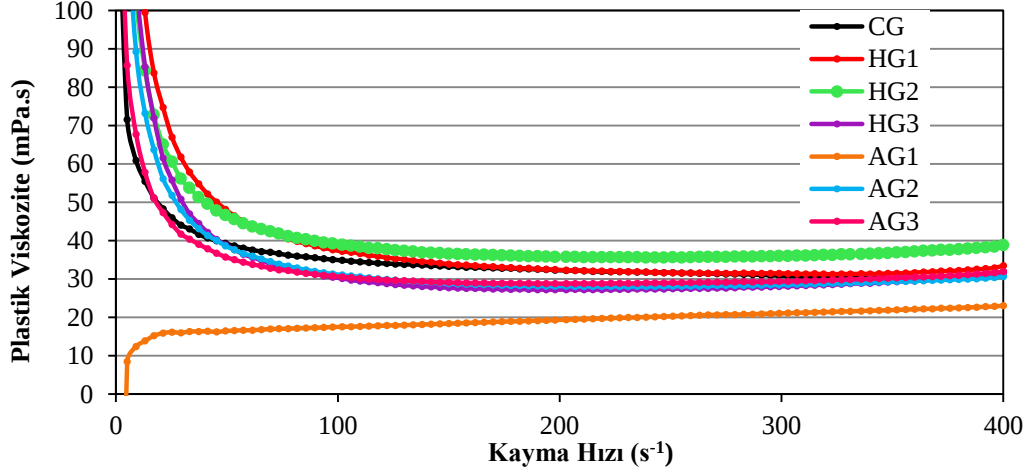


Şekil 3.6 Reometre ve farklı ölçüm uçları

Ölçümler sonucunda malzemelerin akma ve viskozite eğrileri elde edilir. Enjeksiyon malzemelerinin reolojik davranışı enjeksiyon işleminin kalitesi için büyük önem taşır. Reolojik ölçümler, farklı bağlayıcıların taze özellikler üzerindeki etkisini değerlendirme ve reolojik model yardımı ile uygun karışım oranları seçme imkanı vermektedir (Baltazar and Henriques, 2015). Reolojik özellikler; karıştırma süresi, karıştırma hızı, ortam sıcaklığı, bağlayıcı tipi, kullanılan kimyasal katkının miktarı ve tipi, su/bağlayıcı oranı ve ilave malzemelerin eklenmesi gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Bu nedenle, enjeksiyon malzemesinin taze haldeki özelliklerini etkileyen parametreler tasarım esnasında göz önünde bulundurulmalıdır (Baltazar vd., 2013b). Ticari bir enjeksiyon ürünü (CG), hidrolik kireç ile özgül malzemeye uygun olarak tasarlanmış enjeksiyon malzemesi (HG) ve hava kireci ile tasarlanmış enjeksiyon malzemelerine (AG) ait kayma gerilmesi -kayma hızı grafikleri (akma eğrisi) ile viskozite-kayma hızı grafiklerine (viskozite eğrisi) örnek, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de gösterilmiştir (Oktay, 2017).

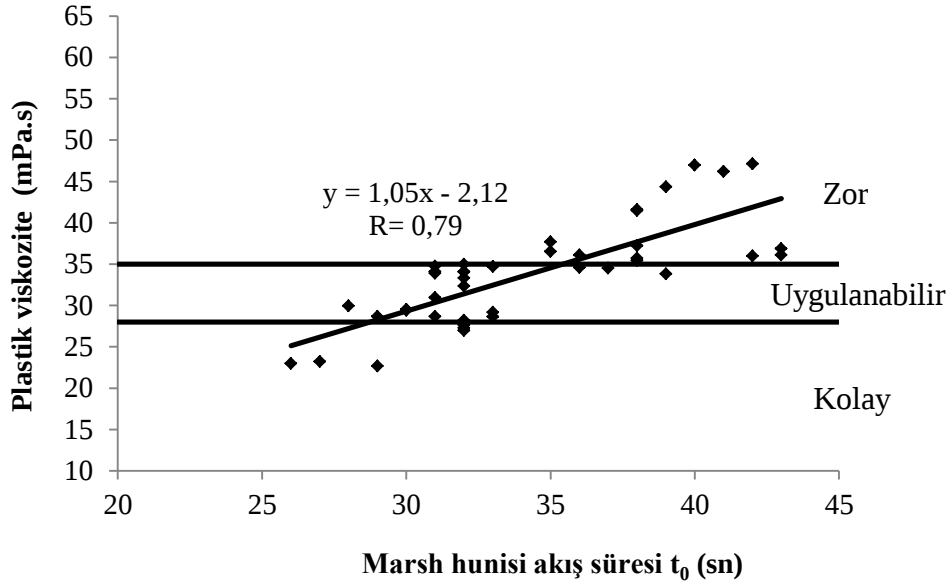


Şekil 3.7 Enjeksiyon malzemelerinin akma eğrileri (Oktay, 2017)



Şekil 3.8 Enjeksiyon malzemelerinin viskozite eğrileri(Oktay, 2017)

Reometre kullanılarak laboratuvarında yapılan bu ölçümler genelde zor ve kompleks işlemlerdir; bu nedenle Marsh Hunisi gibi şantiye ortamında kolaylıkla uygulanan basit yöntemler ile ilişkiler araştırılmaktadır (Oktay, 2017; Dinç, 2018). Şekil 3.9’da gösterildiği gibi, plastik viskozite ve Marsh hunisi akış süresi arasında bir ilişki kurulmakta, elde edilen bağıntı yardımı ile akış süresi ölçülen kireç esaslı enjeksiyon malzemesinin plastik viskozite değeri hesaplanabilmektedir. Bunun yanı sıra malzemenin plastik viskozite değeri dikkate alınarak enjekte edilebilirlik sınıfları için sınır değerler oluşturulmaktadır. Buna göre, plastik viskozite değerlerine bağlı olarak malzemelerin enjekte edilebilirliği “*kolay*”, “*uygulanabilir*” ve “*zor*” olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.9 Plastik viskozite-akış süresi arasındaki ilişki (Oktay, 2017)

4. BÖLÜM

ENJEKSİYON MALZEMELERİNİN SERTLEŞMİŞ HALDEKİ ÖZELLİKLERİ

Özgün malzemeye uygun olarak tasarlanan sertleşmiş enjeksiyon malzemelerinde, su emme, yoğunluk, boşluk oranı gibi fiziksel özelliklerin tespiti, yüzey renginin incelenmesi, kimyasal ve mineralojik özelliklerin belirlenmesi, eğilme ve basınç dayanımı gibi mekanik özelliklerin ortaya konularak özgün malzemeye uygunluğunun ve ileri yaş performansları için dayanıklılığının araştırılması gerekir. Bu özellikler araştırılırken sayısal analiz yapılacak olan tarihi yapılarda malzeme parametrelerinin de belirlenmesine ihtiyaç vardır. Bu amaçla aşağıda açıklanan bazı standart deneylerin yanı sıra, sağlamlaştırma yapılacak yapının özelinde model duvar deneyleri de gerçekleştirilmektedir.

4.1 Fiziksel Özellikler

Enjeksiyon malzemelerinde yapılan fiziksel deneyler kapsamında, kılcal su emme katsayısı, görünür ve gerçek yoğunluk, toplam boşluk oranı, ağırlıkça ve hacimce su emme, boşluk boyut dağılımı ve kritik boşluk çapı gibi fiziksel özellikler belirlenir.

4.1.1 Kılcal Su Emme

Enjeksiyon malzemelerinin kılcal su emme oranları TS EN 15801'e (2010) göre belirlenir. Her bir seri için 3'er adet olmak üzere standarda uygun boyutlarda hazırlanan prizmatik şekilli numuneler $60 \pm 2^\circ\text{C}$ 'lik etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar bekletilir, oda sıcaklığına gelinceye kadar desikatörde muhafaza edilerek tartılır (m_0). Bir tepsi içerisine, minimum kalınlığı 5 mm olan pamuk tabaka yerleştirilir ve bu tabaka suya doymun hale getirilir (Şekil 4.1).

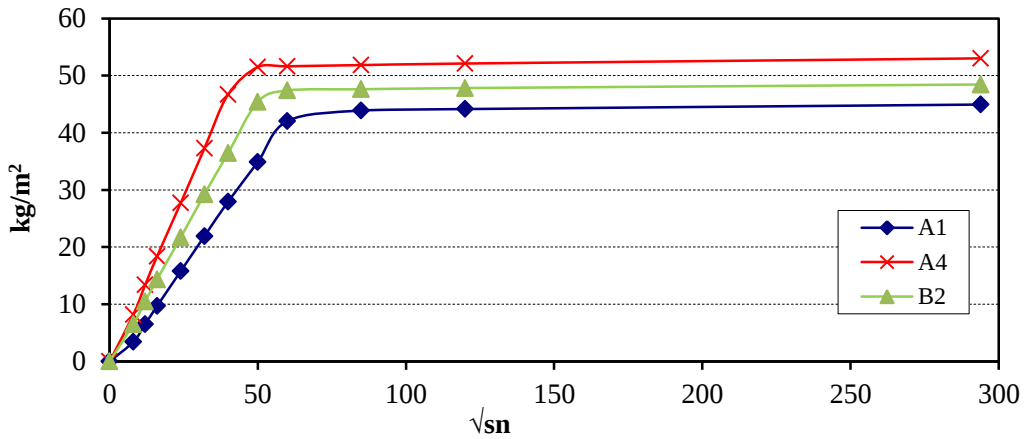


Şekil 4.1 Kılcal su emme deneyi (Oktay, 2017)

Numunelerin kare kesitli yüzeyi, bu tabaka ile temas ettiği an $t=0$ olarak kaydedilir ve ilk 1 saat içerisinde çok sık olmak üzere, belirli aralıklarla ağırlık ölçümleri yapılır. Numunelerin (t_i) anında birim alandan emdiği su miktarı (Q_i) (4.1) bağıntısı ile belirlenir, kılcal su emme katsayısının belirlenmesi için $Q_i - \sqrt{t_i}$ grafikleri oluşturularak kılcal su emme eğrileri çizilir (Şekil 4.2).

$$Q_i = \frac{m_i - m_0}{A} \text{ kg/m}^2 \quad (4.1)$$

Bağıntıdaki değişkenlerden m_i , numunenin (t_i) anındaki ağırlığını (kg), m_0 numunenin etüv kurusu ağırlığını (kg), A numunenin kılcal yolla su emdiği yüzey alanını (m^2) ifade etmektedir. Kılcal su emme katsayısı çizilen kılcal su emme eğrilerinin başlangıçtaki doğrusal kısmının eğimi hesaplanarak belirlenir, birimi $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{sn}})$ 'dir.



Şekil 4.2 Doğal hidrolik kireç ve hava kireci ile üretilen enjeksiyon malzemelerine ait örnek Q_i-t_i grafiği (Oktay, 2017)

4.1.2 Görünür Yoğunluk, Gerçek Yoğunluk ve Porozite

Enjeksiyon malzemelerinin yoğunluk, porozite ve su emme oranlarının belirlenmesi için literatürde yer alan yöntemler – genel olarak – aynı prensibe dayanmaktadır. Bu nedenle tüm kaynaklarda yer alan ortak değişkenler kullanılarak deneyler gerçekleştirilebilir (Borrelli, 1999; BS EN 1936, 2006; Onaran, 2011).

Enjeksiyon malzemesi örneklerinin yoğunluklarının belirlenmesi amacıyla prizmatik numuneler hazırlanır. Numuneler değişmez ağırlığa gelinceye kadar etüvde bekletilir ve tartılır (W_0). Numunelerin net hacmini (V_{net}) bulmak için (4.2) bağıntısından yararlanılır. Bağıntıdaki değişkenlerden W_{SH} suya doymun haldeki numunenin havadaki ağırlığını (g), W_{SS} suya doymun haldeki numunenin su içerisindeki ağırlığını (g), ρ_{su} suyun yoğunluğunu ($\sim 1 \text{ g/cm}^3$) ifade etmektedir. Numunelerin etüv kurusu ağırlığının (W_0), numunenin net hacmine (V_{net}) bölünmesiyle enjeksiyon malzemelerinin görünür yoğunluğu (β) hesaplanır.

$$V_{net} = \frac{W_{SH} - W_{SS}}{\rho_{su}} \text{ kg/m}^3 \quad (4.2)$$

Malzemelerin gerçek yoğunlukları (γ), toz haline ($<63 \mu\text{m}$) getirilen numuneler üzerinde helyum ultra-piknometresi kullanılarak belirlenir. Enjeksiyon malzemelerinin porozitesi veya toplam boşluk oranı (p) (4.3) bağıntısı kullanılarak hesaplanır.

$$p(\%) = \left(1 - \frac{\beta}{\gamma}\right) \times 100 \quad (4.3)$$

4.1.3 Ağırlıkça ve Hacimce Su Emme

Numunelerin ağırlıkça su emme oranı (a_s) ve malzemenin dışa açık boşluklarını temsil eden hacimce su emme (h_s) oranları (4.4) ve (4.5) eşitlikleri ile hesaplanır.

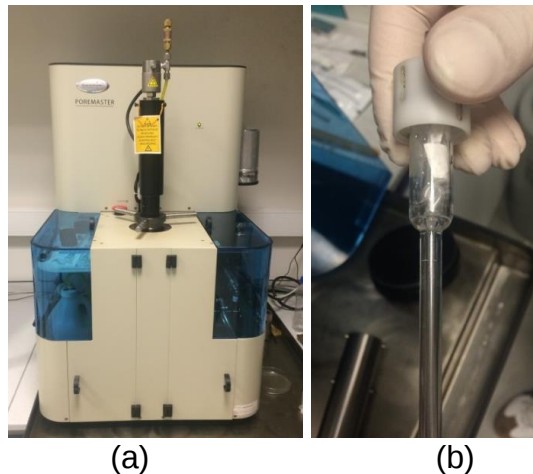
$$a_s(\%) = \left(\frac{W_{SH} - W_0}{W_0}\right) \times 100 \quad (4.4)$$

$$h_s(\%) = \left(\frac{W_{SH} - W_0}{W_{SH} - W_{SS}}\right) \times 100 \quad (4.5)$$

4.1.4 Boşluk Parametreleri

Enjeksiyon malzemelerinin boşluk oranlarının, boşluk dağılımlarının ve kritik boşluk çaplarının belirlenmesi için civalı porozimetreden yararlanılır (Şekil 4.3). Boşluk çapları (4.6)'da verilen Washburn eşitliği yardımıyla hesaplanır (Atahan vd., 2009). Bağıntıdaki değişkenlerden d boşluk çapını (μm), γ_g kullanılan civanın yüzey gerilimini (0,48 N/m), P uygulanan basıncı ve ϕ kullanılan civanın numuneye temas açısını (140°) ifade etmektedir. Kireç esaslı malzemelerin dayanım özellikleri dikkate alınarak uygulanacak basınç (P) karar verilmelidir. Deney sistemine ait yazılımdan faydalanılarak numune içerisindeki boşluk dağılımları numuneye nüfuz eden civa hacmine bağlı olarak (ml/g) tespit edilir. Bu yazılım civanın belirli bir basınçta belirli boyutlardaki boşluklara girdiği gerçeğinden hareketle ve boşlukların silindirik olduğunu kabul ederek boşluk boyutlarını belirlemektedir.

$$d = \frac{-4\gamma_g (\cos\phi)}{P} \quad (4.6)$$



Şekil 4.3 a) Civalı porozimetre cihazı, b) Numuneye civa enjekte edilen hazne (Oktay, 2017)

4.2 Renk Analizi

Tarihi yapıların onarımında kullanılan malzemelerin görsel açıdan da özgün malzemeye uygun olması gerektiği dikkate alınır, yüzey rengi araştırılarak görsel değerlendirme yapılmalıdır. Renk ölçümleri ISO 7724-1'e (1984) uygun spektrofotometreler ile gerçekleştirilebilir (Şekil 4.4). Ölçüm sonuçları, TS EN 15886'da (2011) belirtilen Uluslararası Aydınlatma Komisyonu'nun (CIE) "L*a*b* Renk Uzayı"nda değerlendirilerek yorumlanır. Bu renk uzayında:

- L* : Açıklık koordinatını (0 (siyah) – 100 (beyaz) arasında),
- a* : kırmızı/yeşil koordinatını (+a* kırmızılığı, -a* yeşilliği gösterir),
- b* : sarı/mavi koordinatını (+b* sarılığı, -b* maviliği gösterir) temsil etmektedir.



Şekil 4.4 Görsel analiz için spektrofotometre ile renk ölçümü (Ulukaya, 2016)

Güvenilir bir ölçüm için standartta yer alan numune başına en az 5 ölçüm kriterine dikkat edilir ve her bir numuneden en az 6 ölçüm yapılarak ortalaması alınır. 2 ölçüm arasındaki toplam renk farkı ($\Delta E^*_{2,1}$), aşağıdaki (4.7) bağıntısı kullanılarak hesaplanır (TS EN 15886, 2011).

$$\Delta E^*_{2,1} = \left[(\Delta L^*)^2 + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} \right]^{0,5} \quad (4.7)$$

Bağıntıdaki değişkenlerden:

- ΔL^* : $L^*_2 - L^*_1$, açıklık farkını,
- Δa^* : $a^*_2 - a^*_1$, kırmızı/yeşil farkını,
- Δb^* : $b^*_2 - b^*_1$, sarı/mavi farkını ifade etmektedir.

Orijinal malzemenin L*a*b* renk uzayındaki ölçüm sonuçları ve seçilen yeni malzeme ile toplam renk farkı ($\Delta E^*_{2,1}$) değerlendirilmiş olur.

4.3 Kimyasal ve Minerolojik Analizler

Enjeksiyon şerbetlerinin ısı değişimleri karşısında gösterdiği su kaybı, ağırlık azalmaları gibi davranışlar, TG/DTA ile yapılan analizlerle; malzemede meydana gelebilecek tuz oluşumu ise hem basit kimyasal testler ve iletkenlik ölçümleriyle, hem de X ışınımı kırınımı (XRD) ile incelenmelidir. Minerolojik bileşenler X ışını kırınımı

(XRD), X ışın floresans (XRF), Fourier Transform Infrared Spektroskopisi FTIR, yüksek çözünürlüğe sahip geçirimli elektron mikroskobu HR-TEM (EDX) gibi analizlerle belirlenmeli ve özgün malzemeye uygunluğu incelenmelidir.

4.3.1 Suda Çözünebilir Tuz Analizleri

Enjeksiyon malzemesi bünyesinde bulunabilecek olası tuzlar uygulamanın yapıldığı bölgeye zarar verebileceği için, enjeksiyon uygulaması öncesinde malzemelerin tuz içerikleri araştırılmalıdır. Bulunabilecek tuzların niteliğini belirlemek ve niceliği hakkında fikir edinmek amacı ile numunelerde spot tuz testleri yapılır. Enjeksiyon malzemelerinden alınan parçalar önce porselen havanda öğütülerek toz haline getirilir. Bunların her birinden 1 g örnek 0,01 hassasiyette terazide tartılarak cam deney tüpüne aktarılır ve örneklerin üzerine 100 mL saf su ilave edilir. Örneklerin içerdiği muhtemel suda çözünebilir tuzların saf su içerisinde iyon haline gelmesi için 24 saat beklenir. Çözünmeyen katı parçacıkların filtre kâğıdı ile süzülerek çözeltiden ayrılmasıyla saydam stok çözelti hazırlanır. Stok çözeltiye alınan örnekler klorür, sülfat, nitrat ve karbonat testlerinde kullanılır.

Klorür Testi (Cl^-): ~2mL örnek çözelti üzerine birkaç damla nitrik asit (HNO_3 , 1M) ve birkaç damla 0,5M gümüş nitrat (AgNO_3) ilavesiyle, klorür (Cl^-) tuzunun varlığını gösteren beyaz çökelti veya bulanıklığın oluşup oluşmadığı gözlemlenir.

Sülfat (SO_4^{2-}) ve Karbonat Testi (CO_3^{2-}): ~2mL örnek çözelti üzerine birkaç damla baryum klorür (BaCl_2 , %10) ilavesiyle, sülfat ve/veya karbonat tuzlarının varlığını gösteren beyaz çökelti veya bulanıklığın meydana gelip gelmediği gözlemlenir. Çökelti veya bulanıklığın meydana gelmemesi sülfat ve karbonat tuzlarının yokluğuna işaret eder. 1M hidroklorik asit (HCl) ilavesiyle gaz çıkışı ya da bulanıklığın veya çökeltinin kaybolması ise karbonat tuzunun varlığını, herhangi bir değişimin gerçekleşmemesi ise sadece sülfat tuzunun varlığını belirtir. Gaz çıkışı olmasına rağmen hala bir miktar çökelti veya bulanıklığın kalması, bu ortamda hem sülfat hem karbonat tuzunun bulunduğu anlamına gelmektedir.

Nitrat Testi (NO_3^-): Saf suyla yıkanıp kurutulmuş cam test plakası üzerine küçük bir difenilamin kristali ve bir-iki damla örnek çözeltiden konulup karıştırılır ve kuruması beklenir. Kuruyan örnek üzerine bir damla konsantre sülfürik asit (H_2SO_4) ilavesiyle, nitrat tuzunun varlığını işaret eden mavi rengin (menekşe moru) belirip belirmediği gözlemlenir (Oktay, 2017; Uğuryol, 2011).

Bir enjeksiyon malzemesinde bulunabilecek olası tuzların miktarları hakkında fikir edinebilmek için yapılan spot tuz testlerinin sonucu Çizelge 4.1'de verilmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında CG olarak kodlanan hazır enjeksiyon malzemesindeki sülfat ve klorür miktarı “çok az”, karbonat ve nitrat miktarı “yok” olarak nitelendirilmiştir. Malzemelerin bileşiminde sülfat olması, uygulamanın yapıldığı bölgede bozulmalara yol açacağı için sülfat miktarının az olması veya hiç olmaması istenir.

Çizelge 4.1 Enjeksiyon malzemesinde spot tuz testi sonuçları (Oktay, 2017)

Ürün Kodu	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	CO ₃ ⁻²	NO ₃ ⁻
CG	±	±	-	-
-: Yok, ±: Çok az +: Az, ++: Fazla, +++: Çok fazla				

4.3.2 XRF Analizi ile Kimyasal Kompozisyonun Belirlenmesi

Enjeksiyon malzemelerinin özgül malzeme ile kimyasal açıdan uyumluluğunu incelemek için, 28 günlük numunelerde XRF analizleri gerçekleştirilir. Ölçümler, toz numunelerde (<90 µm) yapılır. Analiz sonucunda numunelere ait oksit cinsinden element bileşenleri ve bunların ağırlıkça yüzdeleri elde edilir. Bazı enjeksiyon malzemelerine ait XRF analiz sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir. CG olarak kodlanan hazır enjeksiyon malzemesinin kızdırma kaybı değerinin yüksek olması, bileşiminde yüksek oranda CaCO₃ içeren bileşenler olduğunu göstermektedir. Kızdırma kaybının ve SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ oranlarının yüksek olması sebebiyle, hazır enjeksiyon malzemesinin hava kireci ve puzolanik özellik gösteren bir malzeme kullanılarak hazırlandığını göstermektedir.

Çizelge 4.2 Bazı enjeksiyon malzemelerinin XRF analizi sonuçları (Oktay, 2017)

Bileşenler (%)	CG	HG1	HG2	HG3	AG1	AG2	AG3
SiO ₂	11,0	11,2	20,4	19,2	0,8	10,3	9,6
Al ₂ O ₃	7,1	0,5	4,4	3,9	0,4	3,7	3,4
Fe ₂ O ₃	0,2	0,2	2,1	2,1	0,2	2,1	3,0
MgO	1,7	0,5	1,2	1,0	1,2	1,6	1,6
CaO	46,0	64,3	52,1	53,8	67,7	57,6	56,5
Na ₂ O	0,1	-	0,3	0,3	-	0,2	0,3
K ₂ O	0,2	<0,1	0,8	0,7	0,1	0,8	0,8
TiO ₂	0,4	<0,1	0,3	0,3	<0,1	0,3	0,3
SO ₃	0,4	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7	0,8
Minor Bileşenler	~0,1	~0,1	~0,1	~0,1	~0,1	~0,1	~0,1
Kızdırma kaybı	32,8	22,5	17,6	17,9	28,9	22,6	23,7
Hidrolik indeksi	0,4	0,2	0,5	0,5	0,1	0,3	0,3
Bağlayıcılık indeksi	0,8	0,5	1,2	1,1	0,1	0,6	0,6

4.3.3 XRD ve FTIR Analizi ile Mineralojik Kompozisyonun Belirlenmesi

Enjeksiyon malzemelerinin mineralojik analizi için XRD (X-Işını Kırınımı) ve FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi) analizleri gerçekleştirilir. X-ışını kırınımı analizi ile toz numunelerin (<90 µm) içerdiği fazlar yarı-kantitatif olarak belirlenir. FTIR analizleri ile malzeme bünyesinde olası organik bileşenler ile sülfat, klorür, karbonat gibi yapıların varlığı araştırılır. Yapılan XRD analizlerinden ortaya çıkan kırınım desenlerinden faydalanarak kristal yapıdaki mineraller, FTIR analizlerinin sonuç spektrumlarındaki piklerin dalga boyları kullanılarak numune içerisindeki kimyasal gruplar tanımlanır. Bu iki analiz birlikte değerlendirilerek malzemenin mineralojik özelliği belirlenir. Bazı enjeksiyon malzemelerine ilişkin XRD ve FTIR analiz sonuçları Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir. Enjeksiyon malzemelerinin XRD analizlerinde temel olarak kireç esaslı malzemelerde bulunan kalsit ve portlandit tespit edilmiştir. FTIR analizi sonuçlarına göre, hidroksil, karbonat ve silikat piklerinin bulunduğu görülmektedir. 3643 cm⁻¹'de gözlenmekte olan pik O-H gerilmelerinden kaynaklanmakta ve portlandit içerisindeki hidroksil gruplarına karşılık gelmektedir ve CG olarak kodlanan enjeksiyon malzemesi hariç tüm serilerde tespit edilmiştir. Kalsit varlığını kanıtlayan karbonat (CO₃) grubuna ait C-O gerilme 1795, 1792, 1424 ve 1406 cm⁻¹ ve deformasyon titreşimleri 875, 873 ve 712 cm⁻¹ değerlerinde gözlenmektedir. Elde edilen bu sonuçlar XRD analizi sonuçlarını da desteklemektedir. 780 ve 798 cm⁻¹ değerlerinde görülen kuvars mineraline ait Si-O gerilmeleri horasanın (tuğla tozu) kullanıldığı HG2, HG3 ve AG3 serilerinde görülmüştür.

Çizelge 4.3 Bazı enjeksiyon malzemelerinin XRD analizi sonuçları (Oktay, 2017)

Mineral	%						
	CG	HG1	HG2	HG3	AG1	AG2	AG3
Kuvars	-	-	13	13	-	10	7
Kalsit	85	14	13	13	10	5	13
Portlandit	-	46	50	40	84	58	56
Larnit	-	10	-	12	-	-	-
Katoit	-	26	-	-	-	-	-
Brownmilleri	-	-	17	-	-	10	-
Grossular	-	-	-	17	-	-	-
Ca ₄ Al ₆	-	-	-	-	-	-	24
Megakalsilit	-	-	-	-	-	11	-
Tilleyit	6	-	-	-	-	-	-
Olivin	3	-	-	-	-	-	-

Çizelge 4.4 FTIR spektrumlarında yer alan kimyasal gruplar ve dalga boyları
(Oktay, 2017)

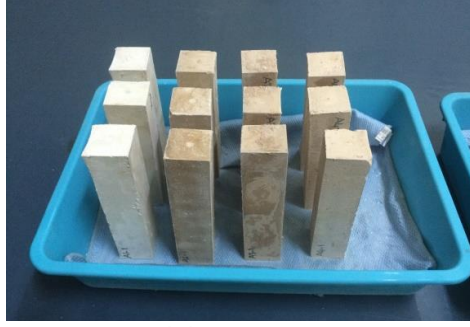
Pik Türleri	Dalga Boyu (cm ⁻¹)						
	CG	HG1	HG2	HG3	AG1	AG2	AG3
O-H (Hidroksil Absorpsiyon)	-	3642	3643	3643	3643	3643	3643
[CO ₃] ⁻² (Karbonat)	1795 874 712	1417 874 712	1406	1406 873 712	1429 875 712	1794 1424 875 712	1792 1424 875 712
-Si-O (Amorf silis)	-	995	-	-	-	-	996
Si-O (Kuars)	-	-	798	798	-	-	780
Si-O (Silikat)	960	-	1027	-	-	-	-

4.4 Dayanıklılık Özellikleri

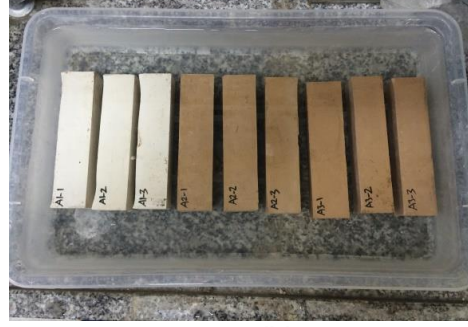
Laboratuvar ortamında hazırlanan sertleşmiş haldeki numunelerde, ıslanma-kuruma, donma-çözülme ve sülfat etkisi gibi çevresel etkiler altındaki davranışları incelenmeli, tarihi yapıların onarım ve sağlamlaştırılmasında kullanılacak olan malzemelerin sadece erken yaş değil, ileri yaş performansları da değerlendirilmelidir.

4.4.1 Donma-Çözülme Deneyi

Kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin donma çözülme etkisi altında davranışının incelenmesi için belirli bir standart bulunmamakla birlikte, zemin stabilizasyonunda kullanılan kireç ve çimento esaslı malzemelerin donma çözülme testi için kullanılan ASTM D560'tan (2015) yararlanılabilir (Su vd., 2014). Donma çözülme testinin 1 çevrimi, 24 saat -23°C'de donma ve 23 saat 21°C ve %100 bağıl nemde çözülme aşamalarından oluşur (Şekil 4.5). Hidrolik ve hava kireci ile üretilen ve donma-çözülme etkisine maruz bırakılan enjeksiyon malzemelerinde oluşan hasarlar Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre hidrolik kirecin bağlayıcı olarak kullanıldığı serilerin donma çözülme etkisine karşı daha dayanıklı olduğu açıkça görülmektedir. Puzolanik özellik gösteren tuğla tozunun donma çözülme direncini artırdığı bilinmektedir. Buna göre donma çözülme etkisine maruz kalacak bir tarihi yapıda kullanılacak enjeksiyon malzemesi tasarımının hidrolik kireç kullanılarak yapılması ve özgün malzeme özellikleri dikkate alınarak gerekli ise puzolanik özellik gösteren tuğla tozunun da karışıma ilave edilmesinin uygun olacağı bildirilmiştir (Oktay, 2017).



(a)



(b)

Şekil 4.5 Donma (a) çözülme (b) etkisine maruz bırakılan numuneler (Oktay, 2017)



(a)

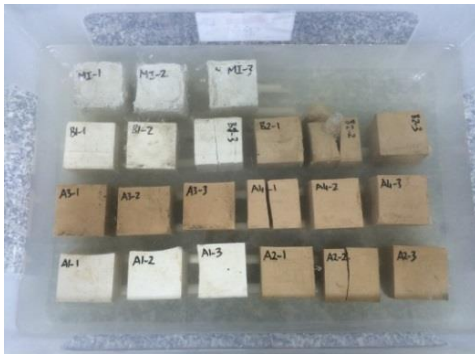


(b)

Şekil 4.6 (a) 1. Çevrimde hasar gören hava kireci içeren enjeksiyon malzemesi
(b) 12. Çevrimde çatlak oluşan hidrolik kireç içeren enjeksiyon malzemesi
(Oktay, 2017)

4.4.2 Sülfat Etkisi

Enjeksiyon malzemelerinin sülfat etkisi altında davranışını incelemek için TS EN 12370 standardı revize edilerek kullanılmaktadır (Faria vd., 2008; Falchi vd., 2013; Karatasios vd., 2008; Gulotta vd., 2015). TS EN 12370'e (2001) göre yapılan tuz kristallenmesi direnci tayini için numuneler değişmez kütleye gelinceye kadar 60°C'de kurutulur. Deneyin bir çevrimi üç aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak numuneler 20±0,5°C'deki çözeltide 2 saat bekletilir. Daha sonra 20 saat 60±5°C'deki etüvde kurutulur. Son olarak 2 saat oda sıcaklığında soğutulur (Şekil 4.7). Her bir çevrimden sonra numunelerdeki ağırlık kayıpları ölçülür ve oluşan bozulmalar gözlemlenir.



(a)



(b)



(c)

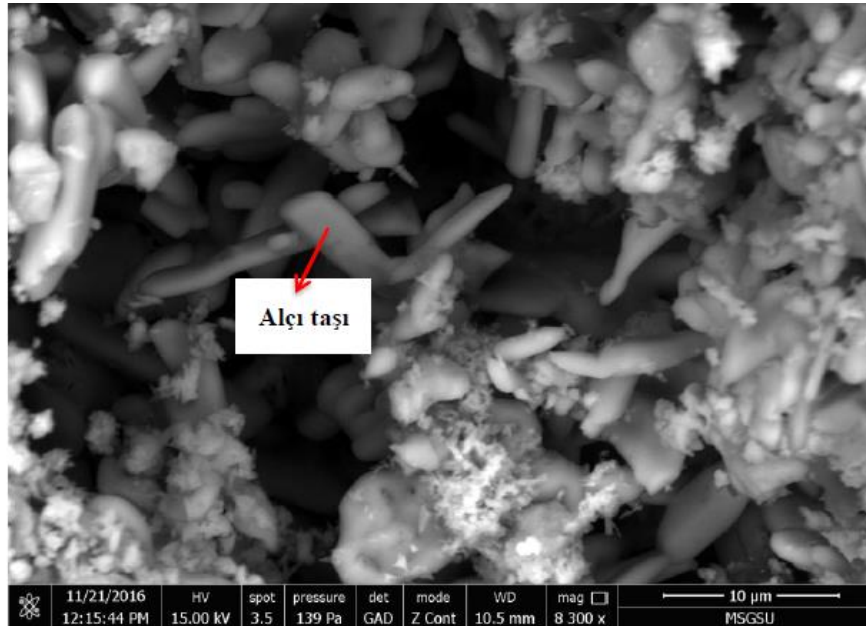
Şekil 4.7 a) Sülfat çözeltisindeki numuneler, b) Etüvde kurutulan numuneler, c) Oda sıcaklığında soğumaya bırakılan numuneler (Oktay, 2017)

Sülfat etkisine maruz bırakılan numunelerin kütle değişimi sonuçlarına göre doğal hidrolik kireç ile üretilen enjeksiyon malzemesinin, hava kireci ile üretilenlere göre sülfat etkisine karşı daha dayanıklı oldukları ortaya konulmuştur (Şekil 4.8). (Oktay, 2017).



Şekil 4.8 (a) 4. Çevrimde tamamen dağılan hava kireci içeren enjeksiyon malzemesi
(b) 11. Çevrimde çatlak oluşan hidrolik kireç içeren enjeksiyon malzemesi
(Oktay, 2017)

Sülfat tuzları ile numune bünyesindeki serbest kireç tepkimeye girerek hacim artışına neden olan ve suda çözünebilen alçı taşına dönüşür (Şekil 4.9). Boşluk oranı daha fazla olan enjeksiyon malzemesine sülfatın daha kolay nüfuz etmesi sonucu hasarlar kısa sürede oluşmaktadır. Sülfat etkisine maruz kalacak tarihi yapılarda kullanılacak enjeksiyon malzemelerinin, hidrolik kireç ile üretilmesi ve tasarımların düşük boşluk oranları elde edecek şekilde yapılması gerekir. Ayrıca horasan gibi puzolanik aktivite gösteren malzemelerin kullanımı da boşluk oranını zamanla azaltacaktır (Oktay, 2017).

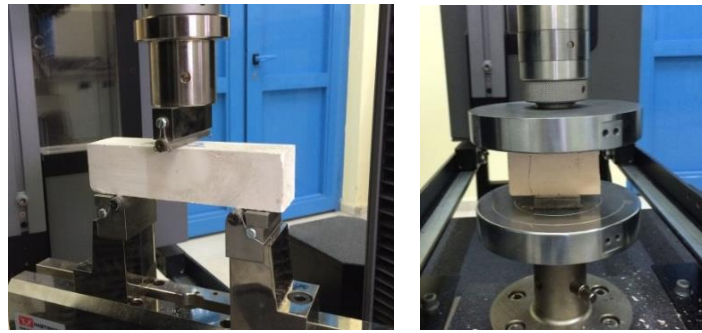


Şekil 4.9 Sülfat etkisine maruz kalan enjeksiyon malzemesinin SEM görüntüsü
(Oktay, 2017)

4.5 Mekanik Özellikler

4.5.1 Eğilme ve Basınç Deneyi

Üretilen enjeksiyon malzemelerinin eğilme ve basınç dayanımları TS EN 1015-11'e (2000) göre belirlenir. Eğilme deneyi sonucunda ikiye ayrılan parçaların alt ve üzerine yerleştirilen 40x40 mm boyutlarındaki çelik plakalar kullanılarak TS EN 1015-11'e (2000) göre basınç deneyi gerçekleştirilir (Şekil 4.10). Enjeksiyon malzemesinin eğilme dayanımı f_e , (4.7) bağıntısı kullanılarak hesaplanır. Bağıntıda P kırılma yükünü (N), L mesnetler arası uzaklığı (mm), b ve d ise numunelerin enkesitinin kenar uzunluklarını (mm) ifade eder. Basınç dayanımı (f_c , N/mm²), basınç etkisinde belirlenen maksimum yükün (P_c , N), yük uygulanan alana (40x40 mm) bölünmesiyle elde edilir.

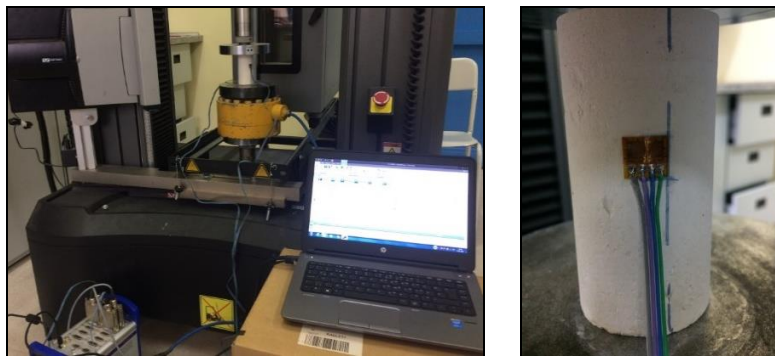


Şekil 4.10 Eğilme ve basınç deneyi (Oktay, 2017)

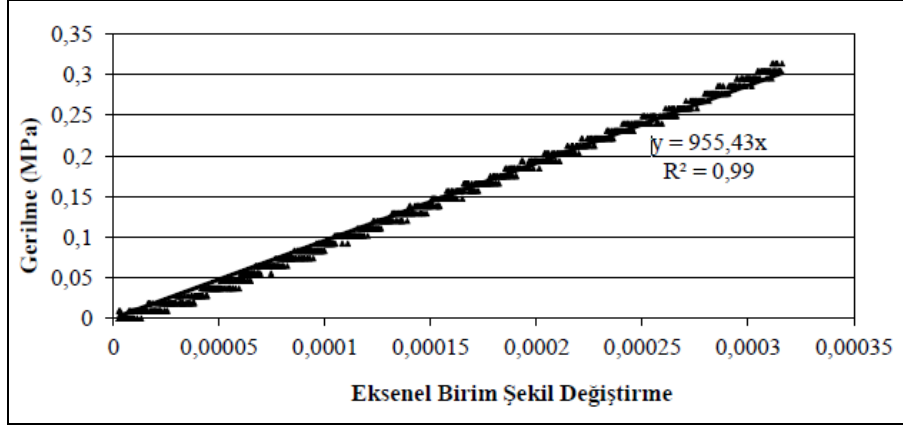
$$f_e = \frac{1,5 \times P \times L}{b \times d^2} \text{ MPa} \quad (4.7)$$

4.5.2 Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Belirlenmesi

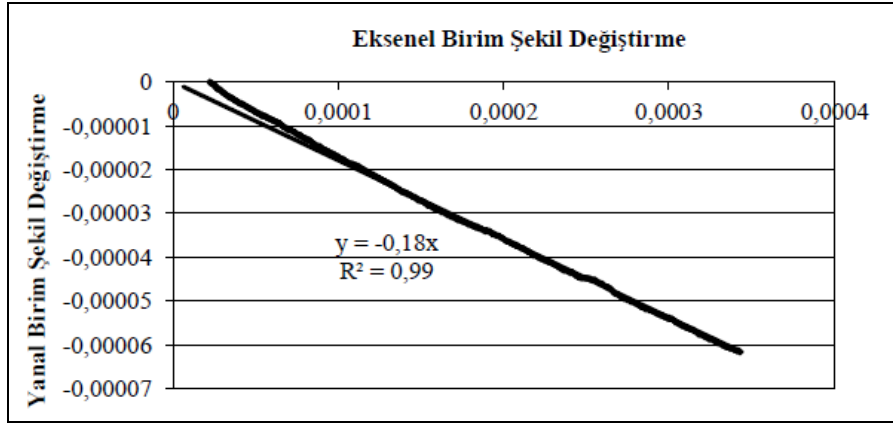
Sayısal analizlerde kullanılacak olan önemli malzeme parametrelerinden Elastisite modülü ve Poisson oranı BS EN 13286-41'e (2003) uygun olarak belirlenmektedir. Bu amaçla tek eksenli basınç deneyi gerçekleştirilmekte, numunelerde meydana gelen yatay ve düşey deformasyonlar, LVDT ya da çift yönlü ölçüm alabilen "strain gauge"ler yardımı ile ölçülmektedir (Şekil 4.11). Bir enjeksiyon malzemesinde elastisite modülü ve poisson oranının belirlenmesi için yapılan deneyin sonucu sırası ile Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Eğrinin eğiminden malzemenin Elastisite Modülü 955 MPa, poisson oranı 0,18 olarak bulunmuştur (Oktay 2017).



Şekil 4.11 Elastisite modülü ve poisson oranının belirlenmesi (Oktay, 2017)



Şekil 4.12 Bir enjeksiyon malzemesine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği (Oktay, 2017)



Şekil 4.13 Bir enjeksiyon malzemesinin yanal birim şekil değiştirme-eksenel birim şekil değiştirme grafiği (Oktay, 2017)

4.6 Model Duvar Deneyleri

Tarihi eserlerin yapısal analizlerinin en önemli aşaması sayısal modellemedir. Sayısal modellemeye, farklı malzemelerden üretilmiş ve değişken kesit geometrisine sahip taşıyıcı sistem elemanlarının mekanik davranışı uygun matematiksel ifadeler ile tanımlanır. Bu amaçla yapıyı oluşturan taşıyıcı sistem elemanlarının küçük parçalara ayrılması gerekir (Casolo and Sanjust, 2009; Vintzileou vd., 2007). Bu parçalar yapıyı oluşturan taş, tuğla, harç gibi malzemeler olup, araştırmalar model duvar deneyleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu deneylerde düşey ve yatay yükler etkisindeki model duvardaki deformasyonlar ölçülerek, gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin yani bünye denklemlerinin kurulması hedeflenir (Yüzer vd., 2015; Doran et al., 2017). Benzer çalışmaların enjeksiyon malzemesi içeren model duvarlarda da yapıldığı, gerek enjeksiyon uygulamasının performansının değerlendirildiği gerekse enjeksiyon malzemesini de içeren sayısal modellerin kurulduğu görülmektedir (Yüzer vd., 2017; Doran et al., 2019).

Enjeksiyon malzemesinin performansının değerlendirildiği model duvar deneylerinde, yük altında çatlaklar oluşturulmakta (Şekil 4.14), bu çatlaklara uygun enjeksiyon malzemesi uygulanmaktadır (Yüzer vd. 2017; Nikolopoulou, 2019).



Şekil 4.14 Model duvarda oluşturulan diyagonal çatlak (Oktay, 2017)

Model duvarda yapılacak enjeksiyon uygulaması tarihi yığma yapıda gerçekleştirilecek uygulamaya benzer şekilde gerçekleştirilir. Hasar oluşturulan model duvarda yapılacak enjeksiyon uygulaması öncesi yapılan hazırlıklarda ilk olarak duvar üzerinde matkapla 45° açılı enjeksiyon delikleri açılır (Şekil 4.15.a). Duvarın tek bir yüzünde açılan bu delikler, çatlak dağılımlarına bağlı olarak 4-5 cm aralıklar ile oluşturulur. İkinci adımda delikler içerisinde bulunan toz malzemenin temizlenmesi için kompresör ile hava basılır ve su enjekte edilerek iç yüzey ıslatılır (Şekil 4.15.b). Uygulama yapılacak yüzeydeki tuğla ve/veya harcın enjeksiyon malzemesi içerisinde bulunan suyu emmesini engellemek için onarım öncesinde ıslatma işlemi yapılır (Şekil 4.15.c). Malzeme enjeksiyonu, açılan deliklere yerleştirilen plastik tüpler yardımı ile yapılır. Uygulanan basınç enjeksiyon boyunca yaklaşık 1 bar değerinde tutulmaktadır (Bras ve Henriques 2012; Jorne vd., 2015a; Jorne vd., 2015b; Jorne vd., 2015c). Enjeksiyon işlemine duvarın alt ucunda bulunan noktalardan başlanır (Şekil 4.15.d). Boşluklar, uygulama boyunca çatlaklardan sızıntı olmasını engellemek amacıyla daha sonra temizlenmek üzere cam macunu ile kapatılır. Enjeksiyon malzemesi ile sağlamlaştırılan model duvarda tekrar yükleme yapılır, enjeksiyon öncesi ve sonrası yük-deplasman değerleri karşılaştırılarak (Şekil 4.16) enjeksiyonun performansı değerlendirilir. Uygulamanın başarısının değerlendirilmesi için ayrıca ultrases ve yapı radarından da yararlanılmaktadır (Şekil 4.17) (Gökyiğit-Arpacı, 2016; Diamanti ve diğ., 2008).



(a)



(b)

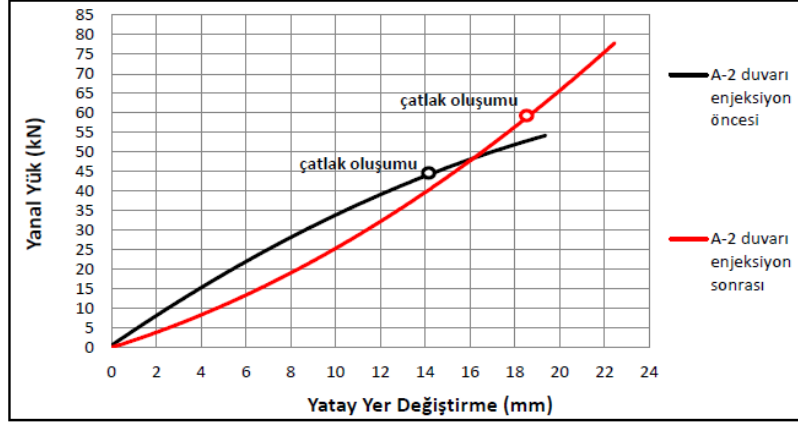


(c)



(d)

Şekil 4.15. Model duvarda enjeksiyon uygulaması (Oktay, 2017)



Şekil 4.16. Uygulama sonrası deney ve sonuçları (Gökyiğit-Arpacı, 2016)



(a)



(b)

Şekil 4.17. Model duvar üzerinde a) yapı radarı (Diamanti vd., 2008) ve b) ultrases ölçümü

5. BÖLÜM

YAPIDA ENJEKSİYON UYGULAMASI VE YAPILAN DENEYLER

Laboratuvar çalışmaları ile taze ve sertleşmiş haldeki performansı değerlendirilen enjeksiyon malzemesinin, tarihi yapıda uygulanmasına karar verildikten sonra aşağıda açıklanan hususların göz önüne alınarak tarihi yapıda yerinde de deneysel çalışmaların yapılması gerekir.

Uygulama öncesi, enjeksiyon malzemesinin incelik, akışkanlık, hacim sabitliği, viskosite, orijinal malzemeye kimyasal, fiziksel ve mekanik uyumluluk, penetrasyon ve enjekte edilebilirlik, su tutma özellikleri araştırılmalıdır. Enjeksiyon uygulama hatalarının başında, enjeksiyon şerbeti içerisinde yüksek oranda su kullanımı gelir. Fazla su, akışkanlığı arttırsa da, sertleşmiş enjeksiyon malzemesinin enjekte edildiği malzeme ile arasındaki adezyonu azaltır. Enjeksiyon ile sağlamlaştırma yöntemi geri dönüşü olmayan bir yöntem olduğu için enjeksiyon öncesi orijinal malzeme özelliklerini taşıyan model duvarlar üretilmeli ve yukarıda açıklanan deneyler gerçekleştirilerek malzemenin performansı değerlendirilmelidir (Uranjek vd., 2010).

Özgün malzemeye uygun enjeksiyon malzemesinin seçiminde veya üretiminde, kullanılacak malzemelerin inceliğine karar vermek için onarım yapılacak yapıdaki çatlak genişlikleri ölçülmeli (Oktay ve Yüzer, 2013); çatlak genişliğine bağlı olarak gerektiğinde kireç esaslı nano hidrolik kireç içeren enjeksiyon malzemesi kullanılmalıdır (Yüzer ve Doran, 2017).

Uygulama yapılacak yığma yapıda malzeme sızıntılarını engellemek için yüzey uygun bir malzeme ile yalıtılmalıdır. Bu sayede enjeksiyon malzemesinin kontrolsüz sızıntıları engellenerek boşlukları doldurması sağlanır. Enjeksiyon deliklerinin daha sonra çok belirgin olmaması için, derz bölgelerinde ve malzemenin penetrasyonunu sağlaması amacıyla yüzeye düşey yönde yaklaşık 45° açı yapacak şekilde açılması önerilir (Van Rickstal, 2000; Bras, 2011). 1 m²'lik yüzey alanı için en az iki adet delik önerilmekte (Binda vd., 1991; Toumbakari, 2002; Valluzzi, 2005), delik derinliklerinin ise duvar kalınlığının en az üçte ikisi kadar olması gerektiği belirtilmektedir (Binda vd., 1991).

Enjeksiyon malzemelerinin yapıda uygulanabilmesi için en uygun ortam sıcaklığının 20-30 °C arasında olduğu, bu sıcaklığın altındaki ortam koşullarının uygun olmadığı tespit edilmiştir. 40 °C sıcaklığın enjekte edilebilirlik açısından uygun olduğu görünse de enjeksiyon malzemelerinde topaklanmalar arttığı için enjeksiyon uygulaması için doğru bir sıcaklık olmadığı anlaşılmıştır (Dinç vd., 2018; Dinç-Şengönül vd., 2020). Bekleme süresinin etkisinin araştırıldığı çalışmalarda ise enjeksiyon uygulamasının, enjeksiyon malzemesi üretilir üretilmez gerçekleştirilmesinin uygun olduğu görülmüştür (Dinç vd., 2018; Dinç-Şengönül vd., 2020).

Enjeksiyon malzemesinin su ve/veya kimyasal katkı ile karıştırılmasına dair standart bir yöntem bulunmamakla birlikte, çoğunlukla mekanik karıştırma yolu ile

hazırlandığı; genel olarak 800 ve 2100 rpm olmak üzere iki tip karıştırma hızı uygulandığı görülmektedir (Bras ve Henriques, 2012; Baltazar vd., 2015b; Baltazar vd., 2013a; Jorne vd., 2015b). Uygulanacak yöntem seçilen su/bağlayıcı oranına, kullanılan bağlayıcının inceliğine ve kimyasal katkı miktarına bağlı olarak değişmektedir (Oktay, 2017). Malzemenin enjekte edilebilirlik özellikleri belirlenerek uygulama öncesi karışım yöntemine karar verilmeli; buna göre karıştırma hızı, katkının karışıma dahil edilme süresi şantiyede uygulanmalıdır.

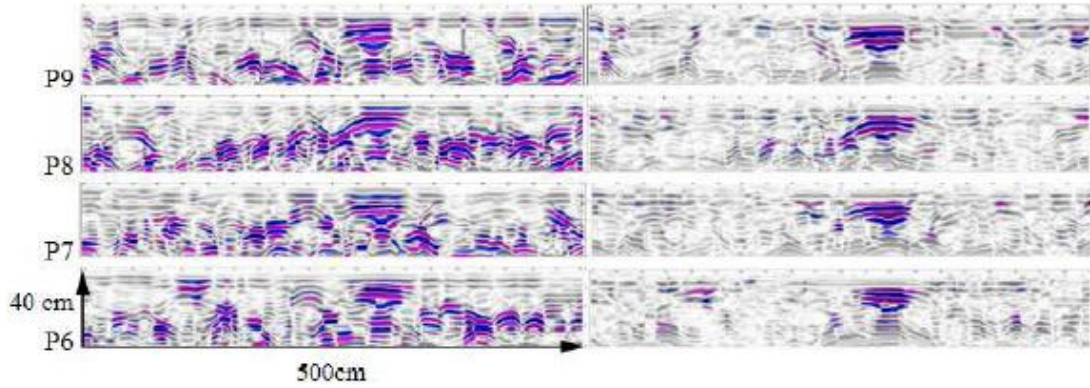
Enjeksiyon sırasında çalışmaya ara vermek bir uygulama hatasıdır. Enjeksiyon malzemesinin karıştırılması durdurulduğunda katı tanelerde çökme gerçekleşir, akışkanlık azalır, homojenlik kaybolur. Enjeksiyon sırasında, yığma yapının yüzeyinin hazırlanması, enjeksiyon deliklerinin delinmesi ve enjekte edilen malzemenin su emme kapasitesine bağlı olarak yapının önceden ıslatılması konularına da hassasiyet gösterilmelidir. Enjeksiyon sırasında yapılan bir diğer hata ise enjeksiyon şerbetine uygun olmayan enjeksiyon basıncının uygulanmasıdır. Yüksek enjeksiyon basıncıyla malzemede ayrışma ve homojenliğin kaybı söz konusudur. Ayrıca enjeksiyon malzemesine uygulanan yüksek basınç yığma yapı tarafından karşılanamayan ek çekme gerilmeleri oluşturacağı için basınç değeri sınırlandırılmalıdır (Uranjek vd., 2010). Yapılan çalışmalarda 0,2-1,0 bar arasında enjeksiyon basınçları önerilmekte (Valluzzi, 2005; Vintzileou and Miltiadou-Fezans, 2008); uygulama esnasında basınç değeri, seçilen enjeksiyon basıncı değerini aştığında, enjeksiyon malzemesinin açılan diğer deliklerin birinden sızdığında ve önceden belirlenen enjeksiyon malzemesi miktarının tamamı bu delikten enjekte edildiğinde enjeksiyon işleminin durdurulması gerekir (Bras, 2011). Enjeksiyon daima alt kısımdan üst kısma doğru yapılmalıdır, aksi durumda açılan delikler kapanabilir ve alt kısımlara enjeksiyon şerbeti yayılmayabilir. Deprem sonrası yapılan analizler, yığma yapı duvarının sadece bir bölümüne enjeksiyon uygulaması yapılmasının iyi sonuçlar vermediği, enjeksiyonun hasarlı duvarın tamamına yapılması gerektiğini ortaya koymuştur. Enjeksiyon sonrasında ise mutlaka ultrases, georadar gibi tahribatsız ve mümkünse flat-jack ve kayma deneyi gibi yarı tahribatlı deneyler ile uygulamanın etkinliği kontrol edilmelidir (Uranjek et al., 2010).

5.1 Tahribatsız Deneyler

Enjeksiyon yöntemi ile onarılacak tarihi yapılarda öncelikle yapı radarı kullanılarak duvardaki boşluklar belirlenmelidir (Şekil 5.1). Bu ölçüm, çok kısa elektromanyetik dalgaların ışıma ve yansıma prensibine dayanır. Yapı içerisinde bulunan boşlukların dolu olan malzemelerden farklı iletkenlik değerlerinde olması, gönderilen dalga'nın yansımaya neden olur. Bu sayede incelenen yapı elemanındaki boşluklar ve dağılımları belirlenebilir. Enjeksiyon uygulama öncesi ve sonrası yapı radarından elde edilen görüntülere örnek, Şekil 5.2'de gösterilmiştir (Uranjek et al., 2012).



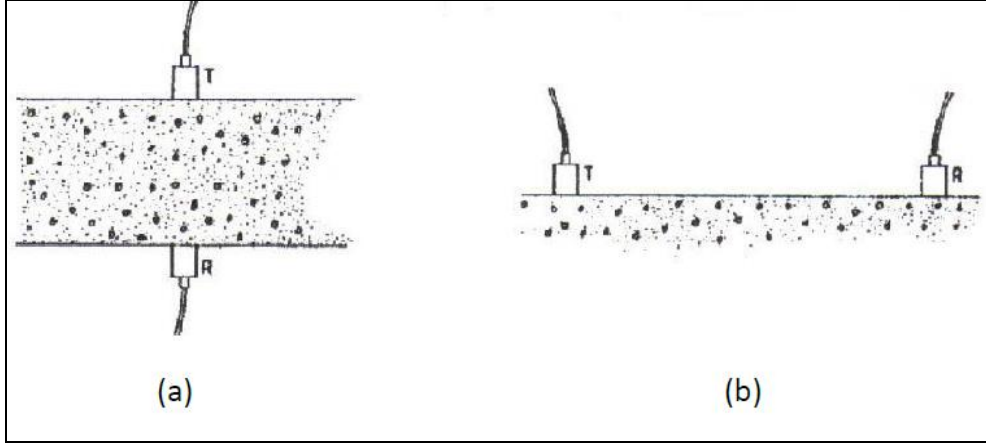
Şekil 5.1 Duvar üzerinde radar uygulaması (Diamanti vd., 2008)



Şekil 5.2 Uygulama öncesi ve sonrası yapı radarı görüntüleri (Mojmir vd., 2012)

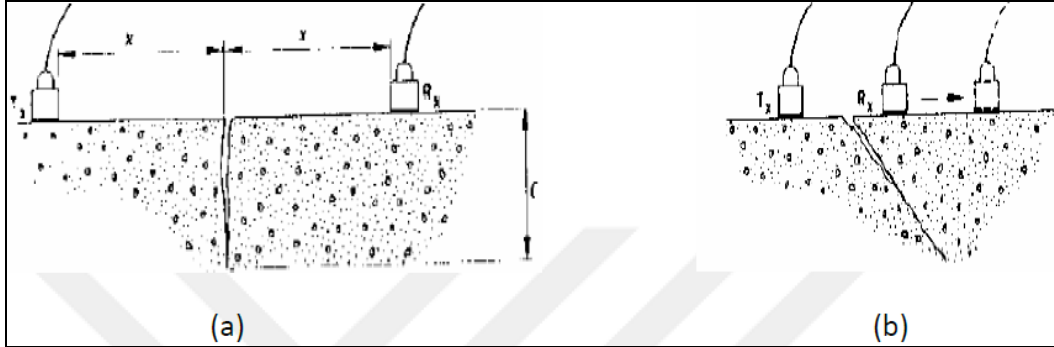
Boşlukların belirlenebilmesi için kullanılacak bir diğer yöntem de ultrases aleti ile ses geçiş süresinin ölçülmesidir. Farklı noktalarda yapılacak okumalar ile yapıda bulunan çatlak derinliği ve yönü belirlenebilir; ayrıca onarım öncesi ve sonrası performans da değerlendirilebilir (Aköz vd., 2001; Yüzer vd., 2006; Gökyiğit-Arpacı vd., 2019).

Ultrases deney tekniğinde ses dalgaları, cisme boşluk bırakılmaksızın temas ettirilen piezoelektrik transduser ile gönderilir ve aynı özellikteki transduser yardımı ile alınır (Şekil 5.3.b). Alıcı ve verici problar arasındaki ses dalgalarının iletim süresi ölçülür. Cismin yoğunluğu düşük ise ve/veya bünyesinde çatlaklar var ise ses dalgalarının yayılımı ve dolayısı ile ses geçiş hızı düşük olur. Ultrases aleti ile Şekil 5.3.a'da görüldüğü gibi karşılıklı yüzeylerde doğrudan veya aynı yüzden (Şekil 5.3.b) dolaylı ölçüm yapılarak ses geçiş süresi (t , μs) ölçülür ve ses geçiş hızı (V , km/s) hesaplanır. Ses geçiş hızının yüksek olması, boşlukların az, dolayısı ile dayanımın yüksek olduğu anlamına gelir, ancak bu deney dayanımın belirlenmesi için tek başına yeterli değildir, diğer ölçümler ile birlikte değerlendirilmelidir.



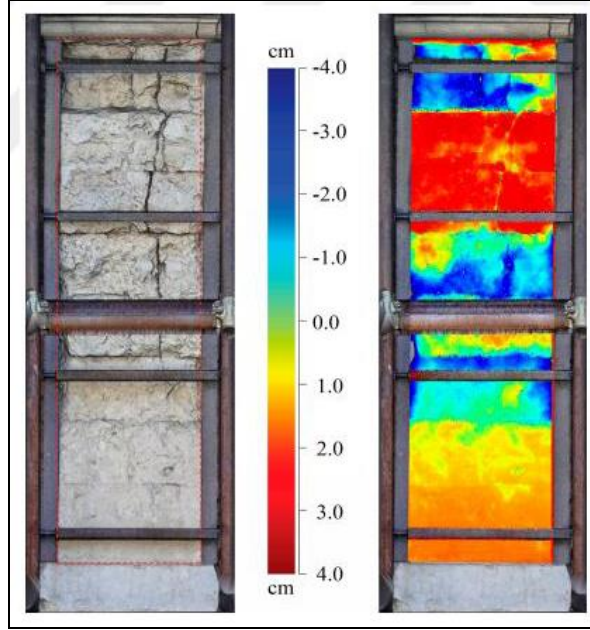
Şekil 5.3 Ultrases aleti ile a) doğrudan ve b) dolaylı ölçüm
(Aköz vd., 2004; BS EN 12504-4, 2004)

Çatlak derinliğinin ve çatlak yönünün araştırılması amacı ile çatlak bölgelerinde BS EN 12504-4'e (2004) uygun olarak Şekil 5.4.a ve 5.4.b'de görüldüğü gibi belirlenen noktalarda, problemlerin yeri değiştirilmek sureti ile ses geçiş süreleri t (μs) ölçülür, gerekli hesaplar yapılarak çatlak derinliği ve yönü belirlenir. Tarihi yapılarda, çatlakların giderilmesi için yapılan enjeksiyon işlemlerinde çatlakların ne oranda giderilebildiğinin araştırılması için bu ölçüm yönteminden yararlanılabilir (Aköz vd., 2004).



Şekil 5.4 Ultrases aleti ile a) çatlak derinliği, b) çatlak yönünün belirlenmesi
(Aköz, 2015; BS EN 12504-4, 2004)

Yüzeye yakın hasarlı bölgelerin, farklı malzemelerin, bozulma ve oyukların belirlendiği bir diğer tahribatsız yöntem ise İnfrared (kızılötesi) tomografisidir. Bu yöntemde tespitler, kızılötesi ışınlar yardımı ile yüzey sıcaklığı ölçülerek yapılır. Kusurlu bölgelerin çevresindeki malzemenin ısı iletimindeki farklılıklar nedeni ile yüzey sıcaklığında da farklı değerler elde edilecektir. İnfrared tomografi yöntemi ile elde edilen bir görüntü Şekil 5.5'te verilmiştir (Costanzo vd., 2014).



Şekil 5.5 İnfrared tomografi yöntemi ile elde edilen görüntü (Costanzo vd., 2014)

5.2 Yarı Tahribatlı Deneyler

Yarı tahribatlı deneyler ile enjeksiyonun performansının yanında, yapı elemanın sayısal analizinde kullanılacak olan malzeme parametreleri de belirlenir. ASTM C1196-09 (2009) ve ASTM C1197-09 (2009) standartlarına göre yapılan flatjack deneyi ile yapı elemanını oluşturan kompozitin elastisite modülü ve ölçülen noktadaki gerilme değeri belirlenir. Bu amaçla çift plaka yöntemi ile yapıya tek doğrultuda basınç yükü uygulanarak birim boy değişimleri okunur ve elastisite modülü hesaplanır. Ayrıca deney düzeneğine yatay olarak yerleştirilecek LVDT yardımı ile poisson oranı da belirlenebilir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Çift plaka ile ölçüm (Oktay, 2017)

Kayma deneyi ASTM C1531’de (2009) tanımlanan Metot B’ye göre yapılır. Bu amaçla deney yapılacak tuğla/taş gibi yığma birim elemanın her iki tarafı boşaltılır, bir tarafa piston konularak uygulanan yük, diğer tarafa LVDT konularak yığma birim elemanda yük etkisi altında meydana gelen kayma miktarı belirlenir. Deney sabit yük etkisi altında tuğlada sürekli kayma gözlenene kadar sürdürülür (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Kayma deneyi düzeneği (Yüzer ve Ulukaya, 2017)

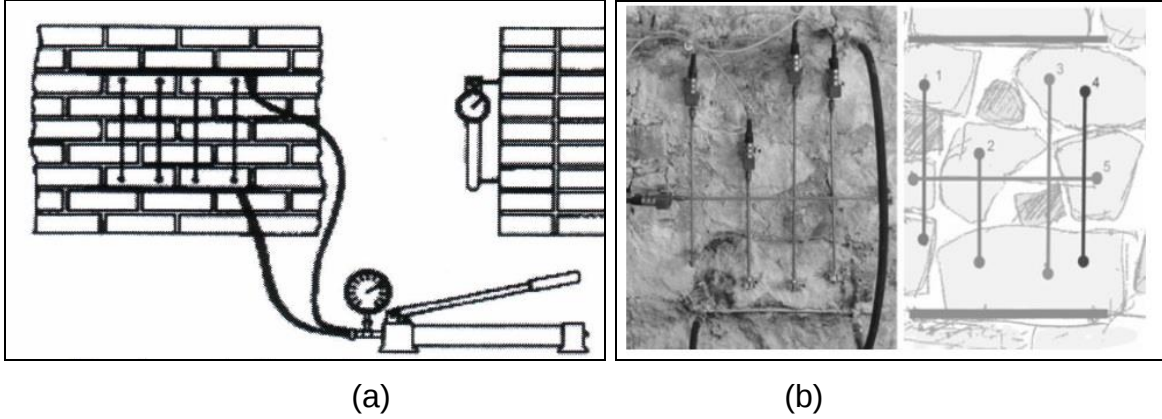
Deney yapılan bölgedeki kayma dayanımı indeksi (τ , N/mm²), tuğlayı kaydıran maksimum yatay kuvvetin tuğlanın harç ile temas eden alt ve üst yüzeylerindeki alanların toplamına oranlanması ile belirlenir. Deneyden elde edilen kayma indeksi (τ , N/mm²), deney yapılan bölgedeki normal gerilmeden dolayı azaltılarak ASTM C1531-09’da (2009) verilen (5.1) bağıntısı yardımı ile hesaplanır.

$$\tau_0 = \tau - \mu(\sigma_v) \quad (5.1)$$

Bu bağıntıda τ_0 düşey yöndeki eksenel yükün “0” olması durumundaki kayma indeksini, μ yığma elemandaki sürtünme katsayısını, σ_v ise deney bölgesindeki tahmini normal gerilmeyi ifade eder. σ_v değeri tekli flat-jack deneyi ile de belirlenebilir (Şekil 5.8). FEMA 356 Madde 7.3.2.6’ya (2000) göre yığma duvarın kayma dayanımı (τ_{me} , N/mm²) (5.2) bağıntısı yardımı ile hesaplanabilir.

$$\tau_{me} = \frac{0,75(0,75\tau_0 + \frac{P_{CE}}{A_n})}{1,5} \quad (5.2)$$

Bağıntıda τ_0 (N/mm²), ortalama kayma indeksini, P_{CE} (N), FEMA 356’daki (2000) 3-18 ve 3-19 bağıntılarında verilen yük kombinasyonları ile elde edilen basınç kuvvetini, A_n (mm²) duvarın net harçlı kesit alanını ifade etmektedir. Tek sıra tuğla duvarlar için bağıntıda τ_0 ’ın önündeki 0,75 katsayısı dikkate alınmamaktadır.



Şekil 5.8 Tekli flat-jack ile yerinde basınç gerilmesinin belirlenmesi
(a: ASTM C1196-92, 1997; b: Oktay ve Yüzer, 2013)

Enjeksiyon yapıldıktan sonra kullanılan malzemenin dayanım kazanma süresine bağlı olarak, açıklanan tahribatlı ve tahribatsız deneyler tekrarlanarak onarım sonrası duvar elemanının davranışı incelenmeli, enjekte edilen şerbetin gelişimi ve beklenen sonuç değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

Akbulut, D. E., Arpacı, E. Y. G., Oktay, D. ve Yüzer, N. (2018). Tarihi Yiğma Yapıların Onarımında Kullanılan Enjeksiyon Yönteminin (Grouting) ve Kireç Esaslı Enjeksiyon Malzemesinin Zaman İçerisinde Gelişimi. *Megaron*, 13(1): 156-168.

Akman, M.S., Guner, A. ve Aksoy, I.H., (1986). The History and Properties of Khorasan Mortar and Concrete. *Proceedings of the 2nd International Congress on the History of Turkish and Islamic Science and Technology, Turkish and Islamic Science and Technology in the 16th Century*, ITU Research Center of History of Science and Technology, 28 April-2 May 1986, Istanbul, 101–112.

Akman, S., (2003). Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426: 30–36.

Aköz, F., Yüzer, N., Çakır, Ö. ve Kabay, N., (2001). Investigation of Material Properties of Dolmabahçe Palace Reception (Muayede) Hall's Dome and Vaults. *Studies in Ancient Structures*, pp 659-668, İstanbul, Türkiye, 9-14 July.

Aköz, F., Yüzer, N., Çakır, Ö., Kabay, N., Kızılkanaat, A. ve Özçiftçi, N., (2004). *Temel Yapı Malzemesi Deneyleri*, Y.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İnşaat Bölümü, Basım Yayın Merkezi, İstanbul.

Assaad, J.J., (2015). Correlating Water Extraction to Viscosity Variations of Injection Grouts. *Construction Building Materials*, 77: 74-82.

ASTM D560, (2015). *Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures*, Pennsylvania.

ASTM C940, (2010). *Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory*, ASTM, Pennsylvania.

ASTM C943, (2003). *Standard Practice for Making Test Cylinders and Prisms for Determining Strength and Density of Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory*, ASTM, Pennsylvania.

ASTM C941-02, (2002). *Standard Test Method for Water Retentivity of Grout Mixtures for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory*, ASTM, Pennsylvania.

ASTM C1196 2014). *Standard Test Method for In Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flatjack Measurements*, USA.

ASTM C1197-09, (2009). *Standard Test Method for In Situ Measurement of Masonry Deformability Properties Using the Flatjack Method*, USA.

ASTM C1531-09, (2009). *Standard Test Methods for in Situ Measurement of Masonry Mortar Joint Shear Strength Index*. USA.

ASTM D 6910, (2009). *Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Clay Construction Slurries*, ASTM, Pennsylvania.

Atahan, H.N., Oktar, O.N. ve Taşdemir, M.A., (2009). Effects of Water-Cement Ratio and Curing Time on the Critical Pore Width of Hardened Cement Paste, *Construction and Building Materials*, 23(3): 1196–1200.

Axelsson, M., Gustafson, G. ve Fransson, A., (2009). Stop Mechanism for Cementitious Grouts at Different Water-to-Cement Ratios. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(4): 390–397.

Baltazar, L.G., Henriques, F.M. ve Jorne, F., (2012). Optimisation of Flow Behaviour and Stability of Superplasticized Fresh Hydraulic Lime Grouts Through Design of Experiments. *Construction Building Materials*. 35: 838-845.

Baltazar, L.G., Henriques, F.M.A., Jorne, F. ve Teresa, M., (2013). The Use of Rheology in the Study of the Composition Effects on the Fresh Behaviour of Hydraulic Lime Grouts for Injection of Masonry Walls. *Rheological Acta*, 52: 127–138.

Baltazar, L.G., Henriques, F.M.A., Jorne, F. ve Cidade, M.T., (2013). Performance Improvement of Hydraulic Lime Based Grouts for Masonry Consolidation: An Experimental Study. *WIT Transactions on the Built Environment*, 131: 417–430.

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.

Baltazar, L.G. ve Henriques, F.M.A., (2015). Rheology of Grouts for Masonry Injection. *Key Engineering Materials*, 624: 283–290.

Baltazar, L.G., Henriques, F.M. ve Cidade, M.T., (2015). Experimental Study and Modeling of Rheological and Mechanical Properties of NHL Grouts, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27: 04015055.

Baltazar, L.G., Henriques, F.M.A. ve Cidade, M.T., (2015). Contribution to the Design of Hydraulic Lime-Based Grouts for Masonry Consolidation. *Journal of Civil Engineering and Management*, 21(6): 698-709.

Biçer-Simsir, B., Griffin, I., Palazzo-Bertholon, B. ve Rainer, L., (2009). Lime-Based Injection Grouts for The Conservation of Architectural Surfaces. *Reviews in Conservation*, 10: 3–17.

Binda, L., ve d., (1991). Strengthening and Durability of Decayed Brick Masonry Repaired by Injections. *Proceedings 5th North American Masonry Conference*, 3-6 June 1991, Illinois, 839-852.

Binda, L., Modena, C., Baronio, G. ve Abbaneo, S., (1997). Repair and investigation techniques for stone masonry walls. *Construction and Building Materials*, 11(3): 133–142.

Borrelli, E., (1999). Conservation of Architectural Heritage, Historic Structures and Materials/ Porosity, ICCROM ARC Laboratory Handbook, Vol. 2 , Rome.

Boynton, R.S., (1980). *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*, 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc, New York.

Böke, H., Çizer, Ö., İpekoğlu, B., Uğurlu, E., Şerifaki, K. ve Toprak, G., (2008). Characteristics of Lime Produced from Limestone Containing Diatoms. *Construction Building Materials*, 22: 866-874.

Bras, A. Henriques, F.M. ve Cidade, M., (2010). Effect of Environmental Temperature and Fly Ash Addition in Hydraulic Lime Grout Behaviour. *Construction Building Materials*. 24(8): 1511-1517.

Bras, A., (2011). *Grout Optimization for Masonry Consolidation*, Ph.D. Thesis, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Bras, A. ve Henriques, F.M.A., (2009). The Influence of The Mixing Procedures on The Optimization of Fresh Grout Properties. *Materials Structures*, 42: 1423.

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(8): 1511–1517.

Bras, A. ve Henriques, F.A.M., (2012). Natural Hydraulic Lime Based Grouts–The Selection of Grout Injection Parameters for Masonry Consolidation. *Construction and Building Materials*, 26(1): 135–144.

Bras, A. ve Henriques, F.M.A., (2013). Rheological Behaviour of Hydraulic Lime-Based Grouts Shear-Time and Temperature Dependence. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 17(2): 223–242.

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.

BS EN 1936, (2006). *Natural Stone Test Method. Determination of Real Density and Apparent Density and of Total and Open Porosity*, British Standards, United Kingdom.

BS EN 12504-4 (2004). Testing Concrete. Determination of Ultrasonic Pulse Velocity, British Standards United Kingdom.

BS EN 13286-41, (2003). *Unbound and Hydraulically Bound Mixtures-Part 41: Test Method for Determination of the Compressive Strength of Hydraulically Bound Mixtures*, British Standards, United Kingdom.

Callebaut, K., Elsen, J., Van Balen, K. ve Viaene, W., (2001). Nineteenth Century Hydraulic Restoration Mortars in The Saint Michael's Church (Leuven, Belgium): Natural Hydraulic Lime or Cement?, *Cement Concrete Research*, 31: 397-403.

Casolo, S. ve Sanjust, C. A., (2009). Seismic analysis and strengthening design of a masonry monument by a rigid body spring model: The “Maniace Castle” of Syracuse”, *Engineering Structures*, 31(7): 1447-1459.

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.

Denel, S., (1982). *Batılılaşma Sürecinde İstanbul'da Tasarım ve Dış Mekânlarda Değişim ve Nedenleri*, ODTÜ Yayını, Ankara.

Diamanti, N., Giannopoulos, A. ve Forde, M.C. (2008). Numerical Modelling and Experimental Verification of GPR to Investigate Ring Separation in Brick Masonry Arch Bridges, *NDT and E International*, 41: 354-363.

Dinç, B., Yüzer, N. ve Oktay, D. (2018). Effect of Temperature on Rheological Properties of Lime-Based Grouts, *13th International Congress on Advances in Civil Engineering*, 12 – 14 September.

Dinç, B. (2018). *Kireç Esaslı Enjeksiyon Malzemelerinin Reolojik Özelliklerine Sıcaklık ve Bekleme Süresinin Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Dinç-Şengönül, B., Oktay, D. ve Yüzer, N. (2020). Effect of Temperature, Resting Time and Brick Dust (Horasan) on the Rheological Properties of Hydraulic Lime-Based Grouts. *Construction and Building Materials*, 265: 120644.

Doran, B., Köksal, H.O., Aktan, S., Ulukaya, S., Oktay, D. ve Yüzer, N. (2017). In-Plane Shear Behavior of Traditional Masonry Walls, *International Journal of Architectural Heritage*, 11 (2): 278-291.

Doran, B., Yüzer, N., Aktan, S., Oktay, D. ve Ulukaya, S. (2019). Numerical Modeling of Traditional Masonry Walls Strengthened with Grout Injection, *International Journal of Architectural Heritage*, doi.org/10.1080/15583058.2019.1618970.

Eklund, D. ve Stille, H., (2008). Penetrability Due to Filtration Tendency of Cement-Based Grouts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(4): 389–398.

Falchi, L., Müller, U., Fontana, P., Izzo, F.C. ve Zendri, E., (2013). Influence and Effectiveness of Water-Repellent Admixtures on Pozzolana-Lime Mortars for Restoration Application, *Construction and Building Materials*, 49: 272-280.

Faria, P., Henriques, F. ve Rato, V., (2008). Comparative Evaluation of Lime Mortars for Architectural Conservation. *Journal of Cultural Heritage*, 9(3):338–346.

FEMA 356, (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*.

Gökyiğit-Arpacı, E.Y. (2016). *Tarihi Yığma Yapıların Onarımında Kullanılan Enjeksiyon Malzemesinin (Grout) Performans Değerlendirmesi Ve 19. Yüzyıl Tuğla Yığma Yapılarda Örneklenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Gökyiğit-Arpacı, E.Y., Oktay, D., Yüzer, N., Ulukaya, S. ve Ekşi-Akbulut, D. "Performance Evaluation Of The Lime-Based Grout Used For Consolidation Of Brick

Masonry Walls”, (2019). *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, Vol 31 (6), June.

Gulotta, D., Goidanich, S., Tedeschi, C. ve Toniolo, L., (2015). Commercial NHL-Containing Mortars for the Preservation of Historical Architecture. Part 2: Durability to Salt Decay. *Construction and Building Materials*, 96: 198-208.

ISO 7724-1, (1984). *Paints and varnishes-Colorimetry-Part 1: Principles*, Geneva.

Jorne, F., Henriques, F.M.A. ve Baltazar, L.G., (2014). Evaluation of Consolidation of Grout Injection with Ultrasonic Tomography. *Construction and Building Materials*, 66: 494–506.

Jorne, F., Henriques, F.M.A. ve Baltazar, L.G., (2015a). Injection Capacity of Hydraulic Lime Grouts in Different Porous Media, *Materials and Structures*, 48: 2211-2233.

Jorne, F., Henriques, F.M.A. ve Baltazar, L.G., (2015b). Evaluation of Consolidation of Different Porous Media with Hydraulic Lime Grout Injection. *Journal of Cultural Heritage*, 16(4): 438-451.

Jorne, F., Henriques, F.M.A. ve Baltazar, L.G., (2015c). Influence of Superplasticizer, Temperature, Resting Time and Injection Pressure on Hydraulic Lime Grout Injectability. Correlation Analysis Between Fresh Grout Parameters and Grout Injectability. *Journal of Building Engineering*, 4: 140-151.

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.

Karatasios, I., Kilikoglou, V., Theoulakis, P., Colston, B. ve Watt, D., (2008). Sulphate Resistance of Lime-Based Barium Mortars. *Cement and Concrete Concrete*, 30(9): 815–821.

Miltiadou-Fezans, A. ve Tassios, T.P. (2012). Fluidity of Hydraulic Grouts for Masonry Strengthening. *Materials Structures*. 45: 1817-1828.

Miltiadou-Fezans, A. ve Tassios, T. P. (2013). Penetrability of Hydraulic Grouts'. *Materials and Structures*, 46:1653-1671.

Mojmir, U., Violeta, B. ve Vlatko, B., (2012). "Performance of Ndt, Mdt and Dt Techniques in Assessing the Effectiveness of Grouting", 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, 15-17 October 2012, Wroclaw.

Moropoulou, A., Bakolas, A. ve Bisbikou, K., (2000). Investigation of the Technology of Historic Mortars. *Journal of Cultural Heritage*, 1(1): 45–58.

Nikolopoulou, V., Adamia, C., Karagiannakia, D., Vintzileou, E. ve Androniki Miltiadou-Fezans (2019). Grouts for strengthening two-and three-leaf stone masonry, made with earthen mortars', *International Journal of Architectural Heritage*, 13:5, 663-678.

Oktay, D. ve Yüzer, N. (2013). Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılan Enjeksiyon Yönteminin (Grouting) Değerlendirilmesi. 4. Tarihi Yapıların Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, İMO, 377-386, İstanbul, 27-29 Kasım.

Oktay, D., (2017). Tarihi Kireç Harçlarına Uygun Enjeksiyon Malzemelerinin Üretilmesi ve Model Duvarlarda Uygulanmasının Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Oktay, D., Uğuryol, M., Güner, M.B., Hazar Yoruç, A.B. ve Yüzer, N. (2020). Tarihi Binaların Sağlamaştırılması İçin Killi Kireçtaşından Üretilen Enjeksiyon Malzemesinin Karakterizasyonu. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Vol 35(3) pp. 1387-1397.

Onaran, K., (2011). Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.

Papayianni, I., Stefanidou, M. ve Pachta, 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, 1123–1133.

Papayianni, I. ve Pachta, V., (2015). Experimental Study on the Performance of Lime-Based Grouts Used in Consolidating Historic Masonries. Materials and Structures, 48(7): 2111-2121.

Papayianni, I., Stefanidou, M. ve Pachta, 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, 1123–1133.

Roussel, N. Lemaître, A. Flatt, R.J. ve Coussot, P. (2010). Steady State Flow of Cement Suspensions: A Micromechanical State of The Art. Cement and Concrete Research, 40: 77-84.

Su, Z., Tinjum, J., Gokce, A. ve Edil, T., (2014). Freeze-Thaw Cycling Effect on the Constrained Modulus and UCS of Cementitiously Stabilized Materials. Geo-Shanghai Pavement Materials, Structures and Performance, ASCE, Geotechnical Special Publications (GSP 239) 364–374.

Toumbakari, E., (2002). Lime-Pozzolan-Cement Grouts and Their Structural Effects on Composite Masonry Walls, Ph.D. Thesis, Catholic University of Leuven, Leuven.

TS EN 445, (2012). Şerbet-Öngerilmeli Tendonlar İçin Deney Yöntemleri, TSE, Ankara.

TS EN 447, (2012). Şerbet-Öngerilmeli Tendonlar İçin Temel Gereklere, TSE, Ankara.

TS EN 459-1, (2015). Yapı Kireci - Bölüm 1: Tarifler, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara.

TS EN 1015-11, (2000). Kâgir harcı-Deney Metotları-Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini, TSE, Ankara.

TS EN 12370, (2001). *Doğal Taşlar - Deney Metotları - Tuz Kristallenmesine Direncin Tayini*, TSE, Ankara.

TS EN 15801, (2010). *Kültürel Varlıkların Korunması - Deney Metotları - Suyun Kılcal Emiliminin Tayini*, TSE, Ankara.

TS EN 15886, (2011). *Kültürel varlıkların korunması-Deney metotları- Yüzeylerin renk ölçümü*, TSE, Ankara.

Uğuryol, D., (2011). *Yıldız Sarayı (Yıldız Teknik Üniversitesi) Bahçesindeki Çeşmeler: Belgeleme ve Koruma Önerileri*, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ulukaya, S., (2016). *Tarihi Kireç Harcı Özelliklerine Uygun Yeni Malzemelerin Üretimi ve Sayısal Analiz için Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi*, Doktora Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ulukaya, S. ve Yüzer, N., (2016). Assessment of Pozzolanicity of Clay Bricks Fired at Different Temperatures for Use in Repair Mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, Vol 28 (8).

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.

Uranjek, M., Roko, Z., Violeta, B-B., ve Vlatko, B. (2012). Performance of Ndt, Mdt and Dt Techniques in Assessing the Effectiveness of Grouting. *8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*, 15-17 Ekim.

Valluzzi, 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*, 26-28 January 2005, Delft.

Van Rickstal, F. (2000). *Grout Injection of Masonry*, PhD Thesis, Catholic University of Leuven, Belçika.

Vintzileou, E., Zagkotsis, A., Repapis, C. ve Zerisve, Ch. (2007). Seismic behaviour of the historical structural system of the island of Lefkada, Greece. *Construction and Building Materials*, 21: 225-236.

Vintzileou, E. ve Miltiadou-Fezans, A. (2008). Mechanical Properties of Three-leaf Stone Masonry Grouted with Ternary or Hydraulic Lime-based Grouts, *Engineering Structures*, 30(8): 2265–2276.

Xu, S., Wang, J. ve Sun, Y., (2015). Effect of Water Binder Ratio on the Early Hydration of Natural Hydraulic Lime. *Materials and Structures*, 48: 3431-3441.

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.

Vitruvius, (1960). *The Ten Books on Architecture*, Ed. Morgan, M.H., Dover Inc, New York.

Yüzer, N., Oktay, D., Ulukaya, S., ve Gökyiğit-Arpacı, E.Y. (2015). Mechanical behavior of two-wythebrick masonry walls injected with hydraulic lime grout. *REHAB 2015 - 2nd International Conference on Preservation, Maintenance and Rehabilitation of Historical Buildings and Structures*, Porto, Portekiz, pp.879-888, 22-24 July.

Yüzer, N. ve Ulukaya, S. (2017). *Göztepe Tarihi Tren Garı Malzeme Özellikleri Analiz Raporu*, YTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.

Yüzer, N., Çakır, Ö., Kabay, N. ve Kızıllanat, A. B. (2006). The Effects of Environmental Conditions on Deterioration Process in Historic Buildings. *Seventh International Congress on ACE*, Yıldız Technical University, İstanbul, Turkey, İstanbul, s.447, October 11-13.

Yüzer, N., Yoruç, A.B., Berilgen, M. ve Doran, B. (2015). *Tarihi Yapıların Tuğla Duvar Özgün Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi Ve Yük Altında Davranışının Model Deneylerle Araştırılması*, 111M568 no'lu TÜBİTAK Projesi Raporu.

Yüzer, N. ve Doran, B. (2017). *Enjeksiyon Yöntemi (Grouting) ile Onarılmış Tarihi Tuğla Duvarların Yük Altında Davranışının İncelenmesi*, 114M256 no'lu TÜBİTAK Projesi Raporu.



Prof. Dr. Nabi YÜZER

1989 yılında Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 1990 yılında özel bir kuruluştaki çalıştı. 1991 yılında Yıldız Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak akademik çalışmalarına başladı. 1992 yılında Yıldız Teknik Üniversitesinde Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı, 1998 yılında doktora derecesi aldı. Y.T.Ü. İnşaat Fakültesinde 2000 yılında Yrd. Doçent, 2005 yılında Doçent, 2011 yılında Profesör oldu. YTÜ Yapı Malzemeleri Anabilim Dalı Başkanlığı görevini sürdüren Yüzer, Malzeme Bilimi, Yapı Malzemeleri ve Tarihi Yapı Malzemeleri konularında lisans ve lisansüstü derslerini yürütmektedir.



Dr. Öğr. Üyesi Didem OKTAY

2008 yılında Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2010 yılında Yıldız Teknik Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak akademik çalışmalarına başladı. 2011 yılında İstanbul Teknik Üniversitesinde Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı, 2017 yılında doktora derecesi aldı. Y.T.Ü. İnşaat Fakültesinde 2019 yılında Dr. Öğr. Üyesi unvanı alan Oktay, Malzeme Bilimi ve Yapı Malzemeleri konularında lisans derslerini yürütmektedir.