

*İnşaat Mühendisleri Odası
Seminerleri
25 Kasım 2024*

KİREÇ ESASLI ENJEKSİYON UYGULAMASI KAPADOKYA BÖLGESİ PERİ BACASI ÖRNEĞİ



PROF. DR. NABİ YÜZER
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

Enjeksiyon Yöntemi

Yapıdaki çatlak ve boşlukların
doldurulması sağlanır.



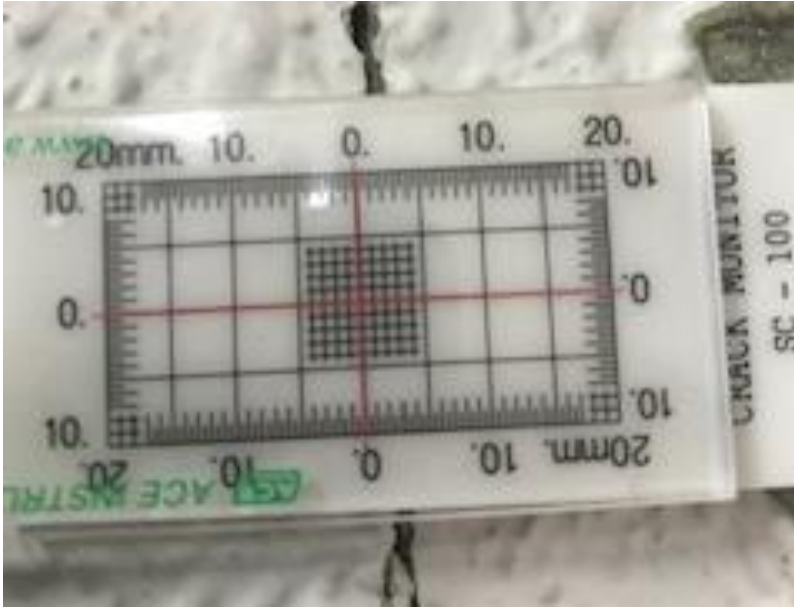
Yapıdaki süreksizlikler
giderilir.



Doluluk oranı artırılarak yapının
dayanım ve dayanıklılığı artırılır.

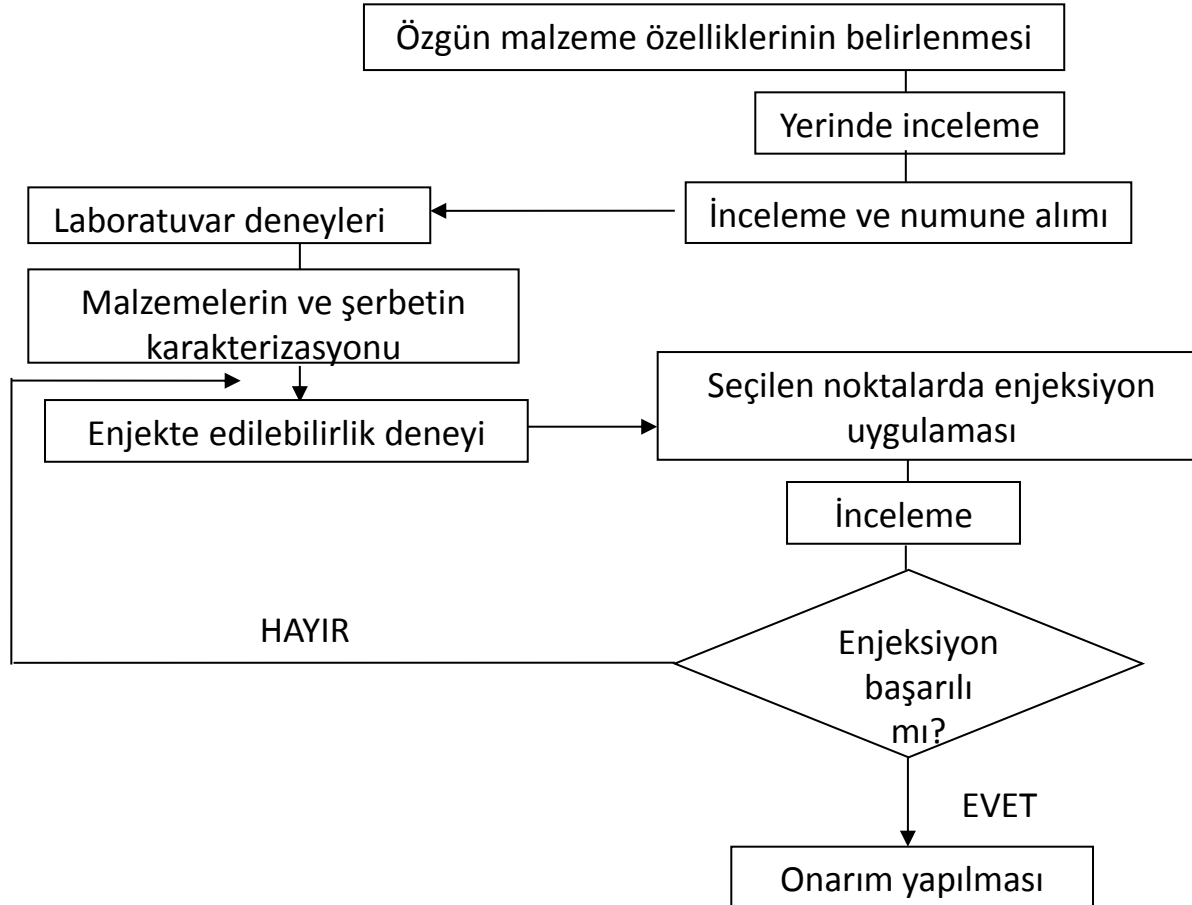


Çatlak pasif mi yoksa aktif mi?



Aktif çatlağa neden olan faktör ortadan kaldırılmadan uygulama yapılamaz!

Uygulama Yöntemi



Enjeksiyon tekniğinin uygulama yöntemi (Binda vd., 1997)

GİRİŞ

➤ Özgün malzeme ile uyum

- Fiziksel
- Mekanik
- Kimyasal
- Mineralojik
- Estetik



ENJEKTE EDİLEBİLİRLİK DENEYİ

➤ Akışkanlık, *Hacim Sabitliği ve Penetrasyon*

- Akış konisi (EN 445)
 φ 10 mm (1lt grout)
(t_0) ve (t_{30}) $\leq$ 25 saniye
- Marsh hunisi (ASTM D6910)
 φ 4.7 mm (0,5 lt grout)
(t_0) ve (t_{30}) $\leq$ 45 saniye
(t_0) ve (t_{30}): Sırası ile başlangıçta ve 30 dak.
sonra ölçülen değerler



Akış konisi ve Marsh hunisi, sahada çok kolay uygulanabilecek testler

ENJEKTE EDİLEBİLİRLİK DENEYİ

➤ Akışkanlık, *Hacim Sabitliği* ve Penetrasyon

- Terleme deneyi
- TS EN 447
- 1lt kap içine 800ml enj.m.
- 24. saatte ölçüm
- Terleme ≤ %5

$$Terleme(\%) = \frac{V_s}{V_o} \times 100$$



Terleme deneyi

ENJEKTE EDİLEBİLİRLİK DENEYİ

➤ Akışkanlık, Hacim Sabitliği ve *Penetrasyon*

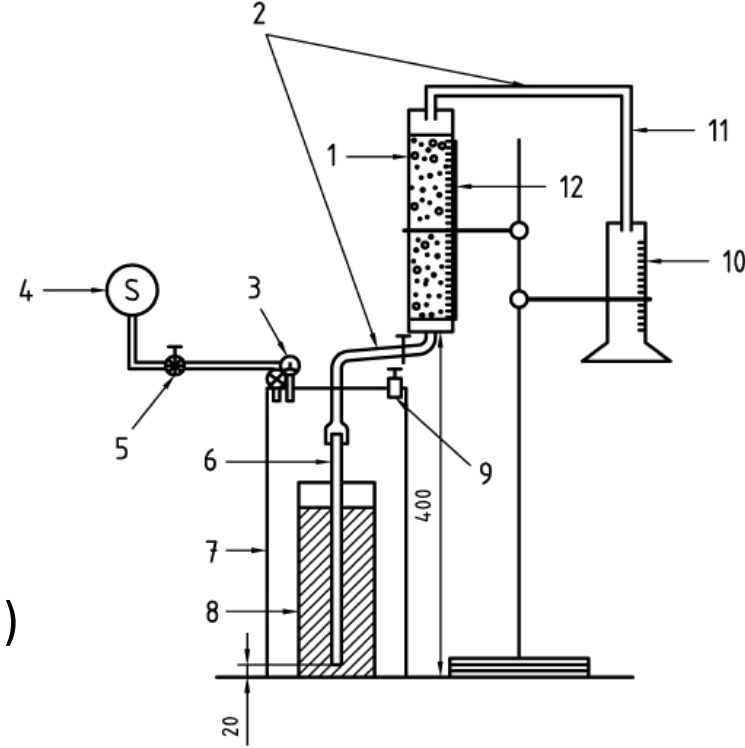
- ✓ Geçebilirlik Özelliği
- ✓ EN 1771
- ✓ Malzemenin kum kolonu içine enjekte edilebilen miktarına ve süresine bakılarak geçebilirlik özelliği değerlendirilir.

1: Kum dolu enjeksiyon tübü (f22,2/h:360 mm)

4: Basınç kaynağı

8: Deney numunesi (enjeksiyon malzemesi)

10: Enjeksiyon malzemesi toplama kabı



Kum kolonu deneyi 1 (EN 1771, 2004)

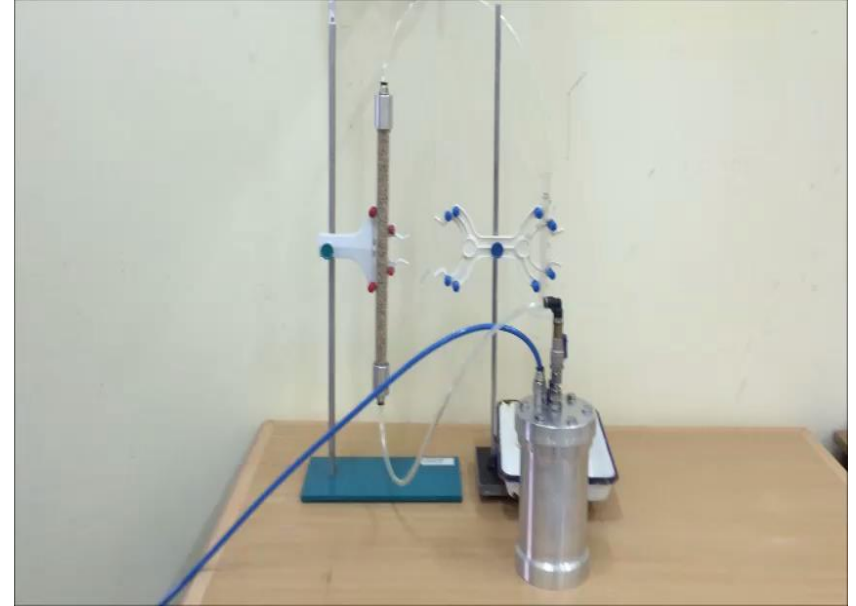
ENJEKTE EDİLEBİLİRLİK DENEYİ

➤ Akışkanlık, Hacim Sabitliği ve *Penetrasyon*

- Kum kolonu testi (EN 1771)
- 0,63 – 1.25 mm silis kumu*
- (0.2mm'den küçük çatlaklar)
- 1.25 – 2.5 mm silis kumu**
- (0.2 – 0.4 mm çatlaklar)
- 2.5-4 mm silis kumu**
- (0.4 mm'den büyük çatlaklar)
- 0.75 ± 0.025 bar basınç
- $T_{36} \leq 50$ saniye

(T_{36} : malzemenin 36cm'lik tüpü doldurduğu süre)

* (EN1771) **Literatür



Kum kolonu deneyi 2

➤ Kum kolonu testine göre enjekte edilebilirlik sınıfları

- Eğer 20 ml enjeksiyon malzemesi kapta toplanırsa ➡ kolay
- Tüp dolar ancak kapta toplanma olmazsa ➡ uygulanabilir
- Tüp dolmadan enjeksiyon durursa ➡ zor

Sand Column Test

SU TUTMA KAPASİTESİ DENEYİ

ASTM C941-02 (2002)'den yararlanılabilir:

Enjeksiyon malzemesi, içerisinde filtre kağıdı bulunan huni içerisine dökülür ve vakum pompası yardımıyla malzeme bünyesindeki karışım suyu dereceli silindire akışı sağlanır.

Kireç esaslı malzemeler için 95 kPa yerine 5 kPa vakum (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.



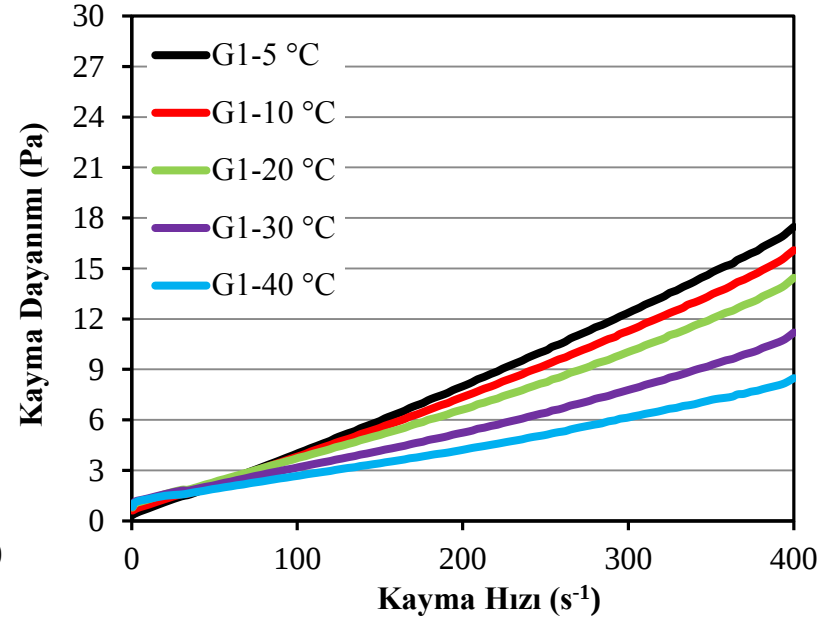
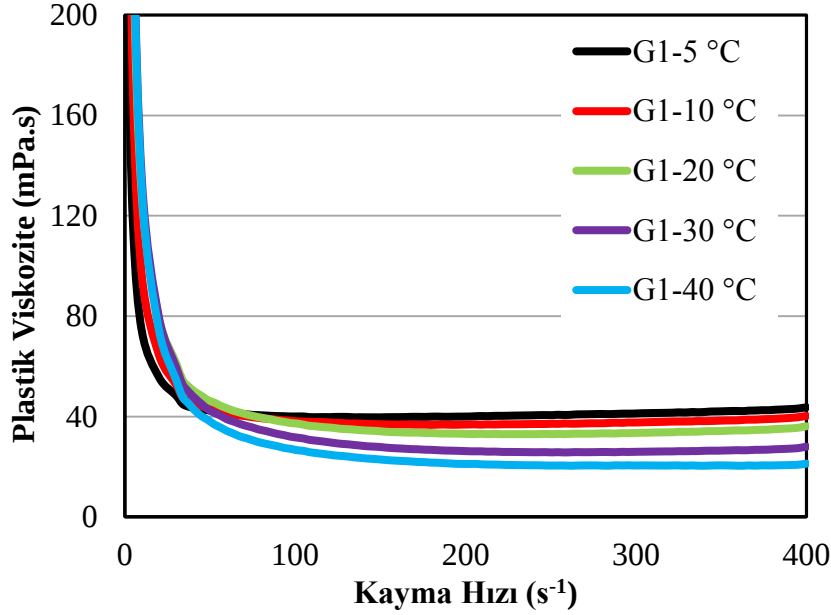
Su tutma kapasitesi deney düzeneği

REOLOJİK ÖLÇÜMLER



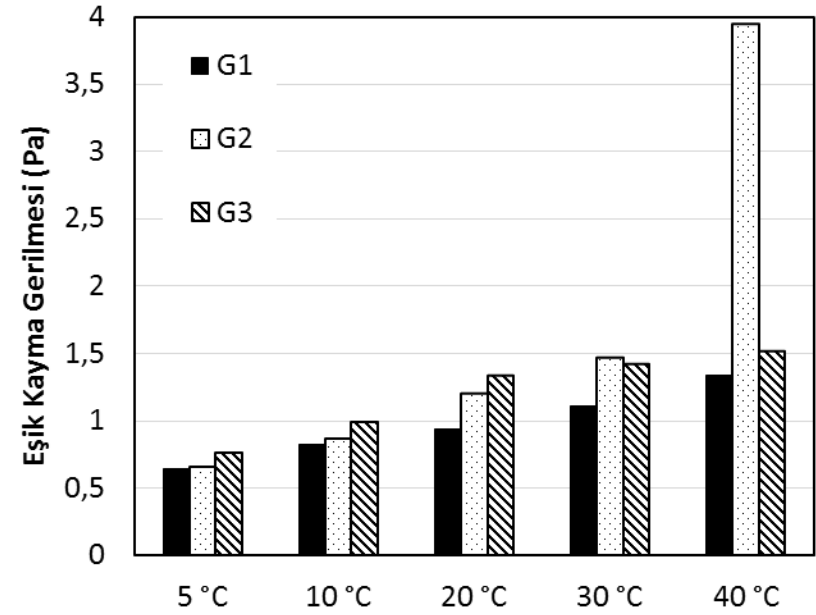
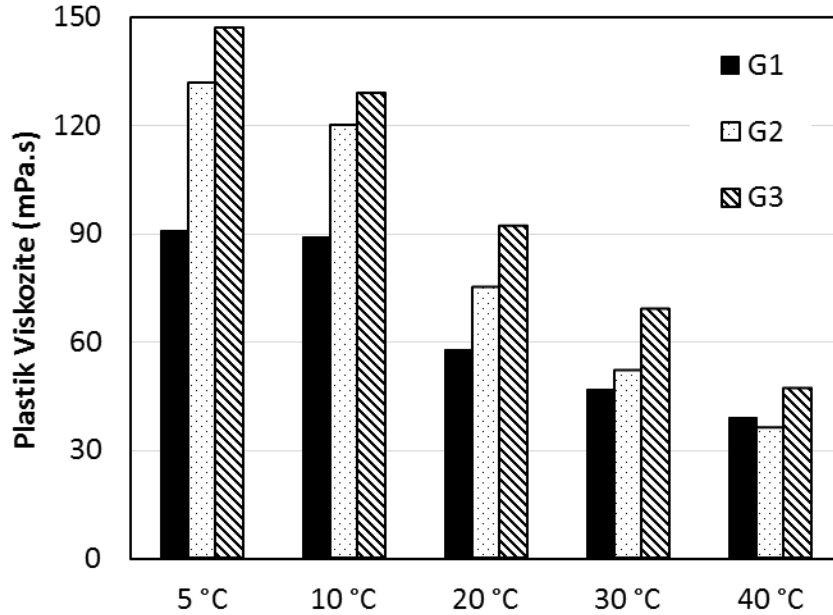
Rotasyonel reometre ve eşmerkezli silindirik ölçüm ucu

REOLOJİK ÖLÇÜMLER



*Örnek akış eğrileri
(Tuğla tozu (Horasan) içeren enjeksiyon malzemesi)*

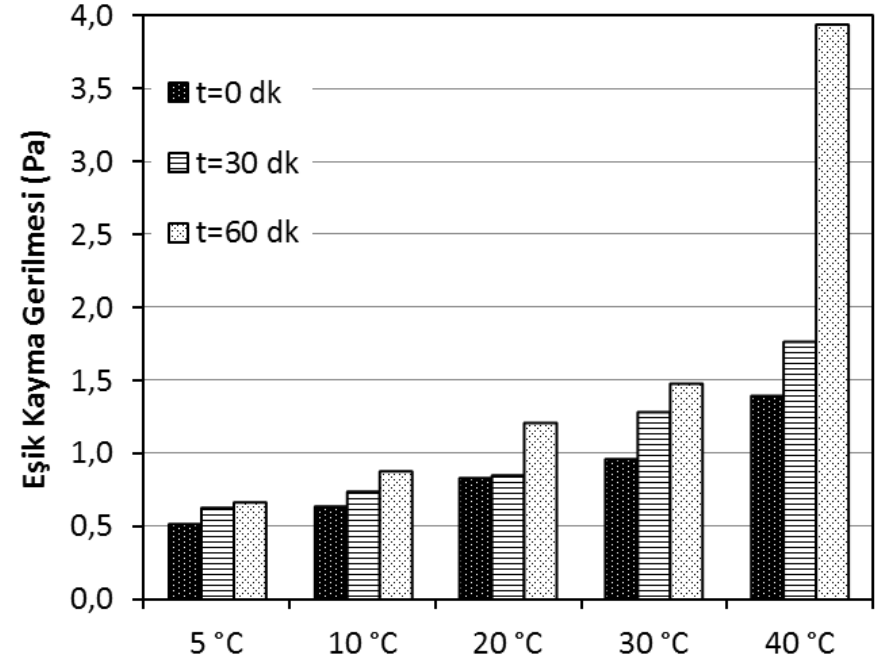
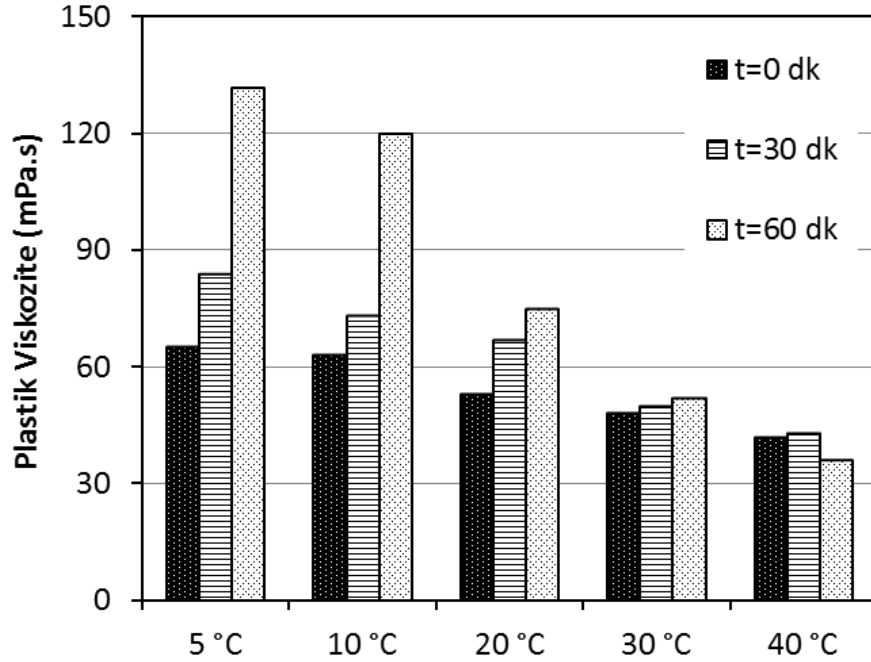
REOLOJİK ÖLÇÜMLER



Sıcaklığın reolojiye etkisi

(Farklı puzolanik aktiviteye sahip tuğla tozu (Horasan) içeren enjeksiyon malzemesi)

REOLOJİK ÖLÇÜMLER



Zamanın reolojiye etkisi

MEKANİK DENEYLER

Eğilme-Basınç Deneyi

TS EN 1015-11

- ✓ 40x40x160 mm numune
- ✓ 28., 90. ve 180. gün deneyleri



Eğilme ve basınç deneyi

MEKANİK DENEYLER

Elastisite Modülü

ASTM C943-10

- ✓ Şerbet enjekte edilebilir kalıplar
- ✓ Enjeksiyon sonrası basınç dayanımı
- ✓ Enjeksiyon sonrası elastisite modülü



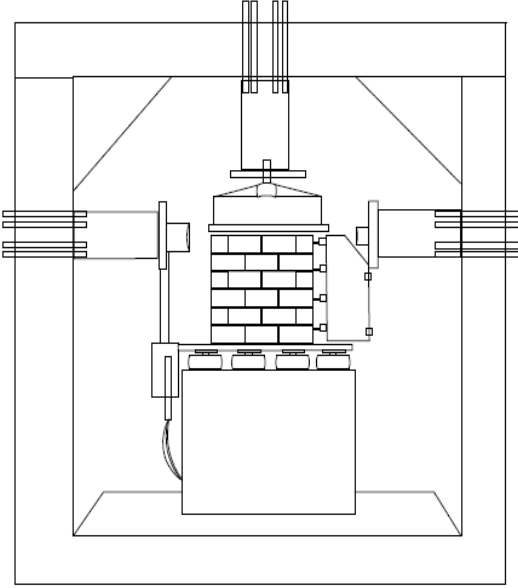
Mekanik deneyler (Uranjek vd., 2011)

MEKANİK DENEYLER



Silindir enjeksiyon deneyi

MODEL DUVAR DENEYLERİ



Model duvarlarda çatlak oluşturulması ve yatay-düşey yük altında davranışının araştırılması

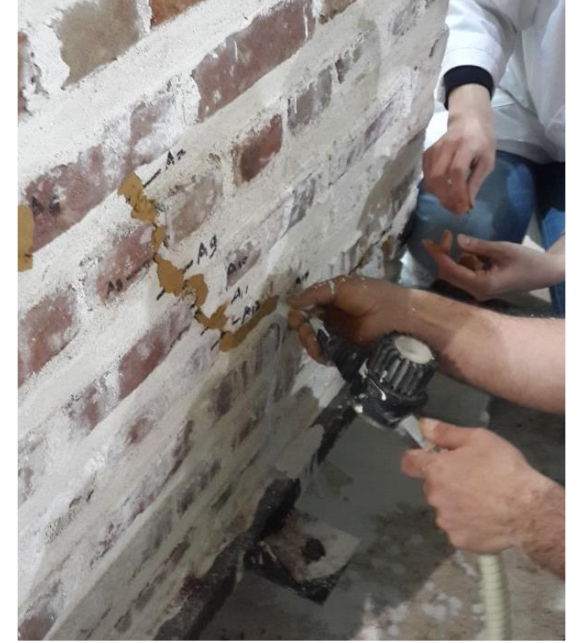
MODEL DUVAR DENEYLERİ



Hava ile boşlukların
temizlenmesi



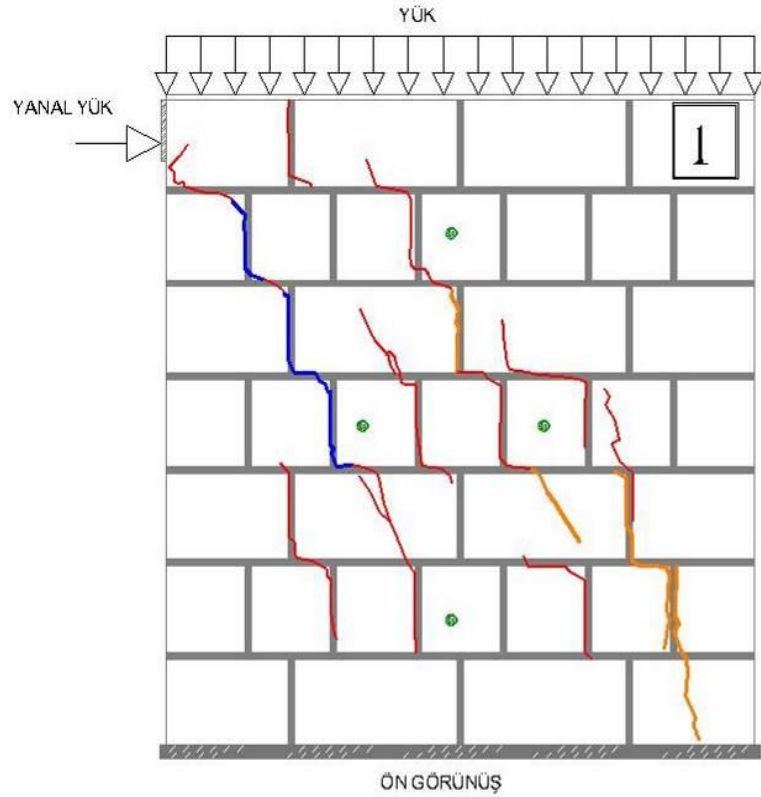
Su ile ıslatma



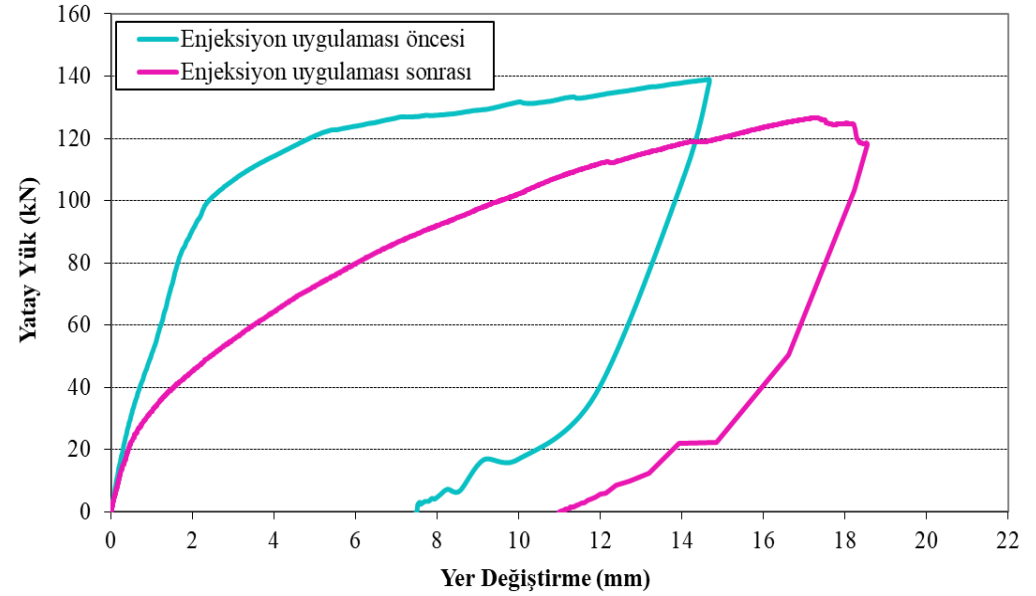
Enjeksiyon uygulaması ve
çatlakların kapatılması

*Enjeksiyon malzemesinin model duvarlar üzerinde performansının
araştırılması*

MODEL DUVAR DENEYLERİ



Çatlak haritası



Yatay yük- yer değiştirme eğrileri

Enjeksiyon malzemesinin model duvarlar üzerinde performansının araştırılması

İÇYAPI ANALİZLERİ

- ✓ TG-DTA : Sıcaklık değişimi ile oluşan kütle kaybından hidrolik özellik belirlenir.
- ✓ XRD : Malzemenin mineralojik analizi elde edilir.
- ✓ XRF : Malzemenin oksit cinsinden bileşenleri belirlenir.
- ✓ FTIR : Dalga boyları değerlerine göre mineral grupları ve bağlar belirlenir. Malzeme içerisinde olabilecek tuz ve/veya organik madde belirlenebilir.
- ✓ SEM-EDX : Malzeme kesitinden alınan fotoğraflar ile malzeme bileşenleri belirlenir.
- ✓ Petrografik Analiz : Malzeme kesitinden görüntü alınarak, incelenen yüzeydeki minerallerin yüzde cinsinden miktarları belirlenir.

DURABİLİTE DENEYLERİ

✓ Donma-Çözülme Etkisi

ASTM D560'tan (2015) yararlanılabilir

1 çevrim: 24 saat -23°C

23 saat 21°C ve %100 bağıl nem



a. 1 Çevrimde hava kireci



b.12 Çevrimde hidrolik kireç (Oktay, 2017)

DURABİLİTE DENEYLERİ

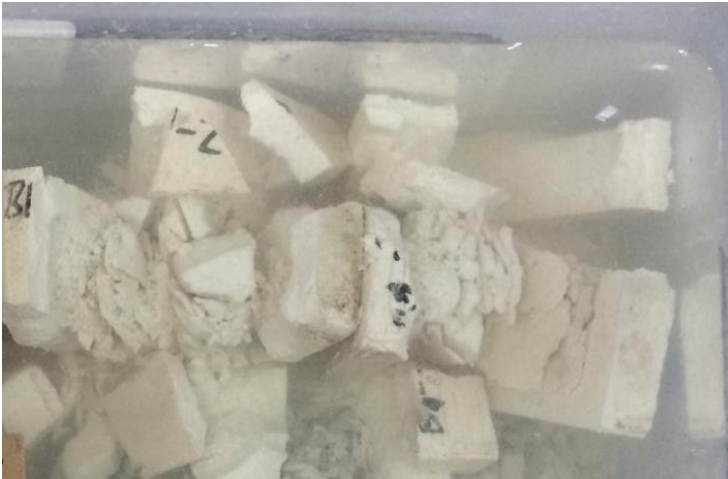
✓ Sülfat Etkisi

TS EN 12370'e (2001) revize edilerek yararlanılabilir

1 çevrim: $20 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ 'de çözeltide 2 saat

20 saat $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de etüvde

2 saat oda sıcaklığında



4 Çevrimde hava kireci



11 Çevrimde hidrolik kireç (Oktay, 2017)

YERİNDE YAPILAN DENEYLER

Tahribatsız Deneyler

Boşlukların Belirlenmesi

- ✓ Yapı radarı (GPR)
- ✓ Ultrases geçiş süresi

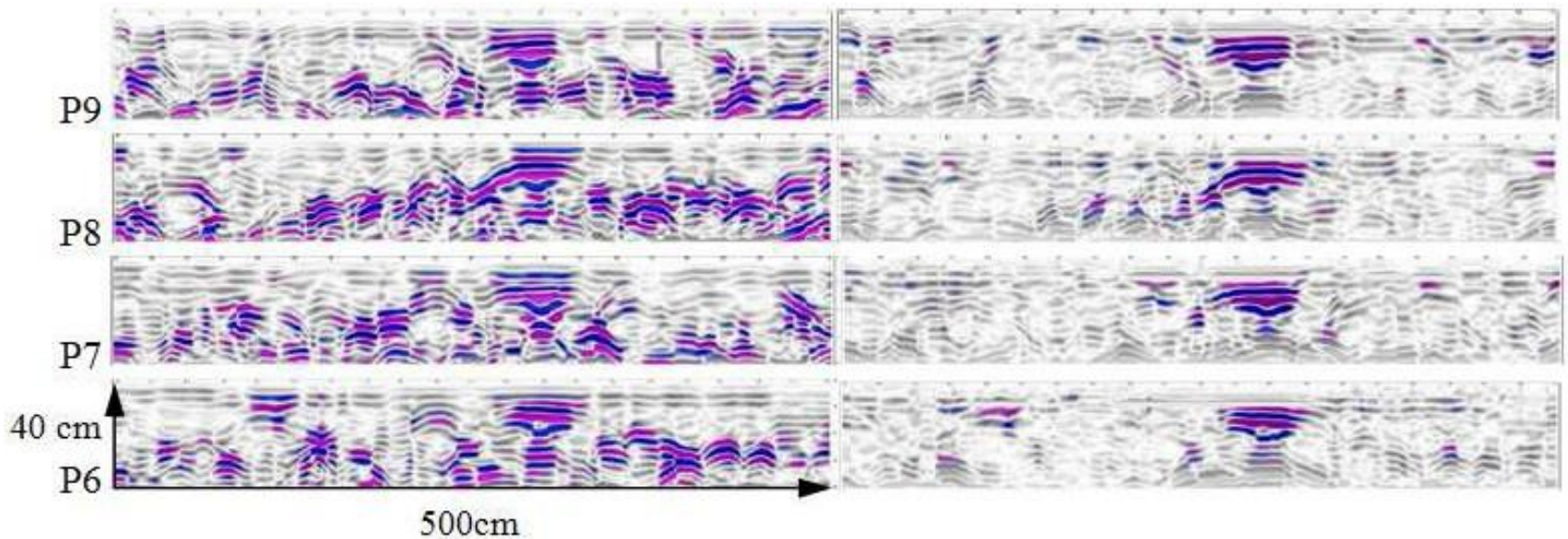


Radar (GPR) uygulaması
(Diamanti vd., 2008).

YERİNDE YAPILAN DENEYLER

Tahribatsız Deneyler

- ✓ Uygulama öncesi belirlenen boşluklar, uygulama sonrasına da ölçülerek enjeksiyon kalitesi değerlendirilmelidir.



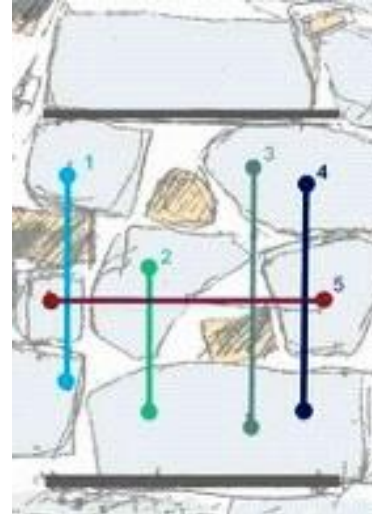
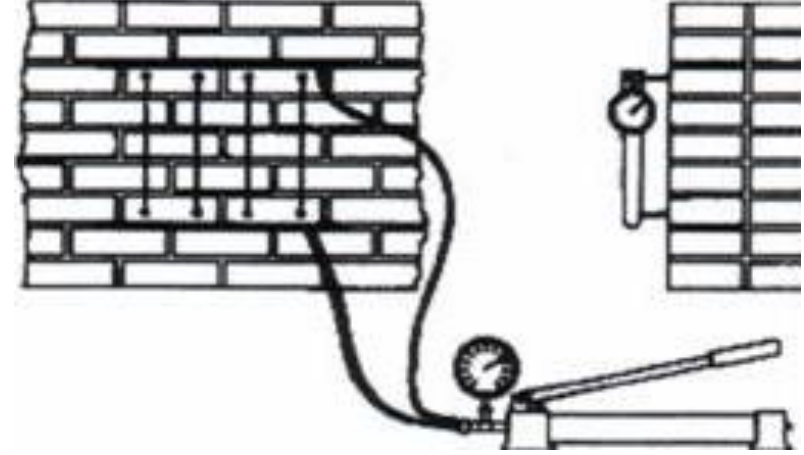
Uygulama öncesi ve sonrası yapı radarı görüntüleri (Uranjek vd., 2012)

YERİNDE YAPILAN DENEYLER

Yarı Tahribatlı Deneyler

Flat-Jack Deneyi

- ✓ Eleman üzerindeki gerilme durumu
- ✓ Elastisite modülü
- ✓ Poisson oranı



Çift plaka ile ölçüm

YERİNDE YAPILAN DENEYLER

Yarı Tahribatlı Deneyler

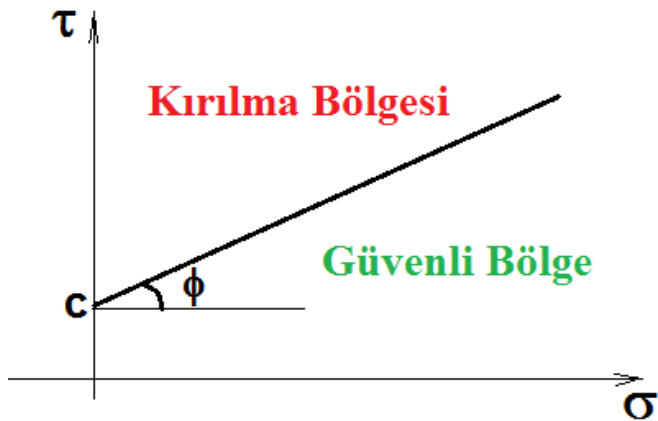
Kayma Deneyi

- ✓ Kayma dayanımı indeksi

$$\tau = P_h / A_j$$

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

$$\tau = c + \tan\phi(\sigma)$$



Kayma deneyi

ÖNERİLER

- Tarihi yapılarda enjeksiyon yöntemi kullanılarak yapılacak onarım ve sağlamlaştırma çalışmaları kapsamında, **başarılı bir uygulama** yapılması ve uygunluğunun değerlendirilmesi için yapılması gerekenler **aşağıda özetlenmiştir**.
- Uygulama öncesinde tarihi yapının **özgün malzeme özellikleri** belirlenmeli,
- Enjeksiyon malzemelerinin üretiminde kullanılacak **malzemelerin inceliğine** karar vermek için uygulama yapılacak tarihi yapıdaki boşluk dağılımı belirlenmeli, **yapıdaki çatlak genişlikleri ölçülmeli**,

ÖNERİLER

- Özgün malzeme özelliklerine uygun enjeksiyon şerbeti üretilmeli, çatlak genişliğine bağlı olarak gerektiğinde kireç esaslı nano hidrolik kireç içeren enjeksiyon malzemesi de kullanılmalı,
- Enjeksiyon malzemelerinin akışkanlık ve geçebilirlik özellikleri gibi fiziksel özelliklerinin yanı sıra yeni üretilen malzemelerin mekanik, kimyasal, mineralojik ve dayanıklılık özellikleri incelenmeli ve uygunluğu araştırılmalı,
- Flatjack yöntemi ile elemanın gerilme-şekil değiştirme davranışı, elastisite modülü ve poisson oranı gibi malzeme parametreleri belirlenmeli,

ÖNERİLER

- Kayma deneyi ile kayma dayanım indeksi belirlenmeli,
- Uygun aralık, derinlik ve açılarda delikler açıldıktan sonra eleman üzerine borular yerleştirilerek **uygulama öncesi hazırlıklar tamamlanmalı**,
- Malzemelerin **kariştirme süresi, kariştirme hızı**, kimyasal katkının sürece dahil edilmesi gibi **ön deneyler ile belirlenen** prosedürün şantiyede titizlikle uygulandığı denetlenmeli,
- **Uygulamalar** enjeksiyon için **en uygun ortam sıcaklığı olan 20-30 °C sıcaklıklarda** ve **enjeksiyon malzemesi üretilir üretilmez** gerçekleştirilmeli,

ÖNERİLER

- 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,
- Kullanılan enjeksiyon malzemesi gerekli dayanıma ulaştıktan sonra **tahribatsız ve yarı tahribatlı deneyler tekrarlanarak malzeme değişkenleri ve elemanın davranışı** incelenmeli,
- **Onarım yapılmadan önceki veriler ile karşılaştırma yapılarak kullanılan yöntemin ve malzemenin uygunluğu** irdelenmelidir.

KAPADOKYA BÖLGESİ DOĞAL OLUŞUMLARINDA ENJEKSİYON UYGULAMASI

PROF. DR. NABİ YÜZER

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

PROJE EKİBİ:

DR. ÖĞR. ÜYESİ DİDEM OKTAY

DR. ÖĞR. ÜYESİ SERHAN ULUKAYA,

DR. ŞERİFE ÖZATA,

DR. BURCU DİNÇ ŞENGÖNÜL

ARŞ. GÖR. MUHAMMED BAYRAM

KAPADOKYA BÖLGESİ

23 şubat **1973** tarih 7/5811 sayılı **Bakanlar Kurulu** kararnamesi ile " **Turistik Gelişmede Öncelikli Bölge**" adı altında; **Nevşehir ili sınırları** içinde kalan alan ve kayseri ili sınırları içinde yer alan **Soğanlı Vadisi** koordinatlar belirtilerek "Kapadokya Bölgesi" olarak tanımlanmıştır. [Ulusoy binan,1994]

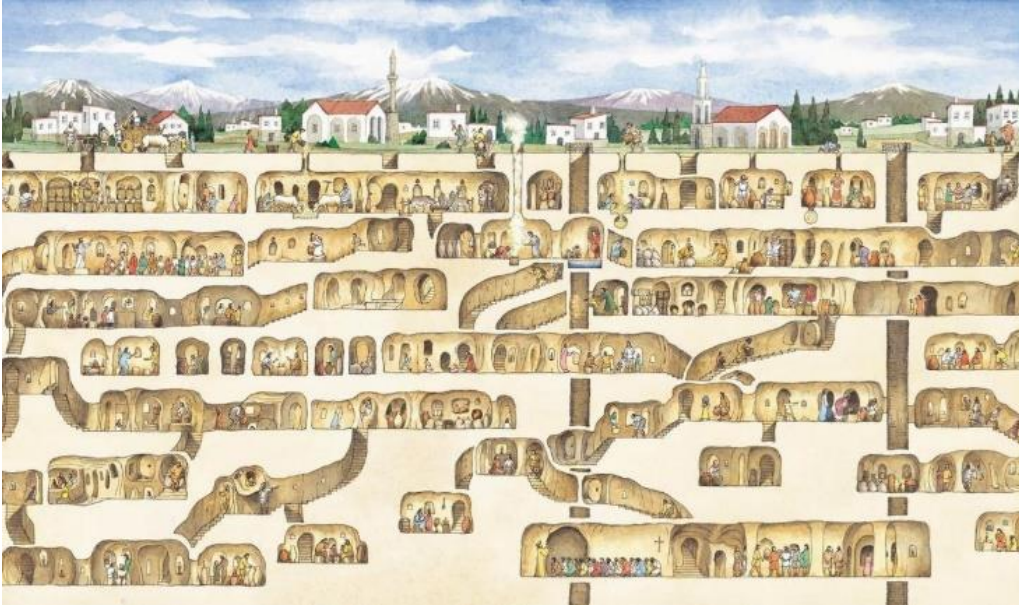


Kapadokya'da **1985** yılından sonra **UNESCO Dünya Miras Listesi**'nde yer almıştır

TARİHÇE

Kapadokya Kronolojisi	
MÖ 3000-1750	Asur Ticaret Kolonileri ve Hititler Dönemi
MÖ 1750-1400	Hitit Krallık Dönemi
MÖ 1400-1200	Hitit İmparatorluk Dönemi
MÖ 1200-1100	Ege ve Kuzey Kavimlerinin Kapadokya'ya Gelişi
MÖ 1100-950	Frigyalılar
MÖ 800	Hitit Tabal Krallığı'nın Bölgede Tekrar Canlanması
MÖ 950-585	Kimmer-İskit Akınları ve Lidyalılar'ın Egemenliği
MÖ 585-334	Pers Egemenliği
MÖ 334-335	Makedonya Komutanlığı (3 Ay)
MÖ 334-17	Kapadokya Krallığı Dönemi
17-395	Roma İmparatorluğu Dönemi
395	Doğu Roma (Bizans) Devleti
1072	Türk Boylarının Bölgeye Yerleşmeye Başlaması
1086-1175	Danışmendliler Dönemi

1175	Anadolu Selçukluların Dönemi
1243	Moğol Hâkimiyeti
1318	Anadolu Selçuklu Devleti'nin Yıkılması
1318	İlhanlı Valisi Timurtaş'ın ve Eratna Bey'in Yönetimi
1340	Bağımsız Eratna Beyliği
1365	Karamanoğulları Beyliği
1381	Kadı Burhanettin Yönetimi
1398	Karamanoğulları'nın Bölgeyi Geri Alması
1398-1402	Osmanlı Egemenliği
1402	Timur'un Bölgeyi Karamanoğulları'na Geri Vermesi
1436	Sultan II. Murat'ın Nevşehir ve Kayseri 'yi geri alması
1466	Kapadokya'nın Kesin Olarak Osmanlı Topraklarına Katılması
1867	Nevşehir Niğde'ye Bağlanması
1902	Nevşehir'in Ankara Sancağına Bağlanması
1954	Nevşehir'in İl Olması



➤ Binlerce yıldır
onlarca medeniyetin yaşadığı bir alan

TARİHÇE

İKLİM

- Kapadokya'da karasal iklim özellikleri görülür.
- 1954-2013 yılları arasında yapılan ölçümlerde kaydedilen en düşük sıcaklık -23.60°C , en yüksek sıcaklık 39.50°C 'dir. [URL-4]

DEPREMSELLİK

- Genel olarak 3. ve 4. derece deprem bölgesindedir [URL-5]. Aktif fay bulunmamaktadır.
- Bölgede son yüzyılda gerçekleşmiş en büyük deprem 1940 yılında 5.2 büyüklüğündedir [URL-6].

KAYA DÜŞMESİ

- Hasar yapan afetler genel olarak kaya düşmeleridir.

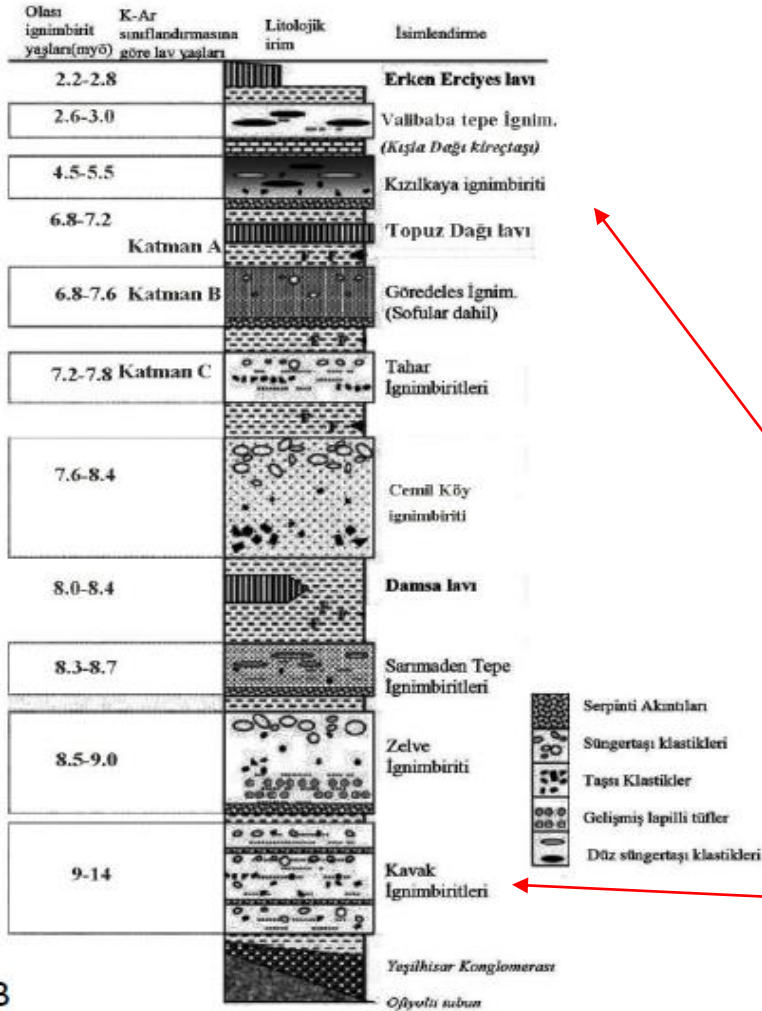


[Özata, 2015]



- Kapadokya jeolojik olarak **Kapadokya Volkanik Provensi (Alanı)** (KVP) içinde yer almaktadır.
- 23,8 milyon yıl önce oluşumu başlamış, **200 km uzunlukta volkanik kuşak**lardan biridir.
- Erciyes, Develi, Hasan, Melendiz, Keçiboyduran ve Göllü Dağları'nın volkanik aktivitesi on bin yıl öncesine kadar devam etmiştir.
- Bu volkanik aktiviteler sonucunda püskürtülen farklı boyut ve türdeki malzemeler, erimiş lav ve bazalt akıntılarının oluşturduğu **tüfsü, süngerimsi tabaka yaklaşık 10000 km²** alanı kaplamıştır [Ayhan,2004].
- Maden Tetkik ve Arama Müdürlüğü'nün 1/500000 ölçekli haritalarında **piroklastik (volkanik bacalardan dışarı atılan kırıntılar)** alan olarak belirtilmiştir.

KAPADOKYA BÖLGESİ STRATİGRAFİSİ (KATMANLARI)



○ Ürgüp Formasyonu:

Volkanoklastik kayalar, **ignimbiritler** yani **kaynaklanmış (birbirine yapışmış) tüfler** ile ara katkı olan göl ve akarsu çökellerinin oluşturduğu katmandır.

○ **Kalınlığı 400 m'ye varan** yerler bulunmaktadır [Ayhan,2004].



B

Ürgüp Formasyonu ignimbirit ağırlıklı dikey kesiti [Le Pennec vd.,2005]

KAPADOKYA BÖLGESİ GELENEKSEL YAPI TÜRLERİ

Kapadokya Bölgesi geleneksel yapıları:

Taşıyıcı sistem yapım tekniğine göre; kaya oyma yapı, kaya oyma-yığma yapı, yığma yapı olmak üzere üç gruba ayrılır [Özata,2015-1].



Kaya Oyma Yapı



Kaya Oyma ve Yığma Yapı



Yığma Yapı

Geleneksel taş tipleri

Yöresel Kayaç Adı	Açıklama
Tüf Taşı (T1)	Dayanımı düşüktür. Genellikle ana mekanlarda kullanılmaz.
Dağ Taşı (T2)	Yontulması kolay olduğu için yapılarda en çok tercih edilen taştır.
Kepez Taşı (T3)	Dayanımı yüksektir, fakat el ile işlenmesi zordur.

KAPADOKYA BÖLGESİ DOĞAL OLUŞUMLAR



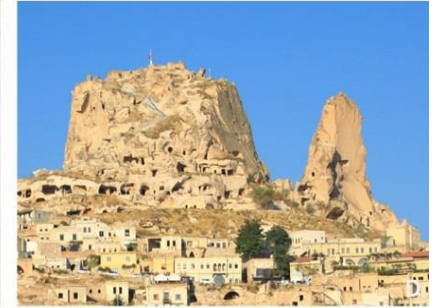
Foto: Sayın, 2008

ita, 2015]

Yöresel Kayaç Adı	Açıklama
Tüf Taşı (T1)	Dayanımı düşüktür. Genellikle ana mekanlarda kullanılmaz.
Dağ Taşı (T2)	Yontulması kolay olduğu için yapılarda en çok tercih edilen taştır.
Kepez Taşı (T3)	Dayanımı yüksektir, fakat el ile işlenmesi zordur.

KAYA OYMA YAPILAR

Masif bir kayanın yerinde, yer üstünde veya yer altında, mekân yapma amacı için oyularak şekillendirilmesiyle oluşturulur. İnsan eli ile şekil verilmiş kaya alanlar kaya oyma yapı sınıfına girerken doğal yollarla oluşmuş mağaralar veya oyuklar bu sınıfa **girmez** [Tarihi Yapılar için Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, Ekim 2017].



[Özata, 2015]

KAYA OYMA YAPILARDA GÖRÜLEN HASARLAR



Bu yapılarda pek çok hasara rastlanmaktadır.

Parça kopması, oyuklanma, kavlanma, yapraklanma, kimyasal nedenle aşınma, kabuk oluşumu, çiçeklenme, renk değişimi, biyolojik hasar, hatalı onarım hasarı, niteliksiz ek [Özata, 2015-2]

Kaya oyma yapılarda diğer görülen hasar türü **çatlaklar**dır.

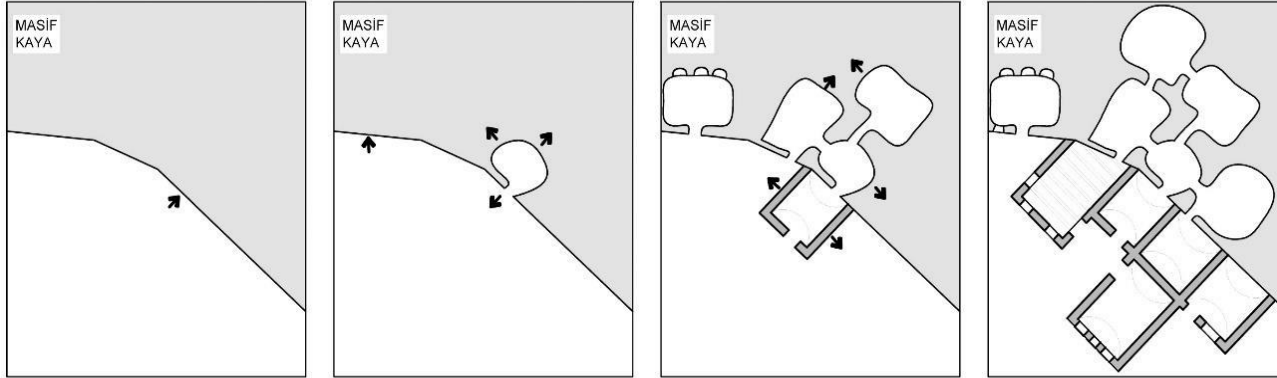


Çatlaklar diğer hasarları da tetiklemekte

Sorun 1: Kaya oyma yapılarda özellikle çatlak gibi hasarların onarımında **özgün malzeme ile uyumlu malzemenin uygulanmaması.**

KAYA OYMA YAPILARIN OLUŐTURULMASI

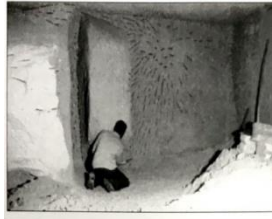
Kaya oyma yapıların genel özelliği, büyütülebilir ve çoğaltılabilir olmasıdır. Gereksinime ve kayanın elverişliliğine göre çeşitli büyüklüklerde mekan oluşturulabilir.



[Özata, 2015-2]

Kaya oyma yapılar son 35-40 yıl öncesinde tamamen el ile oyularak oluşturulmaktaydı.

Bir oyma ustası günlük 8-9 saat çalışma ile 0,5-1 m³ alan kazabilmekteydi.



KAYA OYMA YAPILARIN OLUŐTURULMASI

Günümüzde özellikle kaya oyma depo yapıları narenciye ve patates depolamasında çokça kullanılmaktadır. Kaya mekan içindeki nem sayesinde depoya koyulan sebze ve meyveler %25 oranında ağırlaşmakta içindeki su oranı artmaktadır [Öztürk,2009]

Bu talep arttıkça el oymacılığı yetersiz kalmıştır. Bunun sonucunda oymacılık şekli değışmiştir.



KAYA OYMA YAPILARIN OLUŐTURULMASI

Günümüzde özellikle kaya oyma depo yapıları narenciye ve patates depolamasında çokça kullanılmaktadır. Kaya mekan içindeki nem sayesinde depoya koyulan sebze ve meyveler %25 oranında ağırlaşmakta içindeki su oranı artmaktadır [Öztürk,2009]

Bu talep arttıkça el oymacılığı yetersiz kalmıştır. Bunun sonucunda oymacılık şekli değışmiştir.



Sorun 2: Kaya oyma yapıların yapımında ortaya çıkan **atık tuf toprağının değıerlendirilememesi**, görüntü kirliliğı oluşturmaları

- 1990'larda artan mekanik oymacılık- kaya oyma mekan sayısı ve **atık miktarı da her geçen gün artmaktadır.**
- **18 Ekim 2017 gününe kadar bir yönetmelik oluşturulmamıştır.**
- Yönetmelik tarihine kadar → **10 milyon m³'ten fazla atık toprak** [Ulugöllü,2017].

Sorun 1: Kaya oyma yapılarda özellikle çatlak gibi hasarların onarımında **özgün malzeme ile uyumlu malzemenin kullanılmaması**

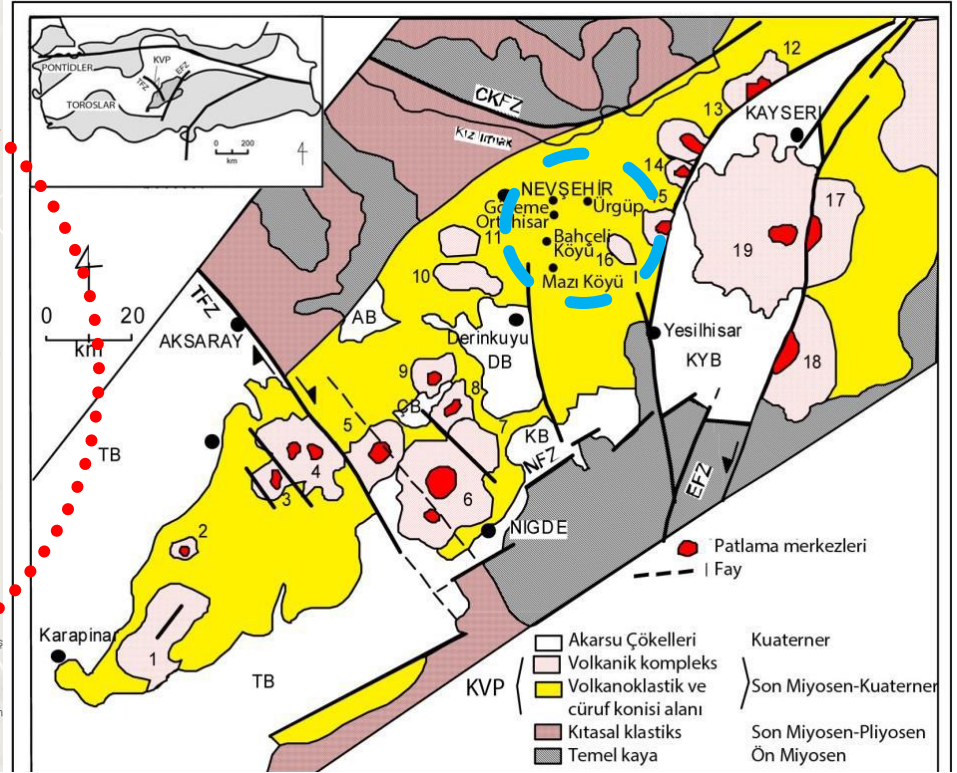
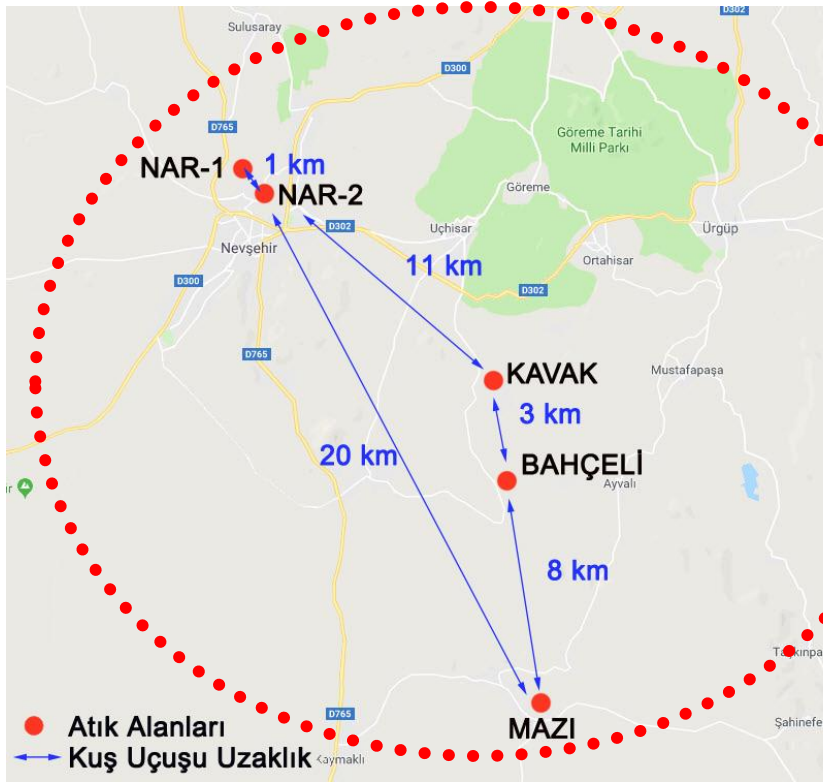
Sorun 2: Kaya oyma yapıların yapımında ortaya çıkan **atık tuf toprağının değerlendirilememesi**, görüntü kirliliği oluşturmaları

Çalışmanın amacı:

Kapadokya Bölgesi **tarihi yapılarının koruma, sağlamlaştırma ve onarım çalışmalarında kullanılabilecek özgün malzeme ile uyumlu enjeksiyon malzemesinin atık malzeme kullanılarak üretimi**

- Atık bir malzemenin sürdürülebilirliği
- Restorasyon çalışmaları için özgün malzeme ile uyumlu malzeme üretimi

1. İŞ PAKETİ: MALZEME TEMİNİ VE TAŞ ÖZELLİKLERİ



- Bahçeli bölgesinden alınan atık tüf
 - Yöre taşı

1. İŞ PAKETİ: MALZEME TEMİNİ VE TAŞ ÖZELLİKLERİ

Çalışılan yöre taşlarının mekanik özellikleri

Tabloda verilen değerler ortalama değerler olup parantez içindeki değerler örnek sayılarını göstermektedir. T1 taşında yanal deformasyon ölçülemediği için poisson oranı belirlenememiştir.

	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Poisson oranı (ν)	Elastisite Modülü (E-GPa)
T1	3,4 (3)	-	0,4 (3)
T2	6,5 (7)	0,22 (4)	1,1 (4)
T3	12,1 (6)	0,24 (4)	1,9 (5)



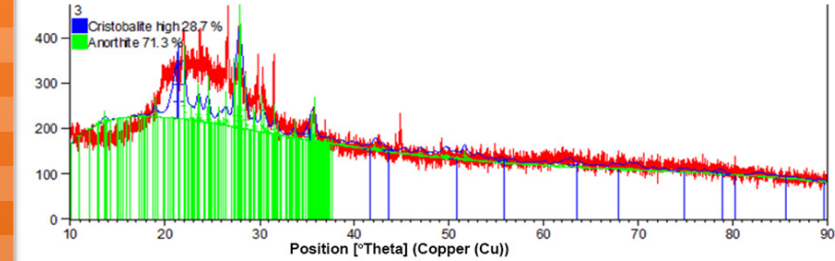
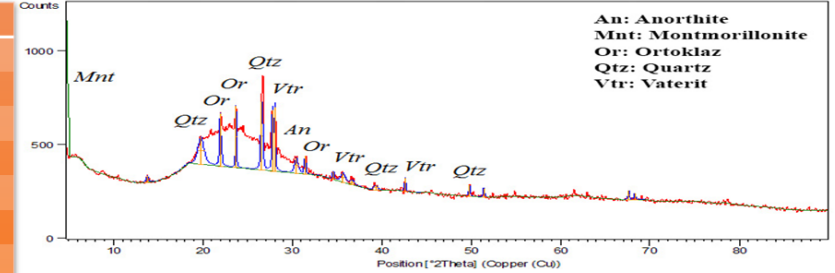
Çalışılan örneklerin ISRM (1981 ve 2007)'ye göre sınıfları

Kodu (Yöresel Adı)	Sınıf	Kayaç Tanımı	Arazi Tanımlaması	Serbest Basınç Dayanım (MPa)
T1 (Tüf Taşı)	R1	Çok Zayıf Kaya	Jeolog çekici ile sertçe vurulunca ufalanır, ufalanır, cep çakısı ile kesilebilir	1-5
T2 (Dağ Taşı)	R2	Zayıf Kaya	Cep çakısı ile kısmen kazılabilir, sert vuruşta vuruşta çekiç ucu yüzeyde iz bırakır	5-25
T3 (Kepez Taşı)				

2. İŞ PAKETİ: ATIK MALZEMENİN PUZOLANİK AKTİVİTESİNİN BELİRLENMESİ

- X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) Analizi
- X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi

Formül	N1	N2	N3	N4	N5
	%	%	%	%	%
SiO ₂	70,62	68,19	67,55	62,45	61,82
Al ₂ O ₃	12,67		13,98	14,51	14,83
Fe ₂ O ₃	1,89	2,17	1,73	2,47	2,46
MgO	0,86	1,16	0,99	2,25	2,39
CaO	2,08	1,90	1,75	2,27	2,31
Na ₂ O	1,83	1,72	1,86	1,02	1,05
K ₂ O	5,24	4,86	5,81	3,07	3,18
TiO ₂	0,22	0,22	0,26	0,29	0,28
P ₂ O ₅	0,06	0,06	0,05	0,06	0,08
MnO	0,08	0,07	0,06	0,08	0,11
Cl	-	0,1	0,15	0,07	0,06
SO ₃	0,03	-	-	-	-
LOI	4,08	6,55	5,64	11,30	11,24
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	85,19	83,14	83,26	79,43	79,11



Malzemenin puzolan kabul edilmesi için;

*SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ >%70

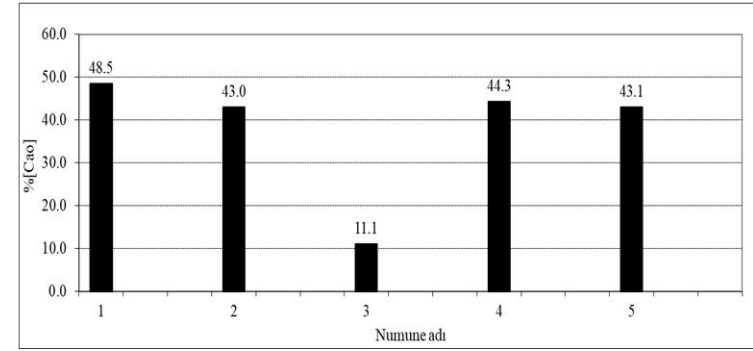
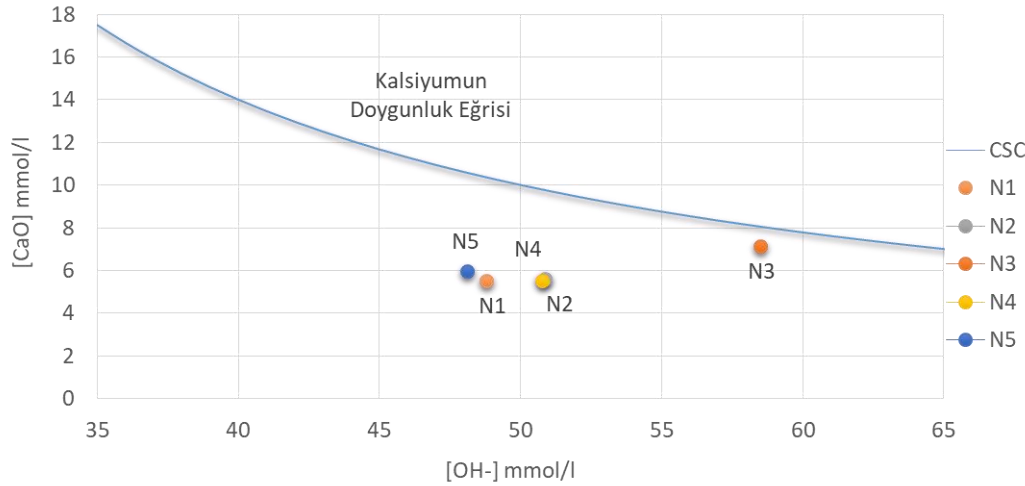
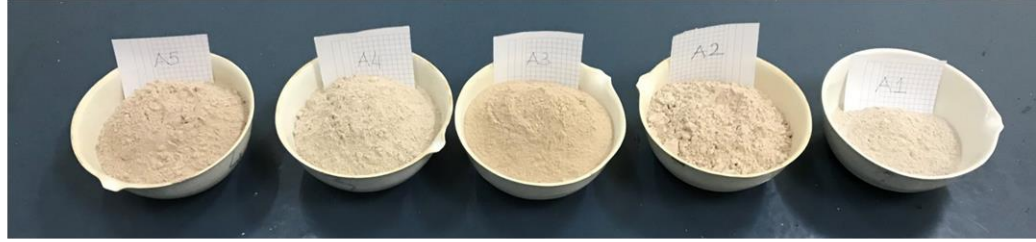
*SO₃ <%3

*Klorür (Cl) > %0,1

- Anortit
- (Yüksek) kuvars
- Ortoklaz
- Montmorillonit
- Vaterit
- Kalsiyum mangan oksit
- (Yüksek-düşük) kristobalit
- Zeolit

2. İŞ PAKETİ: MALZEMENİN PUZOLANİK AKTİVİTESİNİN BELİRLENMESİ

- Puzolanik Aktivitesinin Araştırılmasında Kullanılan Doğrudan Yöntemler
 - Frattini Deneyi Sonucu ve Değerlendirmesi*

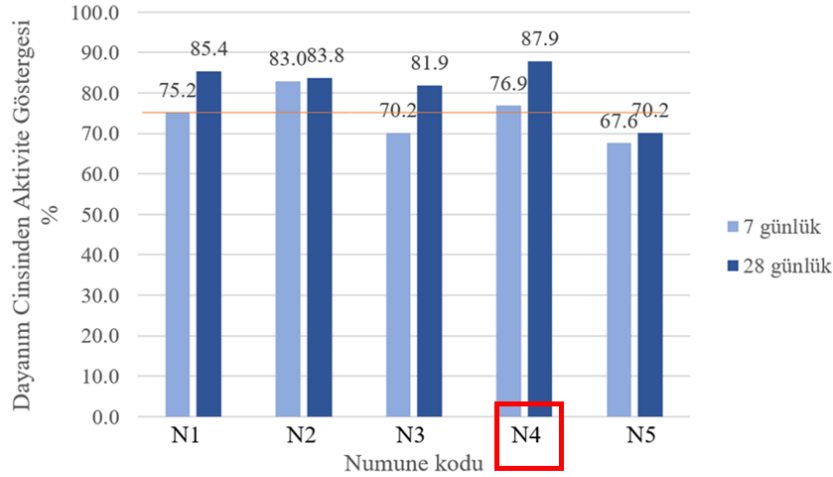


Bağlanan kalsiyum oksit [CaO] yüzdeleri
1>4>5>2>3

2. İŞ PAKETİ: MALZEMENİN PUZOLANİK AKTİVİTESİNİN BELİRLENMESİ

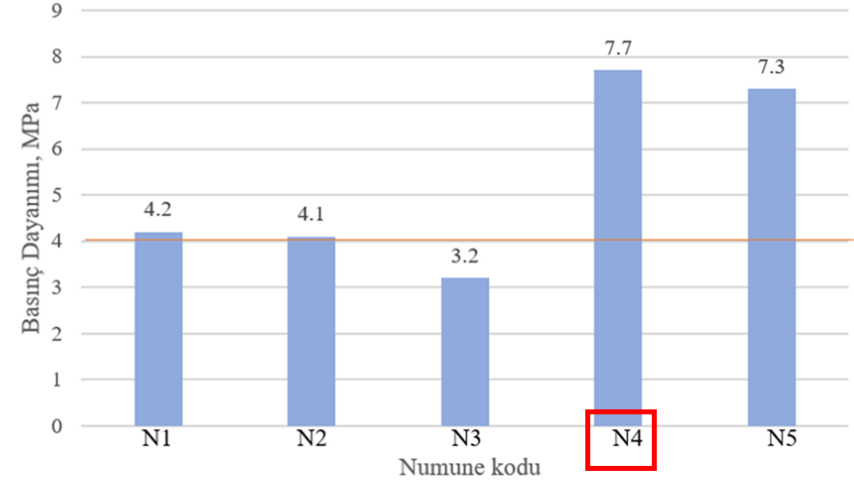
- Puzolanik Aktivitesinin Araştırılmasında Kullanılan Dolaylı Yöntemler

- Dayanım Cinsinden Aktivite Göstergesi*



7 günlük aktivite göstergesinde en yüksek değer N2'de, 28 günlükte ise N4'te elde edilmiştir.

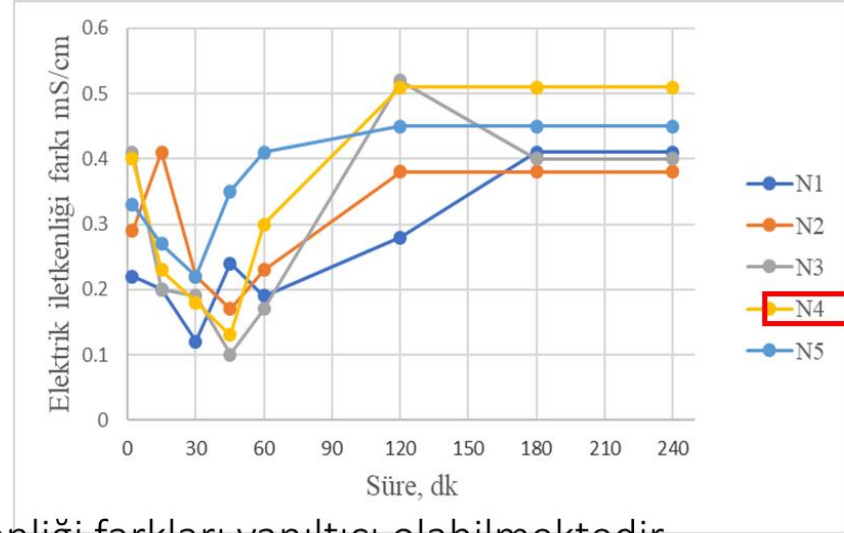
- Kireç Harcı Basınç Dayanımı Deneyi*



TS 25'te belirtilen en az 4 MPa'lık basınç dayanımı şartını N3 numunesi dışında diğer numuneler sağlamıştır.

2. İŞ PAKETİ: MALZEMENİN PUZOLANİK AKTİVİTESİNİN BELİRLENMESİ

- *Elektrik İletkenliği Deneyi Sonuçları ve Değerlendirmesi*



2. dk da ölçülen elektrik iletkenliği farkları yanıltıcı olabilmektedir.
En çok fark N4 çözeltisinde oluşmuştur.

GENEL SONUÇ

- Bölgeden alınan **tüm atık hafriyat toprakları** **puzolanik aktivite göstermektedir.**
- Bahçeli Köyü ve Kavak Kasabası arasındaki alandan alınan **N4 malzemesinin** özelliklerinin çoğunun diğer malzemelere göre üstün olduğu görülmüştür.

3. İŞ PAKETİ: ENJEKSİYON MALZEMESİ ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİ

Karışım Oranları

20 Deneme üretiminden seçilen seriler

Seriler	S/B oranı	NHL-5 (%)	Kapadokya doğal puzolanı (%)	Süper akışkanlaştırıcı (%)	Viskozite Düzenleyici (%)
REF	0.6	100	0	1.4	0.5
CNP30	0.6	100	30	1.4	0.5
CNP40	0.6	100	40	1.4	0.5
CNP50	0.6	100	50	1.4	0.5

3. İŞ PAKETİ: ENJEKSİYON MALZEMESİ ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİ

Üretim ve Taze Hal Deneyleri



Tartım



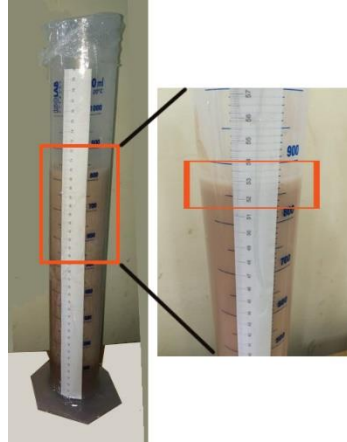
Karıştırma



Akış konisi



Marsh hunisi



Terleme deneyi



Kum kolon deneyi

3. İŞ PAKETİ: ENJEKSİYON MALZEMESİ ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİ

Taze Hal Özellikleri

Akışkanlık, hacim sabitliği ve penetrasyon deneylerine ait sonuçlar

Seriler	Akış Konisi t_0 (sn)	Marsh Hunisi t_0 (sn)	Terleme (%)	Kum Kolonu T_{36} (sn)	Enjekte edilebilirlik
REF	8	30	2,6	4	Kolay
CNP30	9	36	3,3	4	Kolay
CNP40	10	37	3,4	5	Kolay
CNP50	11	40	3,8	6	Kolay
Limitler	< 25	< 45	< 5	< 50	-

(NHL ve Farklı oranlarda atık tuf içeren enjeksiyon malzemesi)

3. İŞ PAKETİ: ENJEKSİYON MALZEMESİ ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİ

Mekanik Özellikler

Basınç ve Çekme Dayanımı

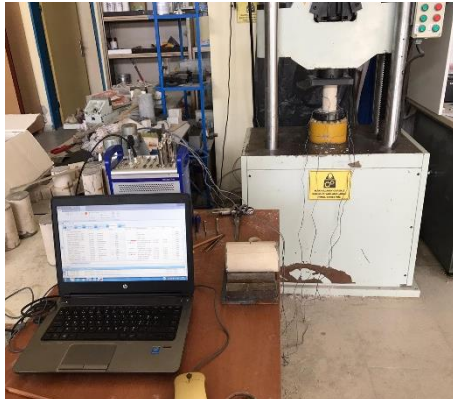


Enjeksiyon malzemelerinin 28-90 günlük ortalama eğilme ve basınç dayanımları

Seriler	Eğilme Dayanımı (MPa)			Basınç Dayanımı (MPa)		
	28. Gün	56. Gün	90. Gün	28. Gün	56. Gün	90. Gün
REF	2,5	2,5	2,5	4,0	4,1	4,1
G5CNP30	1,9	1,9	1,9	3,1	3,3	3,4
G5CNP40	1,8	1,8	1,8	3,0	3,3	3,3
G5CNP50	1,5	1,5	1,5	2,8	3,2	3,2

Elastisite Modülü ve Poisson Oranının Belirlenmesi

Enjeksiyon malzemelerinin elastisite modülü ve Poisson oranları



Enjeksiyon Malzemesi	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı
G5CNP30	2059	0.20
G5CNP40	2282	0.18
G5CNP50	2347	0.20

3. İŞ PAKETİ: ENJEKSİYON MALZEMESİ ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİ

Fiziksel Özellikler

Kılcalıklıkla Su Emiliminin Belirlenmesi



Enjeksiyon malzemelerinin kılcal su emme katsayıları

Enjeksiyon Malzemesi	Kılcal Su Emme Katsayısı (kg/(m ² .√ s))
REF	0,60
G5CNP30	0.66
G5CNP40	0.66
G5CNP50	0.65

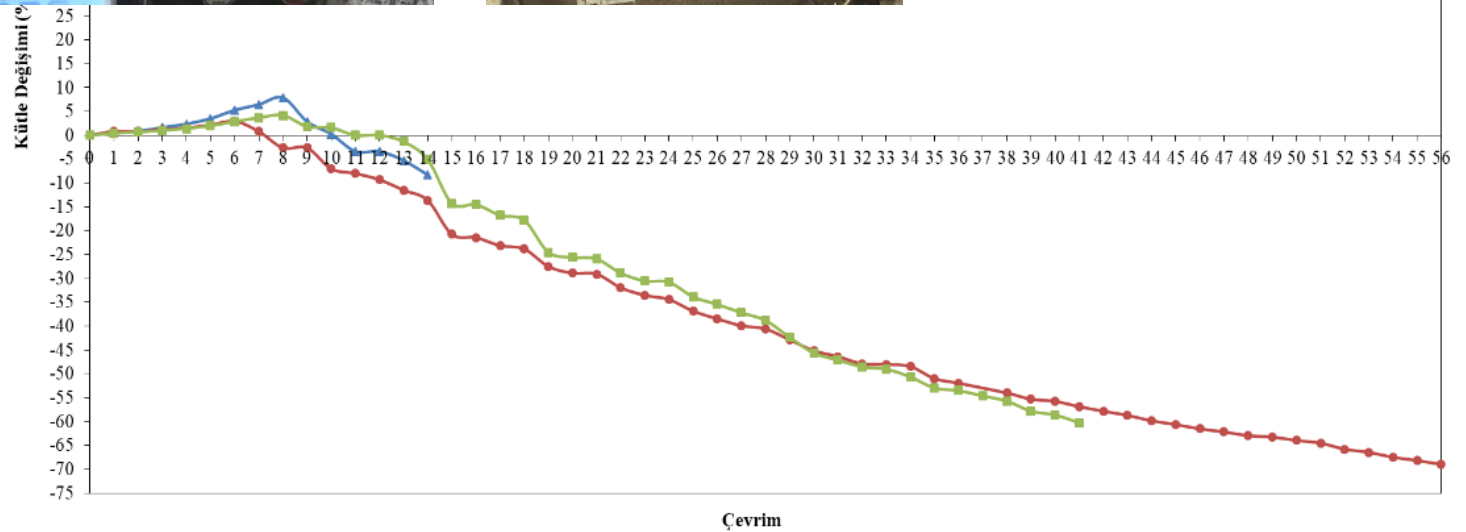
3. İŞ PAKETİ: ENJEKSİYON MALZEMESİ ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİ

Donma-Çözülme Dayanımı



G5CNP40
56. çevrim

NHL-5
12. çevrim



Donma çözülme numunelerinde oluşan kütle değişimi

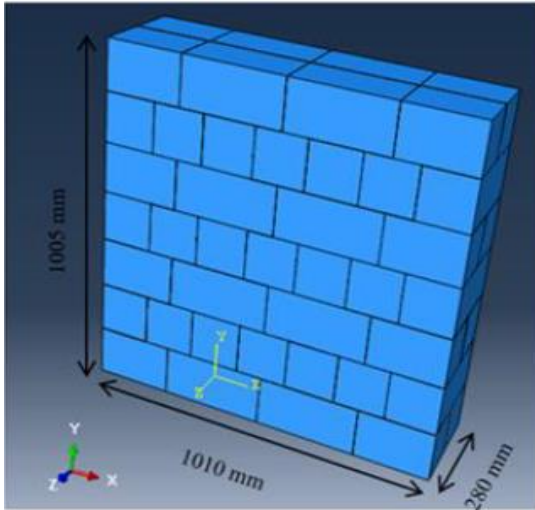
4. İŞ PAKETİ: MODEL DUVAR ÜRETİMİ, DUVAR DENEYLERİ VE ENJEKSİYON UYGULAMASI



Taşların kesilmesi



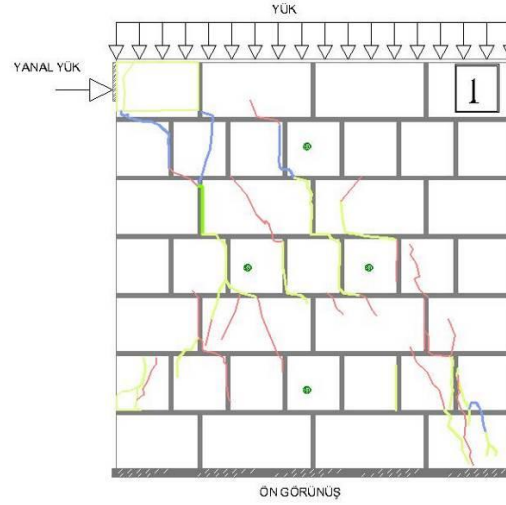
Harç hazırlanması



Model Duvar üretimi



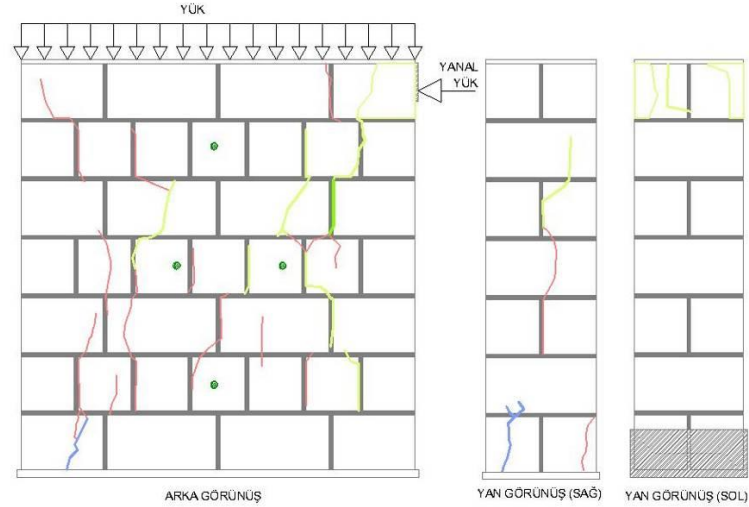
4. İŞ PAKETİ: MODEL DUVAR ÜRETİMİ, DUVAR DENEYLERİ VE ENJEKSİYON UYGULAMASI



ÖN GÖRÜŞ (ENJEKSİYON SONRASI)



Düşey-yatay yükleme



Çatlak haritası çizimi

Duvar arkası LVDTler

4. İŞ PAKETİ: MODEL DUVAR ÜRETİMİ, DUVAR DENEYLERİ VE ENJEKSİYON UYGULAMASI



Boşluk açılması



Boşluk temizlenmesi



Boşluk temizlenmesi

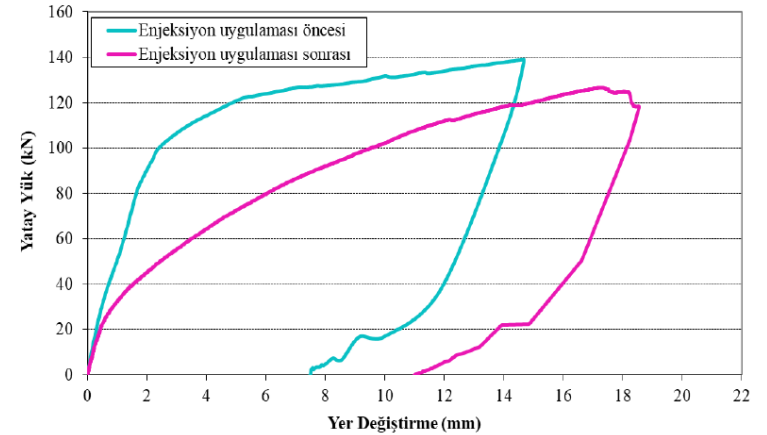
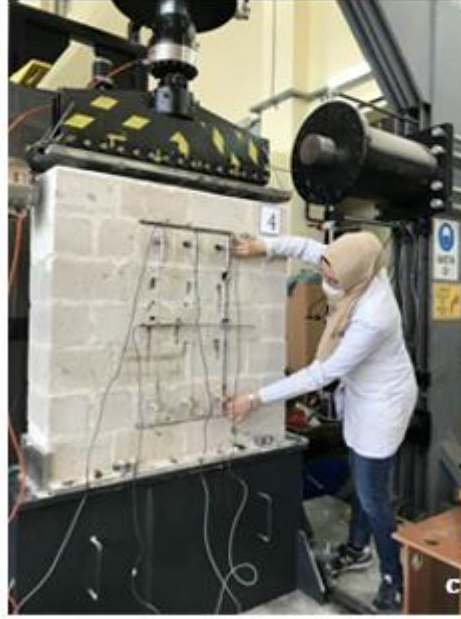
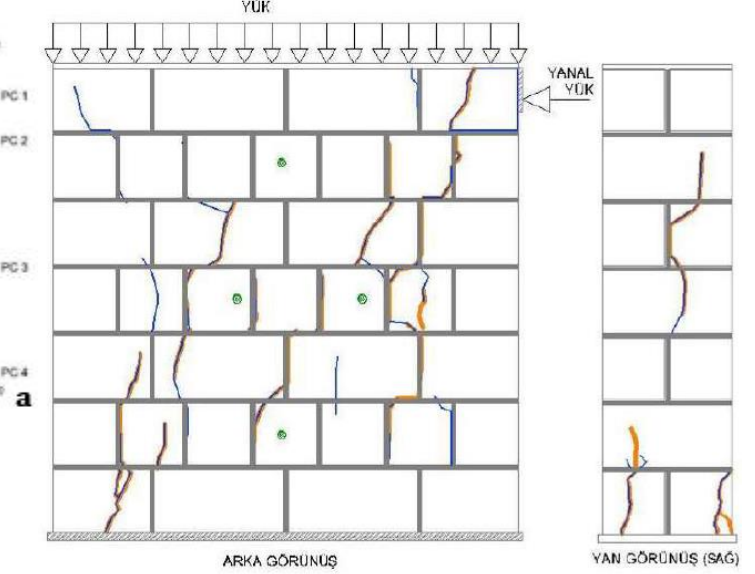
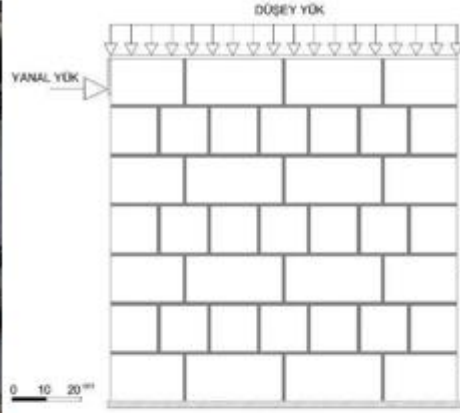


Duvar boşluklarının
macunlanması



Enjeksiyon
uygulanması

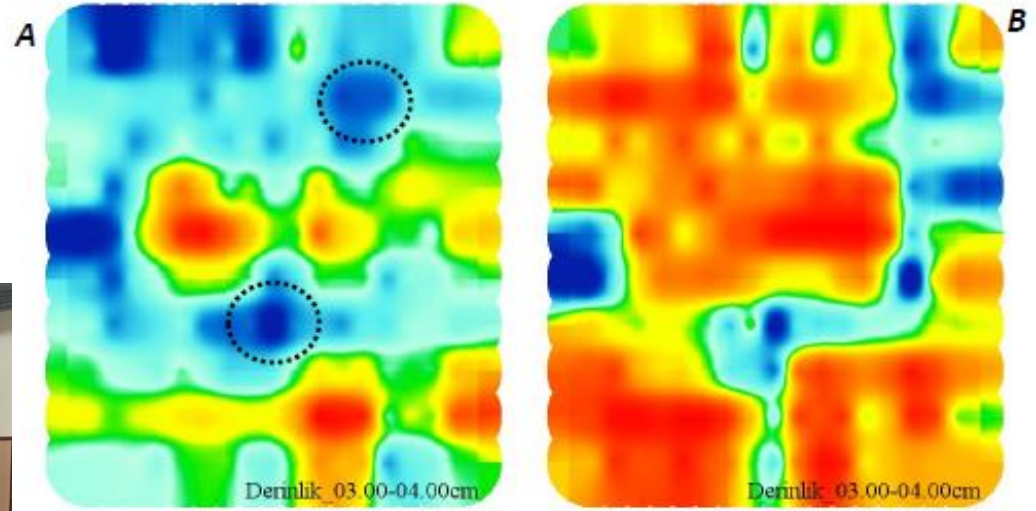
4. İŞ PAKETİ: MODEL DUVAR ÜRETİMİ, DUVAR DENEYLERİ VE ENJEKSİYON UYGULAMASI



4. İŞ PAKETİ: MODEL DUVAR ÜRETİMİ, DUVAR DENEYLERİ VE ENJEKSİYON UYGULAMASI

Tahribatsız Deneyler Boşlukların Belirlenmesi

✓ Yapı radarı (GPR)



Düşük Genlik
(boşluk/çatlak zon)

Yüksek Genlik
(sogum/sert zon)

A: Enjeksiyonun hemen sonrasında alınan ölçümlerden oluşturulan en kesit.

B: Enjeksiyon yapıldıktan yaklaşık 90 gün sonra alınan ölçümlerden oluşturulan en kesit.

(Yüzer vd.,2021)

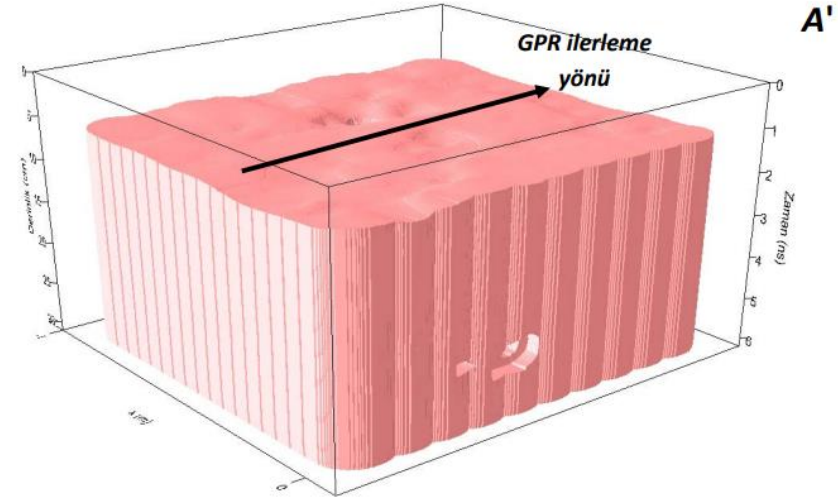
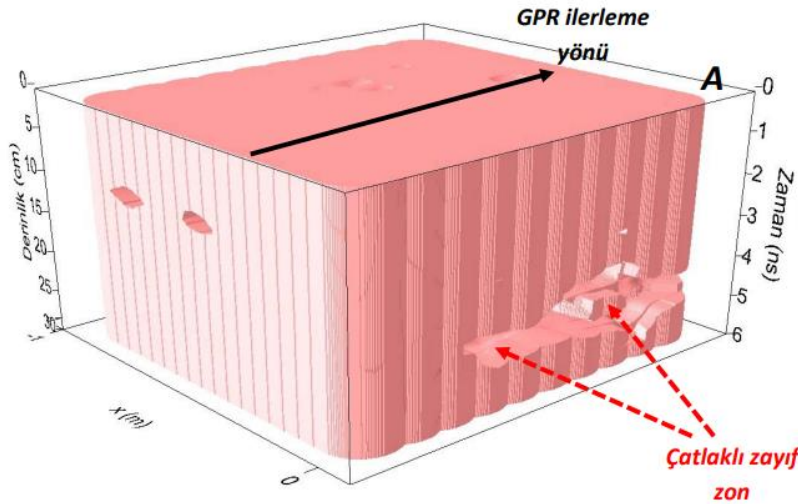
Enjeksiyon öncesi ve sonrası radar (GPR) uygulaması (Yüzer vd.,2021)

4. İŞ PAKETİ: MODEL DUVAR ÜRETİMİ, DUVAR DENEYLERİ VE ENJEKSİYON UYGULAMASI

Tahribatsız Deneyler

Boşlukların Belirlenmesi

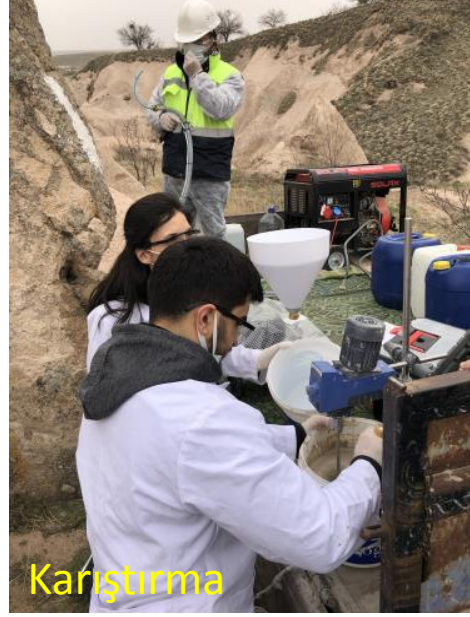
- ✓ Yapı radarı (GPR)



Enjeksiyon öncesi ve sonrası radar (GPR) uygulaması (Yüzer vd.,2021)

Enjeksiyon öncesi boşluk oranı yaklaşık %8 iken enjeksiyondan 2 gün sonraki boşluk oranı ise yaklaşık %1 olarak hesaplanmıştır

5. İŞ PAKETİ: PERİ BACASINDA ENJEKSİYON UYGULAMASI



5. İŞ PAKETİ: PERİ BACASINDA ENJEKSİYON UYGULAMASI

Tahribatsız Deneyler

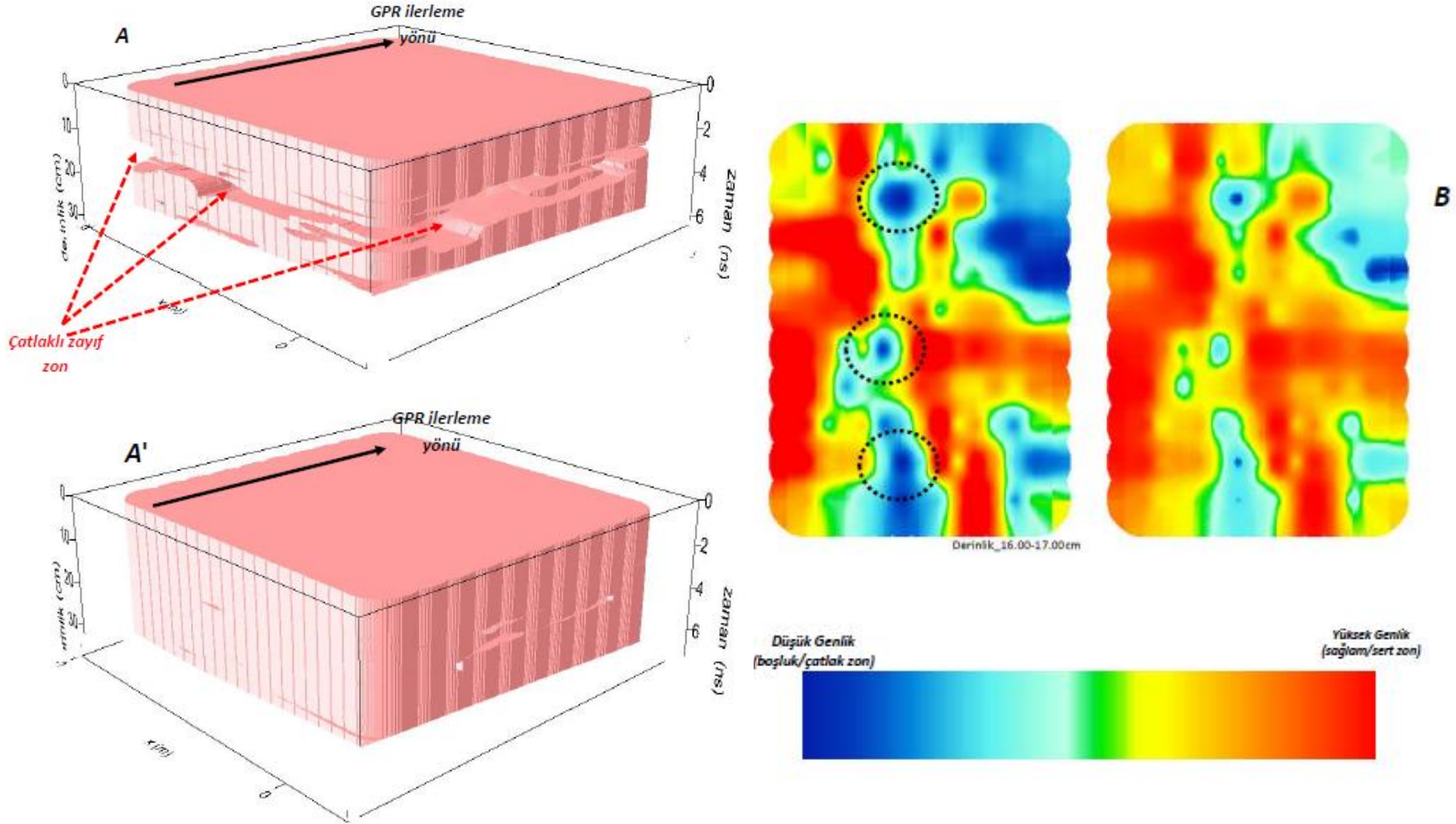


Yapı radarı (GPR) ve enjeksiyon uygulaması (Yüzer vd.,2021)

Sıcaklık ve nem ölçümü (Yüzer vd.,2021)

5. İŞ PAKETİ: PERİ BACASINDA ENJEKSİYON UYGULAMASI

Georadar Ölçüm Sonuçları

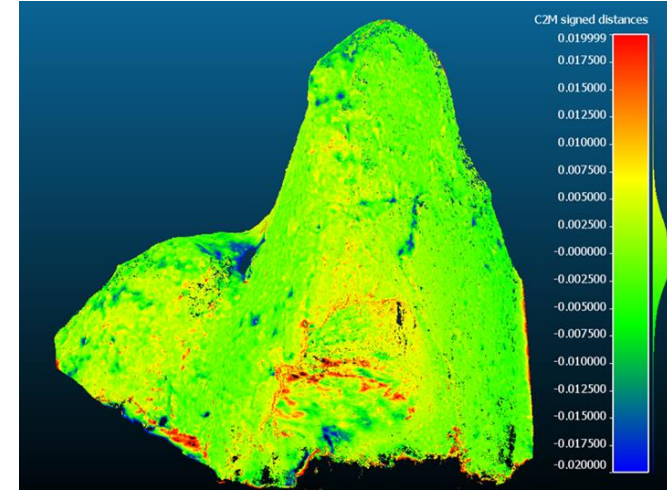


Enjeksiyon öncesi ve sonrası georadar ölçüm sonuçları
(Boşluk oranı sırası ile %10.7 ve %2.1)

TÜBİTAK-1001 Yapay Zeka ile Kültürel Miras için Sürdürülebilir Hasar Tespiti ve İzleme Sistemi



3d lazer tarama çalışmaları



Hasar tespiti ve izleme

Peri Bacasındaki onarım 3 yıl boyunca izlenmiş; çatlak, tuzlanma vb herhangi bir hasar tespit edilmemiştir.

TÜBİTAK ARDEB-1001- Kireç Esaslı Enjeksiyon Malzemesi ve Harç İçin Atık Kandan Kimyasal Katkı Üretimi

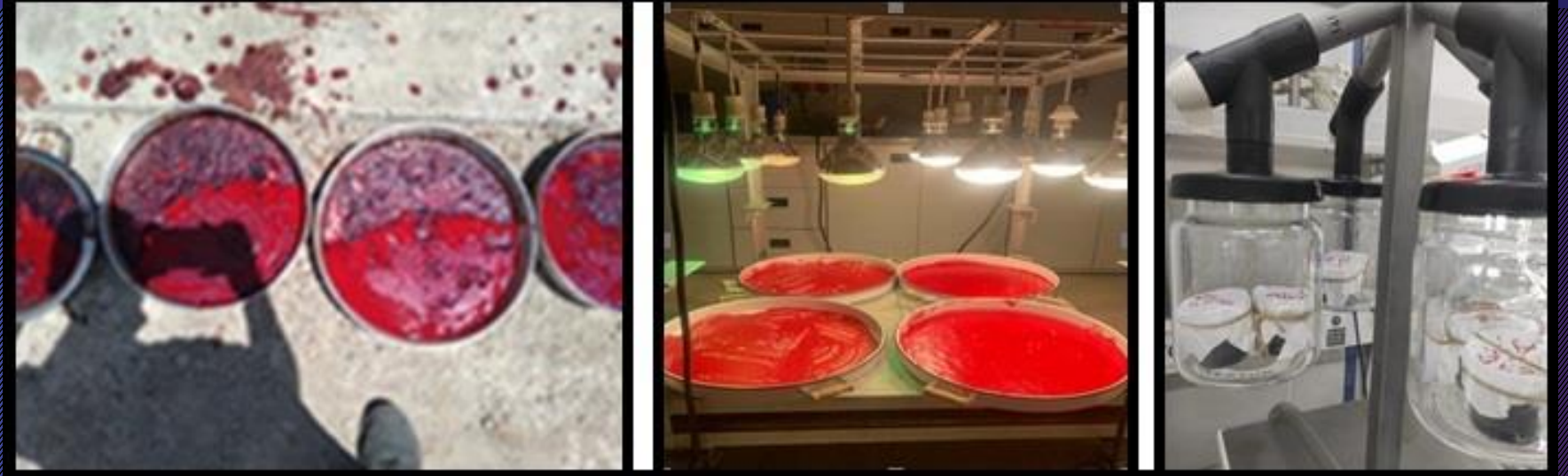
Avrupa ve Asya’da birçok antik kaynak, harçlarda hayvan kanı kullanımından bahsetmektedir [2].

Kireç esaslı harçlarda katkı malzemesi olarak hayvan kanı kullanılması MÖ 200’lü yıllara dayanmaktadır [3].

Literatürde kireç ve çimento esaslı sistemlerde katkı malzemesi olarak sıvı kan kullanımı ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur [4-11].

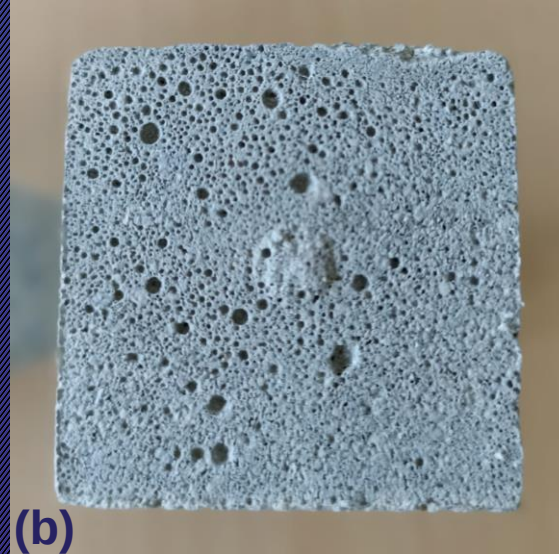
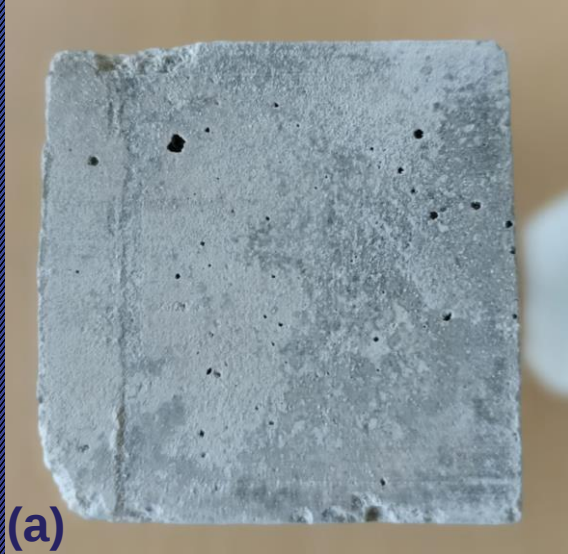
Bu çalışmalardan bazılarında antik yapılardan alınan numunelerde yumurta ve kan proteinlerine rastlandığı belirtilmektedir [12].

TÜBİTAK ARDEB-1001- Kireç Esaslı Enjeksiyon Malzemesi Ve Harç İçin Atık Kandan Kimyasal Katkı Üretimi



Farklı yöntemler ile (Güneş, UV lambası, Liyofilizatör) atık hayvan kanının kurutulması

TÜBİTAK ARDEB-1001- Kireç Esaslı Enjeksiyon Malzemesi Ve Harç İçin Atık Kandan Kimyasal Katkı Üretimi



Harç numunelerindeki boşluk görüntüleri (a) REF, (b) Kan katkılı harç

Proje kapsamında atık kandan üretilen katkı malzemesi

Kapalı Boşluk oluşturuyor

- Yangına Dayanım
- Donma-Çözölmeye Dayanım

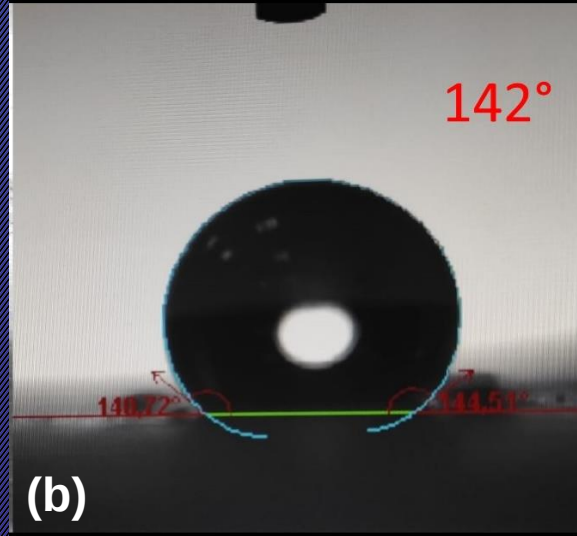
Yüzeyde Bariyer oluşturuyor

- Hidrofofik yüzey oluşturuyor
- Su vb. geçirimsizlik sağlıyor

TÜBİTAK ARDEB-1001- Kireç Esaslı Enjeksiyon Malzemesi Ve Harç İçin Atık Kandan Kimyasal Katkı Üretimi



Harç numunelerindeki temas açısı (a) REF, (b) Kan katkılı harç



Proje kapsamında atık kandan üretilen katkı malzemesi

Yüzeyde Bariyer oluşturuyor
-Hidrofobik yüzey oluşturuyor

Temas açısı $> 90^\circ$ ise hidrofobik

TÜBİTAK ARDEB-1001- Kireç Esaslı Enjeksiyon Malzemesi Ve Harç İçin
Atık Kandan Kimyasal Katkı Üretimi



TÜBİTAK ARDEB-1001- Kireç Esaslı Enjeksiyon Malzemesi Ve Harç İçin Atık Kandan Kimyasal Katkı Üretimi



Kan katkılı enjeksiyon malzemesinin deneyleri ve yapıda uygulanması

TÜBİTAK ARDEB-1001- Kireç Esaslı Enjeksiyon Malzemesi Ve Harç İçin
Atık Kandan Kimyasal Katkı Üretimi



SONUÇ VE ÖNERİLER

- Bölgedeki doğal oluşumlarda (peri bacası), **donma-çözünme ve ıslanma-kuruma** gibi iklim koşullarında oluşan çatlaklar gözlenmektedir. Yapılarda oluşan **bu süreksizliklerin giderilmemesi durumunda** yapıların tamamen **kaybedilme durumunun** oluşabileceği tespit edilmiştir.
- Depo amacı ile kullanılmak üzere **hızla artan kaya oyma yapı** talebi ve mekanik oyma işlemi sonucunda **açığa çıkan atık tüf** malzeme **giderek artmakta** bu da bölgedeki doğal ve kültürel mirası tehdit etmektedir.
- **Sağlamlaştırma için** yapılacak uygulamalarda **özgün malzemeye uygun** onarım **malzemesinin** kullanılması gerekmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

- Kaya oyma yapılardan açığa çıkan milyonlarca metreküp atık tuf malzemedен beş farklı bölgeden alınanlar üzerinde, doğrudan ve dolaylı yapılan tüm puzolanik aktivite deneylerinin ve bu yöntemlere yardımcı analizlerden **atık malzemenin puzolanik özellik gösterdiği** saptanmıştır.
- Özgün malzemeye uygun **volkanik atık tuf** malzemesinden bölgedeki yapılarda yapılacak onarım ve sağlamlaştırma çalışmalarında kullanılacak **enjeksiyon malzemesi üretiminde yararlanılabileceği** görülmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

- Çalışma kapsamında tasarımı gerçekleştirilen **enjeksiyon malzemesinde** yapılan fiziksel, mekanik, dayanıklılık ve reolojik deneyler sonucunda, **bağlayıcının %50'sine kadar varan oranda atık tüf malzemenin kullanılabileceği** test edilmiştir.
- Kapadokya Bölgesi'nin geniş bir alanından temin edilen atık malzeme ile akışkanlık ve geçebilirlik özelliklerini sağlayan, **özgün malzeme ile uyumlu enjeksiyon şerbeti üretimi** gerçekleştirilmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

- Bölgede bulunan doğal taşların dayanımları dikkate alındığında, **doğal hidrolik kireç** (NHL 5) ve bağlayıcının **%30'u** oranında **doğal puzolan olan Kapadokya Bölgesi atık volkanik tüfü** ile **üretilen enjeksiyon malzemesinin** sağlamlaştırma çalışmalarında **kullanılabileceği** ortaya konulmuştur.

SONUÇ VE ÖNERİLER

- Özgün malzemeye uygun olarak üretilen **enjeksiyon malzemesinin** sahada uygulamasını yapmadan önce **model duvarlarda performansı test edilmiştir**. Bu amaçla bölgeden getirilen taşlar ile model duvarlar üretilmiştir. Sabit düşey yük altında, uygulanan yatay yük ile diyagonal çatlak oluşturulmuş, yük-yer değiştirme değerleri ölçülmüştür. Oluşan çatlak vb. hasarlar sonucu oluşan süreksizlikler, proje kapsamında üretilen özgün enjeksiyon malzemesi ile doldurulmuştur.

SONUÇ VE ÖNERİLER

- Uygulamanın **performansını ölçmek için yapı radarı** (GPR) ile **enjeksiyon öncesi ve sonrası boşluklar** tespit edilmiş ve **süreksizliklerin** %90'dan daha fazla oranda **giderildiği** tespit edilmiştir. Enjeksiyon uygulaması sonrası model duvarlar benzer yük etkisine maruz bırakılarak yük-yer değiştirme değerleri yeniden belirlenmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda, uygulamanın başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği ortaya konulmuştur.

SONUÇ VE ÖNERİLER

- Laboratuvar deneyleri ile yapılan kalite kontrol testlerinden başarı ile geçen **enjeksiyon malzemesi**, gerekli kurullardan izin alınan doğal oluşumda (**peribacası**) **uygulanmıştır**. Model duvarlar üzerinde gerçekleştirilen tüm **kontrol deneyleri** bu yapı üzerinde de **gerçekleştirilmiş**, uygulamanın başarılı bir şekilde yapıldığı görülmüştür. Proje süresi içinde, yapılarda uygulama yapıldıktan sonra **3 yıl boyunca** yerinde tekrar **gözlem, inceleme ve ölçümler** yapılmıştır. Enjeksiyon uygulaması yapılan bölgede, **tuzlanma vb hasar gözlenmemiştir**.

SONUÇ VE ÖNERİLER

- Projeler kapsamında yapılan araştırmalar ile **kayadan oyma yapılardan açığa çıkan atıklar ve atık hayvan kanının** değerlendirileceği; hem çevre kirliliğinin önlenmesine hem de sürdürülebilir yapı malzemesinin kullanımına katkı sağlayacağı; özgün malzemeye uygun onarım malzemesinin üretimi ile mevcut uygulama hatalarının neden olduğu sorunlara çözüm olacağı; benzer uygulamalara ışık tutacak bu örnek çalışmanın, enjeksiyon uygulamaları için henüz hazırlanmamış olan ulusal ve uluslararası standart ve yönetmeliklere kaynak olacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR...

YTÜ Yapı Malzemeleri Laboratuvarında ve sahada yapılan araştırma, **TÜBİTAK** (118M321-221M279) ve **YTÜ-BAPK** desteği ile gerçekleştirilmiştir.

Uygulama **Letoon Mimarlık** tarafından gerçekleştirilmiştir.

Peri Bacasındaki onarımın izlenmesi **TÜBİTAK-122Y017** (Yapay Zeka ile Kültürel Miras için Sürdürülebilir Hasar Tespiti ve İzleme Sistemi) desteği ile gerçekleştirilmiştir.

KİTAP...

Nabi Yüzer ve Didem Oktay, «Tarihi Yapılarda Enjeksiyon», YTÜ Basım-Yayın Merkezi, 2020.

Açık Erişimli Kitap Linki:

<http://dspace.yildiz.edu.tr/xmlui/handle/1/13871>