TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI
Union of Chambers of Turkish Engineers and Architects - Chamber of Civil Engineers



ULUSLARARASI KATILIMLI TARİHİ ESERLERİN GÜÇLENDİRİLMESİ ve GELECEĞE GÜVENLE DEVREDİLMESİ SEMPOZYUMU-2

SYMPOSIUM with INTERNATIONAL PARTICIPATION on STRENGTHENING and PRESERVING HISTORICAL BUILDINGS and CULTURAL HERITAGE-2

BİLDİRİLER KİTABI
PROCEEDINGS

15-16-17 EKİM / OCTOBER 2009
DİYARBAKIR - TÜRKİYE

Düzenleyen Şubeler
TMMOB İMO Ankara Şubesi • TMMOB İMO Diyarbakır Şubesi

14.00 - 16.00 **GENEL DEĞERLENDİRME** / *DISCUSSION SESSION*

Moderatör / *Moderator*: **Prof. Dr. Ali İhsan ÜNAY**

Prof. Dr. Gülay Altay
Prof. Dr. Uğur Ersoy
Prof. Dr. İhsan Mungan
Prof. Dr. Zülküf Güneli
Prof. Dr. Mehmet Ali Taşdemir
Y. Mimar Yavuz Önen

16.00 - **DİYARBAKIR KENT GEZİSİ** / *DİYARBAKIR CITY TOUR*

3. Gün / Third Day

17 Ekim / October 2009, Cumartesi / Saturday

B - Salonu / Hall - B

09.00 - 10.20 **XI. OTURUM** / *SESSION XI*

Malzeme ve Yapım Teknikleri: Tarihi Yapılarda Kullanılan Malzemelerin Özellikleri / *Material and Construction Techniques: Material Properties of Historical Buildings*

Oturum Başkanı / *Chair Person:*
Prof. Dr. Mustafa TOKYAY *(ODTÜ)*

18 -19 YY OSMANLI HARMAN TUĞLALARININ KİMYASAL, FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Sedat Kurugöl, *(MSÜ)*

RESTORASYON HARÇLARININ ÖZELİKLERİ

Mehmet Canbaz, *(OGÜ)*
İlker Bekir Topçu, *(OGÜ)*

TARİHİ BİNA ONARIMLARINDA CEPHE TEMİZLİĞİNİN ÖNEMİ VE YÖNTEM SORUNLARI ÜZERİNE

Bekir Eskici, *(Başkent MYO)*

DİYARBAKIR BEHRAMPAŞA CAMİ ARKEOMETRİK ÇALIŞMALARI

Ali Akın Akyol, *(Başkent MYO)*
Yusuf Kağan Kadıoğlu, *(Ank. Ü.)*

10.20 - 10.40 **Çay - Kahve Arası** / *Coffee Break*

TARİHİ YIĞMA YAPILARIN GÜÇLENDİRME VE ONARIM METODLARI ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME 711
Bilge Küçükdoğan

RESTORASYON ÇALIŞMALARINA BİR ÖRNEK: ERZURUM YEĞENAĞA CAMİİ 731
Demet Okuyucu, Muhammet Arslan

XL. OTURUM
Malzeme ve Yapım Teknikleri: Tarihi Yapılarda Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

18 -19 YY OSMANLI HARMAN TUĞLALARININ FİZİKO - KİMYASAL, PETROGRAFİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ 743
Sedat Kurugöl

RESTORASYON HARÇLARININ ÖZELİKLERİ 759
Mehmet Canbaz, İlker Bekir Topçu

TARİHİ BİNA ONARIMLARINDA CEPHE TEMİZLİĞİNİN ÖNEMİ VE YÖNTEM SORUNLARI ÜZERİNE 773
Bekir Eskici

DİYARBAKIR BEHRAMPAŞA CAMİ ARKEOMETRİK ÇALIŞMALARI 785
Ali Akın Akyol, Yusuf Kağan Kadıoğlu

XLI. OTURUM
Malzeme ve Yapım Teknikleri: Tarihi Yapılarda Kullanılan Yapım Teknikleri

19. YÜZYIL DİVRİĞİ KONAKLARINDA VE CAMİLERİNDE YÖRESEL MALZEME VE YAPIM TEKNİĞİ 801
Mustafa Yeğin

SÜLEYMANİYE BÖLGESİNDEKİ AHŞAP YAPILARIN RESTORASYONU 817
Nergiz Vasfioğlu, Cesur Levent Vasfioğlu

DORYLAİON / ŞARKHÖYÜK KAZILARINDA ORTAYA ÇIKAN TAŞ KERPİÇ MİMARİNİN KONSERVASYON VE RESTORASYON SORUNLARI 827
Taciser Tüfekçi Sivas, Hakan Sivas

RESTORASYONDA AHŞAP YAPI DETAYLARI ÜZERİNE BİR İRDELEME: ARTVİN ARHAVİ MERKEZ CAMİİ RESTORASYONU ÖRNEĞİ 835
Mukaddes Ataman, Tülay Zorlu

ERZURUM ÇALIŞTAYI BİLDİRGESİ 860
Remzi Şahin

RESTORASYON HARÇLARININ ÖZELİKLERİ

Mehmet CANBAZ, İlker Bekir TOPÇU

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Batı Meşelik, ESKİŞEHİR
0222 2393750-(dahili 3208-3217), Fax 0222 2393613, mcanbaz@ogu.edu.tr, ilkerbt@ogu.edu.tr

ÖZET

Tarihi eserlerde harç ve sıva onarımı, bugün oldukça ciddi problemler ortaya koymaktadır. Estetik ve tarihi açıdan önem taşıyan sıva ve harçlar restorasyon çalışmalarında önem taşımaktadır. Bu nedenle çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda tuğla kırığı ve kireç ile yapılan horasan harcında kullanılan tuğlaların puzolanik özeliği ve gözenekli yapısı ile günümüz tuğlalarından farklı oluşu belirlenmiştir. Bu gözenekli yapının kireçle reaksiyonunda puzolanik özeliği artırdığı ve sıvaları daha dayanıklı hale getirdiği anlaşılmıştır. Onarım amaçlı kullanılacak yeni horasan harç ve sıvalarındaki tuğlaların özel olarak üretilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan çalışmalarda kireç/tuğla oranlarının önemine, su/bağlayıcı değişimlerine ve kullanılan kirecin özeliklerine de değinilmiştir. Bu çalışmada bağlayıcı olarak kireç ile birlikte kiremit kırığı tozu, mermer tozu ve yüksek fırın cürufu kullanılarak prizmatik harç çubuk numuneleri üretilmiştir. Bu numuneler üzerinde yapılan birim ağırlık, yayılma, ultrases geçiş hızı, rezonans frekansı ve basınç dayanımı deneyleri sonucunda kireç ile birlikte yüksek fırın cürufu kullanımı diğer puzolanlara göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Ayrıca SEM ve XRD kullanılarak yapılan içyapı çalışmalarında doluluğun sağlandığı ve etrenjite rastlanmadığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Tarihi eser, Horasan harcı, Kireç, Puzolan, Dayanım.

PROPERTIES OF RESTORATION MORTARS

Abstract: Nowadays, mortar and plaster repairs in historical buildings pose quite serious problems. Plasters and mortars bearing aesthetical and historical importance are crucial in terms of restoration works. Therefore, various studies have been carried out. As a result of these studies it was determined that bricks used in Khorasan mortar made by crushed brick and lime are different from present day bricks in terms of their pozzolanic characteristics and porous structures. It's understood that increasing the pozzolonic properties and getting better durability of mortars with this porous structure reacted with lime. Be used for mortar and plaster repair new khorasan must be specially produced for the brick that was concluded. Studies have been mentioned that importance of lime/brick ratio, changes of water/binder and lime properties. In this study crushed brick dust, marble dust and blast furnace slag as well as lime were used as binding materials to produce prismatic bar mortar specimens. The use of blast furnace slag along with

lime gave better results compared to other pozzolans as a result of unit weight, flow-test, ultrasonic pulse velocity, resonance frequency and compressive strength tests performed on these specimens. Occupancy was ensured and no ettringite was found in microstructure performed by using SEM and XRD.

Keywords: Khorasan Mortar, Microstructure, Pozzolan, Compressive Strength.

1. GİRİŞ

Eski çağlardan beri insanlar, barınma gereksinimlerini karşılamak için çeşitli binalar yapmışlardır. Bu yapıların zaman içinde iç ve dış etkenler nedeniyle yıpranması kaçınılmaz bir gerçektir. Tarihi nitelik taşıyan binaları korumak, topluma kazandırmak ve gelecek nesillere yaşayan bir varlık olarak aktarmak, öncelikle bu yapıların kullanılır duruma getirilmesiyle sağlanır. Bu amaçla tarihi yapılarının restorasyonların da aslına uygun olarak horasan harcı ve betonu üretilerek kullanılmalıdır. Horasan harcı öğütülmüş kiremit, tuğla gibi pişmiş killer ile kireç, su ve çeşitli puzolanlar kullanılarak üretilen malzemedir. Ayrıca iri tuğla ve kiremit kırıkları kullanılması ile horasan betonu elde edilmektedir (Böke ve diğ. 2002, 2004). Romalılar döneminden sonra Bizans ve Osmanlılarda kullanılan harçlar genel olarak Horasan adı ile anılmıştır (Güleç ve Tulun, 1997). Horasan ismi İran'daki Horasan bölgesinden gelmiştir. Horasan harcı Mısır Piramitlerinde, Asur şehirlerinde, Ortadoğu ve Anadolu uygarlıklarında, İran'da, pek çok eski eser yapımında kullanılmıştır. Osmanlı yapılarından özellikle 15. yüzyıl ve daha sonraki eserlerde, horasan harç ve betonu geniş ölçüde kullanılmıştır. Örnek olarak Rumelihisarı, Süleymaniye Camii temelleri, Yeni Camii ve Nur-u Osmaniye Camii radye temelleri, Belgrad yolu köprüleri, Sultan Ahmet Külliyesi verilebilir. Horasan harcının gücünü, çeşitli dönemlerde yapılmış ve bugün hala ayakta duran birçok eser göstermektedir (Akman ve diğ., 1986). Tarihi yapılarda kullanılan harç ve sıvalar, dönemin yapım teknolojisi hakkında bilgiler vermektedirler. Bu konuda yapılan en eski çalışmalardan biri 1967'de Jedrzjewska tarafından yapılmıştır. Polonya'daki birçok tarihi eserden numune alan Jedrzjewska, harç analizlerinin kimyasal olarak gerçekleştirilmesi gerektiğini vurgulayarak, malzeme üzerinde yalnızca istenilen bilgilere yönelik analizler yapılmasının daha doğru olacağını belirtmiştir. Tarihi harçların sınıflandırılmasında kronolojik sıra kullanılabileceği gibi renk farklılıklarına göre de sınıflandırma yapılabilir. Tarihi harçların kimyasal, minerolojik ve mikro yapıları konusunda çeşitli araştırmalar yapılmıştır (Stongar, 2004). Eski hamam, sarnıç, medrese gibi yapılardan alınan örnekler üzerinde yapılan araştırmalar sonunda kullanılan kirecin, tuğla türünün, örülme inceliğinin, kullanılan tuğla kırığı ve tozunu granülometrisinin önemli olduğu görülmüştür. Roma ve Osmanlı dönemi yapılarından alınan sıvaların farklı noktalarında farklı malzeme özeliklerine rastlanmıştır (Akman ve diğ., 1986). Yapılan çalışmalarda Ortadoğu'da bulunan tarihi yapılarda çok çeşitli harçların kullanıldığı ve taş işlemeciliğinde ise bağlayıcı olarak reaktif kireç kullanıldığı görülmüştür (Freidin ve Meir, 2004). Pişmiş kil kırı-

ğı kullanılarak üretilen harçlar Bizans ve Osmanlı dönemlerinde büyük farklılıklar göstermemekle birlikte, bu harçların hazırlanmasında karışıma katılan malzeme özelikleri kadar üretim yöntemleri de etkili olduğu görülmüştür (Moropoulou ve diğ., 2003). Horasan harç ve sıvaları, kireç, agrega ve katkı maddelerinden üretilen bir çeşit kireç harcıdır. Kireç, $CaCO_3$ minerallerinden oluşan kalker, dolomit, tebeşirden elde edilir. Bu taşlar, 900 ^{0}C de kalsine edildiğinde yapısındaki CO_2 ayrılır ve CaO'ya dönüşürler. Oluşan bu ürüne sönmemiş kireç adı verilmektedir. CaO su ile reaksiyonu girdiğinde $Ca(OH)_2$'ye (sönmüş kireç) dönüşmektedir (Böke ve diğ. 2004). Agregalar, yapının dayanımını arttırmakla beraber karışımın gözenekli olmasını sağlayarak karbonatlaşmayı hızlandırmaktadır. Agregalar kireçle reaksiyona girenler (puzolan) ve reaksiyona girmeyen (etkisiz) agregalar olarak ikiye ayrılmaktadır (Holmes ve Wingate, 1997). Tüf, tras, opal doğal puzolanlar olarak adlandırılırken tuğla, kiremit gibi pişmiş killer ise yapay puzolan adını almaktadır (Lea, 1940; Topçu ve diğ. 2005a). Kireç dışında bağlayıcı olarak doğal Puzolanlar ve organik katkılar kullanılmıştır (Moropoulou ve diğ., 2005). Kullanılan harcın özeliklerini geliştirmek, dayanım kazanmasını sağlamak için çeşitli katkı maddeleri kullanılmıştır. Çavdar hamuru, yumurta akı harcın çabuk sertleşmesine, arpa dayanım kazanmasına ve keten tohumu gibi yağlar ise harcın plastik özeliğinin artmasına yardımcı olmuştur (Sickels, 1981). Kireç harç ve sıvalarının kimyasal reaksiyonu, yapay puzolanın asit, kirecin ise baz etkisi göstermesi sonucu C-S-H jellerinin oluşması ile açıklanmaktadır (Böke ve diğ. 2004). Puzolanik reaksiyonun oranı uygun puzolan kullanımı ile artabilir (Moropoulou ve diğ., 2004). Asit-baz reaksiyonun gerçekleşmesi için ortamın nemli olması gerekmektedir. Kirecin etkisiz agregalarla reaksiyonu sonucunda hidrolik olmayan harçlar, puzolanlarla reaksiyonu sonucunda ise hidrolik harçlar elde edilir. C-S-H jelleri hidrolik harçların çak daha dayanımlı olmasını sağlamaktadır. Hidrolik harçların diğer bir özeliği ise su altında da dayanım kazanabilmektedirler. Horasan harcı karışımına alçı eklenmesi, ince taneli puzolan kullanılması ve ortam sıcaklığı üretilen harcın dayanımını arttırmaktadır (Böke ve diğ. 2002).

Horasan harç ve sıvalarının özeliklerini anlamak için tarihi yapılardan örnekler alınmıştır. Bu örnekler üzerinde SEM ve XRD analizleri yapılmıştır. XRD analizinde kalsit ve kuvars mineralleri gözlenmiştir. Yapılan incelemelerde kullanılan tuğlaların kuvars ve feldspat içerdiği belirlenmiştir. Amorf malzemelerin varlığı puzolanlık özeliğinin fazla olduğunu göstermektedir. Amorf malzeme, feldspat ve kuvars varlığı tuğlaların 600-900 ^{0}C civarında pişirildiğini göstermektedir. Sıvanın yapısında bulunan kireç yapının bünyesindeki suyla tekrar çözünüp tekrar çökelmesi, sıva tabakasını bozmakta ancak çökelen $CaCO_3$ nedeniyle bütünlüğü bozulmamaktadır. Harç ve sıvanın dayanımını arttırmak için kullanılan alçı etrenjit oluşumuna neden olmuştur. Mikro yapı görüntülerinde bozulmanın nedeninin etrenjit kristalleri olduğu gözlenebilmektedir (Böke ve diğ. 2002, 2004). Alınan örnekler üzerinde yapılan basma, eğilme, ultrases geçiş hızı deney sonuçlarının birbirine yakın çıktığı gözlenmiştir (Topçu ve diğ. 2005a).

2. ARAŞTIRMA YÖNTEMİ

Deneysel çalışmalar iki aşamada incelenmiştir. Birinci aşama taze ve sertleşmiş harç deneyleri, ikinci aşama ise içyapı analizlerini içermektedir.

Malzemeler

Kireç: Kireç taşı ve kireç taşının iki katı oranında su kullanılarak söndürülmüş elde edilen kireç kaymağı çalışmalarda kullanılmıştır.

Kiremit kırığı ve tozu: Deneylerde kullanılan kiremit kırığı ve tozu Kılıçoğlu Kiremit Fabrikasından elde edilmiştir. Üretimde agrega olarak öğütülen kiremit kırıntıları elekten geçirilerek 0-4 mm aralığında gruplandırılmıştır. Birim ağırlığı 1.21 gr/cm^3, özgül ağırlığı 2.63 olarak saptanmıştır, üretilen harcın priz süresi ise 8-18 saattir.

Standart kum: TS EN 196-1'e uygun "standart kum" kullanılmıştır. Kumun birim ağırlığı 1.55 gr/cm^3 ve özgül ağırlığı 2.50 olarak belirlenmiştir.

Granüle yüksek fırın cürufu: Çalışmada kullanılan granüle yüksek fırın cürufu 4000 cm^2/gr inceliğinde olup Ereğli Demir-Çelik Fabrikalarından temin edilmiştir. Bu cürufa ait Erdemir Ar-Ge Laboratuvarında yapılan analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları

Kimyasal Bileşim, %		Fiziksel Özelikler	
SiO_2	35.09	Gevşek birim ağırlık, kg/m^3	1052
CaO	37.79	Sıkışık birim ağırlık, kg/m^3	1236
MgO	5.50	Özgül ağırlık	2.08
Al_2O_3	17.54	Su emme oranı, %	10
Na_2O	0.30	Aşınma, %	-
S	0.66	Ufalanma oranı, %	-
MnO	0.83	Kil miktarı, %	1
TiO_2	0.68	Yanıcı madde oranı, %	-
Fe	0.70	İnce madde oranı, %	3
P_2O_3	0.37	Organik madde (NaOH'da) Renk	Açık sarı

Mermer: Afyon ve çevresinde çıkarılan mermerlerin kesilmesi sırasında mermer tozu ortaya çıkmaktadır. Mermer tozu sulu kesim yapıldığından, başlangıçta ıslak olarak depo edilmekte veya doğrudan araziye bırakılmaktadır. Dolayısıyla çevre kirliliğine yol açan bu malzeme numune üretiminde kullanılmıştır.

Tablo 2. Mermer tozunun granülometrik değerleri

Elek Boyutu	% Geçen (yıkama yoluyla)
2.000 mm	100.0
0.600 mm	99.40
0.300 mm	95.10
0.075 mm	91.20

Üretim yöntemi ve yapılan deneyler

Su, kireç, kum oranları sırası ile 0.6, 1.0, 2.5 olacak şekilde kontrol numunesi üretilmiş ve kireç oranı % 10, % 20, % 30, % 40 azaltılarak yerine kiremit tozu ve yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Bu şekilde tarihi yapıların onarımına uygun harç karışımı, yüksek fırın cürufu, standart kum, kiremit kırığı ve tozunun harç özelikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Tablo 3'te malzeme oranları kireç ağırlığına bağlı olarak belirtilmiştir. Yayılması ve birim ağırlığı deneysel olarak belirlenen harçlar karışımları 4x4x16 cm boyutlarında prizmatik kalıplara yerleştirilmiş ve üretimden 72 saat sonra kalıplardan alınmıştır. Numuneler, deneylerin yapılacağı 7, 14, 28 ve 90 güne kadar relatif nemi % 50±5, sıcaklığı 20±-3 ^{0}C olan ortamda bekletilmiştir. Üzerlerinde birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, rezonans frekansı, basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca SEM ile mikroyapı fotoğrafları çekilmiş ve XRD ile kimyasal yapısı belirlenmiştir (Topçu ve diğ. 2005b).

Tablo 3. Numunelerin kodlaması ve malzeme karışım oranları

Numune	Su	Kireç	Standart Kum	Kiremit Kırığı	Kiremit Tozu	YFC
SKHH	0.6	1.00	2.5	-	-	-
KKHH	0.6	1.00	-	2.5	-	-
KTHH10	0.6	0.90	2.5	-	0.10	-
KTHH20	0.6	0.80	2.5	-	0.20	-
KTHH30	0.6	0.70	2.5	-	0.30	-
KTHH40	0.6	0.60	2.5	-	0.40	-
CHH10	0.6	0.90	2.5	-	-	0.10
CHH20	0.6	0.80	2.5	-	-	0.20
CHH30	0.6	0.70	2.5	-	-	0.30
CHH40	0.6	0.60	2.5	-	-	0.40

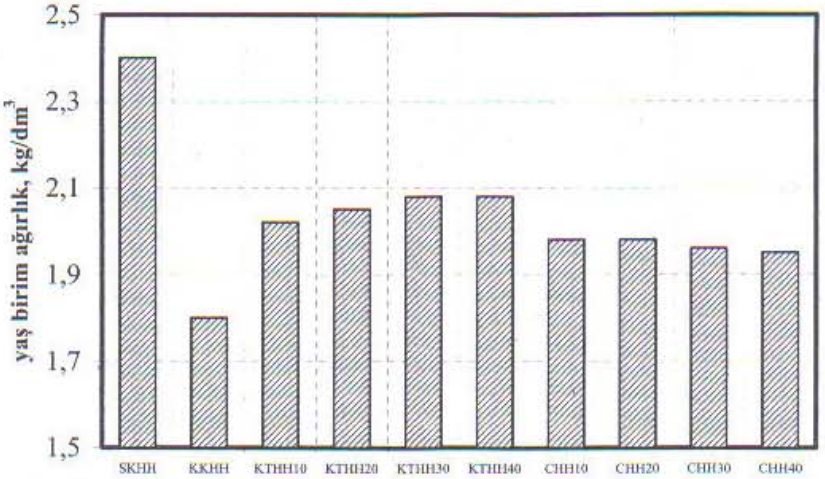
3. BULGULAR

Üretilen numuneler üzerinde basma deneyi, eğilme deneyi, ultrases geçiş hızı deneyi, dinamik elastisite modülü tayini ve mikro yapı analiz çalışmaları yapılmıştır. Yayılma deneyi, harçta kullanılacak su miktarını belirlemek için yapılmıştır. Birkaç deneme yapılarak uygun değer su oranı tespit edilmeye çalışılmış, Tablo 4'te verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

Tablo 4. Kiremit kırığı ve standart kumla üretilen numunelerin yayılma sonuçları

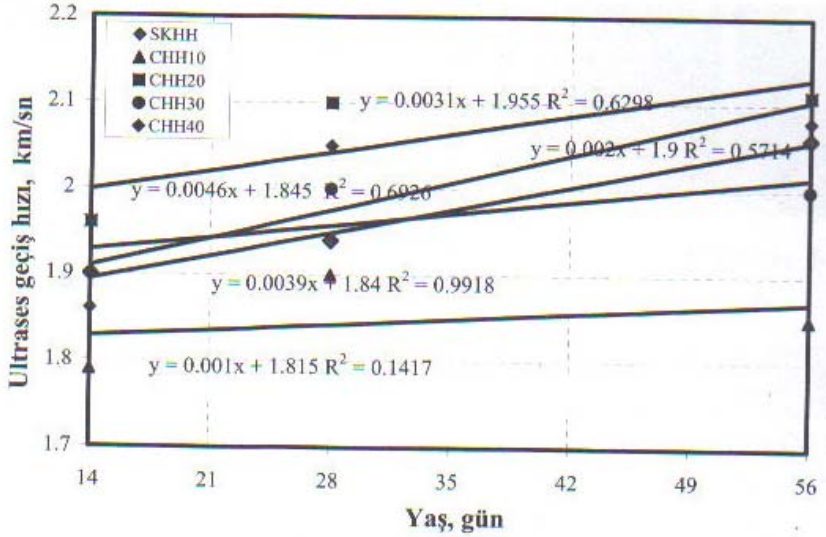
Kum (gr)	Su (gr)	Kireç (gr)	Yayılma (cm)	Kiremit kırığı (gr)	Su (gr)	Kireç (gr)	Yayılma (cm)
1000	500	500	18.00	1000	500	500	11
1000	400	500	14.30	1000	550	500	12.8
1000	350	500	11.10	1000	600	500	13.2

Birim ağırlık deneyinde harcın, su/kireç oranı hakkında önemli bilgiler edinilir. Birim ağırlığın küçük olması, harcın içinde boşluk olduğunu göstermesi bakımından önemlidir. Şekil 1'de yaş birim ağırlık deneyi sonuçları verilmiştir. Standart kum kullanılarak üretilen numunelerinin yaş birim ağırlıkları ve sertleşmiş birim ağırlıkları kiremit kırıklı numunelere göre yaklaşık % 33 oranında daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni kullanılan standart kumun birim ağırlığının, kiremit kırığının birim ağırlığından yüksek olmasıdır.



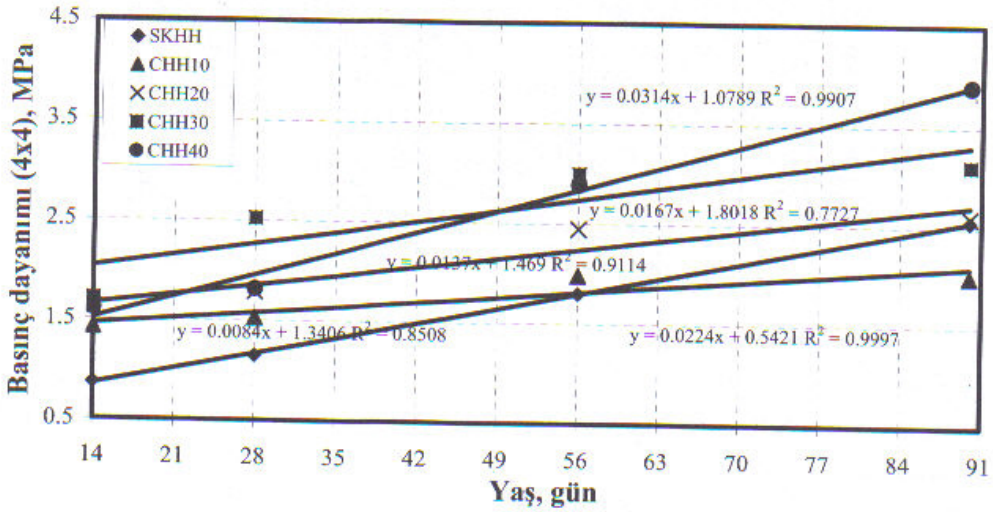
Şekil 1. Taze harçta ortalama yaş birim ağırlık değerleri

Hasarlı deneyler uygulanmadan önce yapılan ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde yüksek fırın cüruflu numunelerin cüruf oranı arttırıldıkça ultrases geçiş hızı artmaktadır. Yüksek fırın cürufu ile üretilen numunelerin ultrases geçiş hızları yaklaşık % 20 daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni öğütülmüş yüksek fırın cürufunun ince taneli olması ve yaptığı reaksiyonlar sonucunda oluşan ürünlerin üretilen harçlarda doluluğu arttırması olarak düşünülebilir.



Şekil 2. SKHH ile YFC'li numunelerin ultrases geçiş hızları

Eğilme deneyinde iki parçaya ayrılmış olan prizmalar kullanılarak basma dayanımı deneyi yapılmıştır. Şekil 3'te görülen deney sonuçlarına göre; yüksek fırın cüruflu numunelerin basınç dayanımı SKHH numunelerinden yaklaşık % 52 oranında daha yüksek çıkmıştır. Yüksek fırın cürufu oranı arttıkça dayanım artmaktadır. Puzolan olarak kiremit tozunun kullanıldığı gruplarının (KTHH) basınç dayanımlarının cüruflu numunelere göre % 33 daha düşük olduğu ve zamana bağlı olarak dayanımlarının düzenli olarak artmadığı gözlemlenmiştir. Bu şekilde çıkmasının nedeni, kiremit tozu elde etmek için temin edilen kiremitlerin puzolanik maddelerinin az olmasına bağlanmaktadır. Mermer tozu kullanılarak üretilen numunelerin (MTHH) basınç dayanımları kiremit tozlu numunelerle yaklaşık çıkmaktadır. Mermer tozu oranı arttırıldıkça basınç dayanımında artış görülmektedir. Mermer tozlu numunelerin dayanım kazanma sürelerinin daha uzun olduğu ve zamana bağlı olarak dayanımlarının arttığı gözlenmektedir.

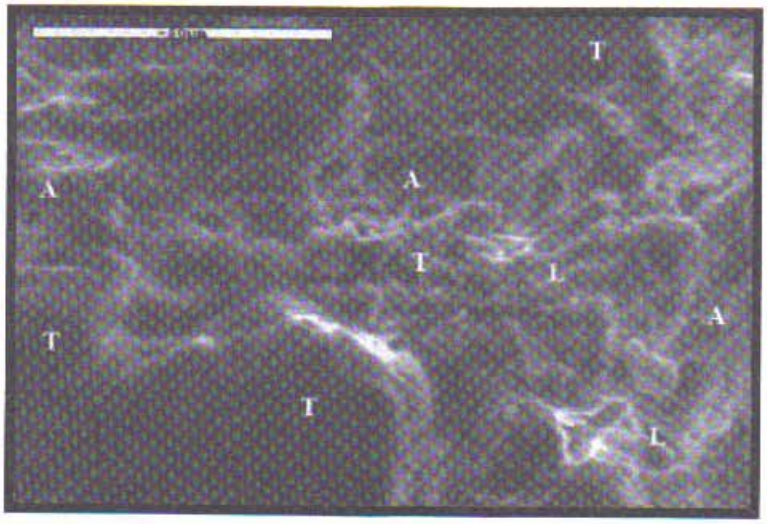


Şekil 3. SKHH ile YFC'li numunelerin basınç dayanımları



Şekil 4. Hassas kesme cihazı, Otomatik parlatma cihazı, Kaplama cihazı, SEM cihazı

Malzemelerin fiziksel, kimyasal, elektronik ve mekanik özelikleri mikro yapılarına bağlıdır. Bunun nedenle malzemelerin dayanımının ve dayanıklılığının yanında mikro yapılarının da incelenmesi önem taşımaktadır. İncelemenin kapsamına göre esas malzemenin kenar ve ortası, ince ve kalın yeri, bozuk ve sağlam kısımları gibi çeşitli bölümlerinden ayrı ayrı numune alınmalıdır. Alınan numuneler çeşitli aşamalardan geçirilerek mikro yapı çekimlerine hazır hale getirilir. Şekil 4'te de görüldüğü gibi ilk olarak seramik malzemeler elmas diskli laboratuvar kesme cihazlarında yaş yöntemle kesilir. İncelenecek numuneler küçük veya biçimsiz şekilli ise zımparalama ve parlatma esnasında elde tutulamayacağı için kalıplamak gerekir. Parlatma işleminde tane büyüklüğü mikron cinsinden belirtilen aşındırıcılar kullanılabileceği gibi kum ve koktan elde edilen silisyum karbür (SiC), Al_2O_3 veya magnetit tozu içeren zımpara kâğıtları da kullanılmaktadır. İletkenliği sağlamak için numune yüzeyi altın kaplanır. Genellikle oksitlenmenin görülmemesi nedeniyle altın kaplama tercih edilmektedir (Aksak ve Kara 2006).



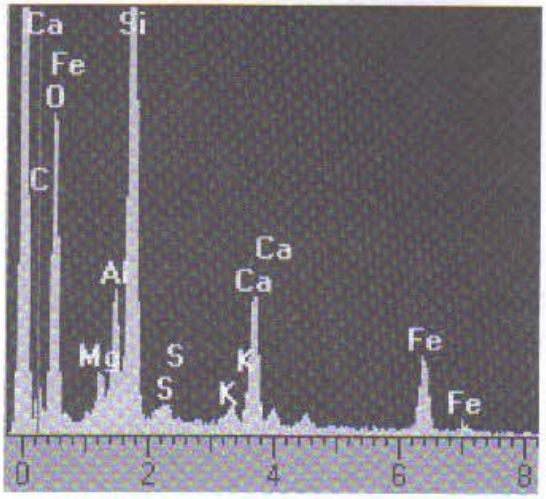
Şekil 5. Horasan harcının mikroyapısı (1000 büyütme)

Yapılan araştırmada horasan harcı, KTHH40 ve CHH40 numunelerinden alınan örnekler üzerinde SEM kullanılarak mikroyapı fotoğrafları çekilmiş, EDX kullanılarak kimyasal analiz yapılmıştır. Mikroyapı çekimi için hazırlanmış örnekler tarayıcı elektron mikroskobunun SEM haznesine konularak 600-1000 kat büyütme yapılarak fotoğrafları çekilmiştir. Şekil 4'te 1000 kat büyütme yapılarak çekilen mikroyapı fotoğrafında horasan numunesinin tane ve bağlayıcı fazları görülmekte-

dir. Mikroyapı fotoğrafı incelendiğinde hidratasyon reaksiyonları sonucunda oluşan ürünlerin taneler arası bölgeyi doldurduğu ve taneler ile iyi aderans sağladığı görülmüştür. Şekil 5'de gösterilen mikro yapı fotoğrafına ait A bölgesinin kimyasal analizi sonuçları Tablo 5'te gösterilmiştir. Taneler arası bölge olarak tanımlandırabileceğimiz A bölgesi yapısının C-S-H ve silikatlı bileşiklerden oluştuğu tahmin edilmektedir.

Tablo 5. Horasan harcı A bölgesinin kimyasal yapısı

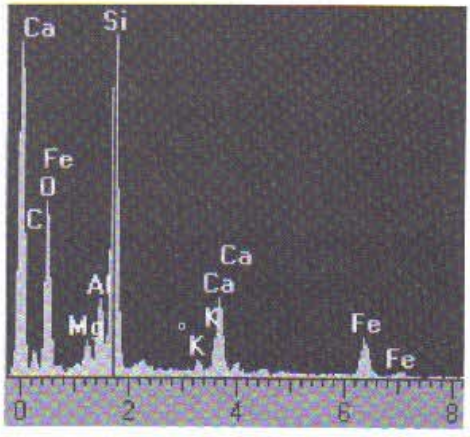
Element	Atomsal %	Ağırlıkça %
Al	3.48	4.49
Si	17.74	23.87
O	69.81	53.51
Mg	1.72	2.00
K	0.38	0.70
Ca	3.55	6.82
Fe	3.07	8.21
S	0.26	0.40



Şekil 5'de gösterilen mikro yapı fotoğrafına ait T bölgesinin kimyasal analizi sonuçları Tablo 6'da, L bölgesine ait kimyasal analiz sonuçları ise Tablo 7'de gösterilmiştir. Taneler T bölgesi olarak tanımlanmış ve yapısı silikatlı bileşiklerden oluştuğu düşünülmektedir. Taneler arasında görülen lifsi yapılar ise L bölgesi olarak adlandırılmıştır. Atomsal dağılım incelendiğinde bu yapının O, Si, Al, Ca, Fe ve Mg'den oluştuğu görülmüştür. Özellikle O ve Si oranın fazla olduğu dikkat çekmektedir.

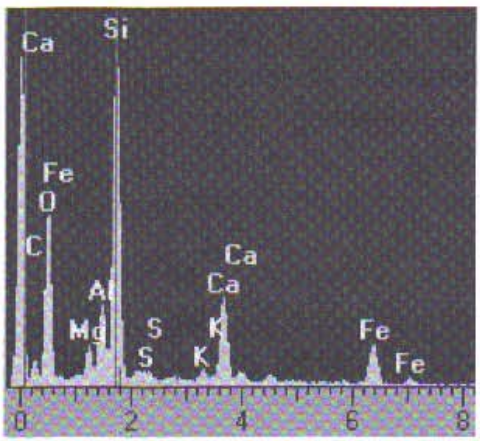
Tablo 6. Horasan harcı T bölgesinin kimyasal yapısı

Element	Atomsal %	Ağırlıkça %
Al	3.39	4.44
Si	17.90	24.40
O	71.96	55.89
K	0.48	0.92
Ca	3.46	6.74
Fe	2.81	7.61

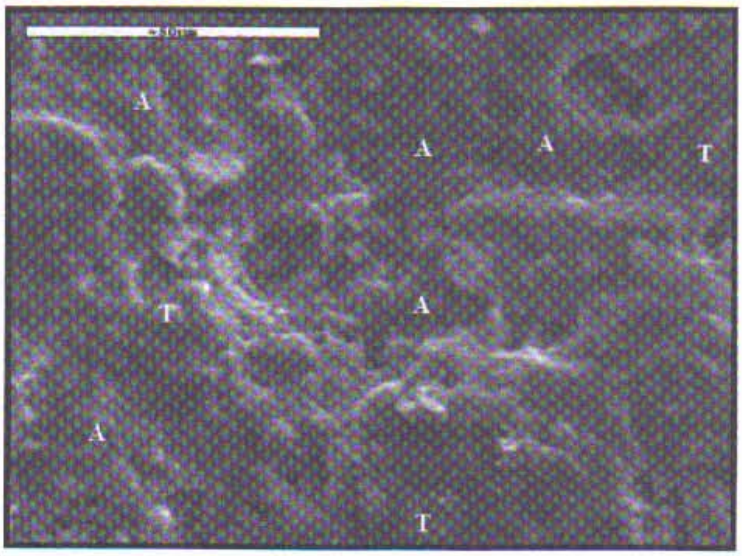


Tablo 7. Horasan harcı L bölgesinin kimyasal yapısı

Element	Atomsal %	Ağırlıkça %
Al	3.85	4.96
Si	16.97	22.76
O	69.43	53.05
Mg	2.23	2.58
K	0.52	0.96
Ca	3.75	7.18
Fe	3.11	8.28
S	0.15	0.22



Mikroyapı incelemeleri için CHH40 numunelerinden yaklaşık 1 cm boyutlarında küp şeklinde parçalar kesilmiş, yüzeyi düzeltilmiş, bakır ile kalıba alınmış, parlatılmış ve yüzeyi altın ile kaplanmıştır. Mikroyapı çekimi için hazırlanmış örnekler tarayıcı elektron mikroskobunun (SEM) haznesine konularak 25-1000 kat büyütme yapılarak fotoğrafları çekilmiştir. Ayrıca bu örnekler EDX kullanılarak kimyasal analizleri yapılmış, içyapısındaki atom çeşit ve miktarları belirlenmiştir.



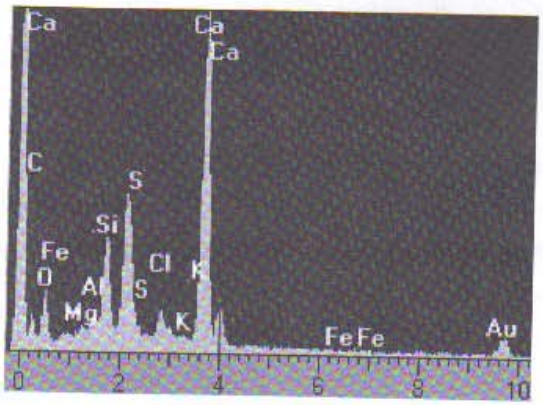
Şekil 6. CHH40 numunesinin mikroyapısı (1000 büyütme)

Şekil 6'da 1000 kat büyütme yapılarak elde edilen CHH40 numunesine ait mikroyapı fotoğrafı görülmektedir. Şekil 6 incelenerek mikroyapıda küçük kum taneleri ve bağlayıcı fazın durumu belirlenmiştir. İnce kum tanelerinin bu bağlayıcı faz tarafından oldukça iyi sarıldığı ve aralarındaki aderansın yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 6'da gösterilen mikroyapı fotoğrafına ait T bölgesinin kimyasal analizi sonuçları Tablo 8'de gösterilmiştir. İnce kum taneleri T bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Bu bölgenin yapısı % 65 O, % 19 Ca, % 6 Si, % 8 C, % 1 Al atomların-

dan oluşmuştur. İnce kum taneleri bağlayıcı ile oldukça iyi sarıldığı için atomsal dağılımda Ca oranı Si'ye göre daha fazla çıkmıştır. C'nin yüksek fırın cürufundan geldiği tahmin edilmektedir. Difraktogramda görülen Au ise SEM analizi öncesinde yapılan kaplamadan kaynaklanmaktadır.

Tablo 8. CHH40 numunesi T bölgesinin kimyasal yapısı.

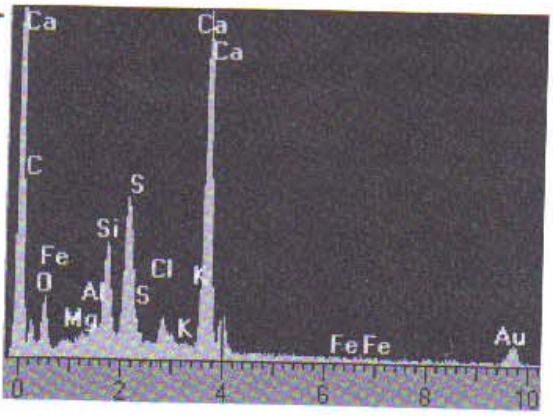
Element	Atomsal %	Ağırlıkça %
Al	1.13	1.43
Si	6.24	8.25
O	64.61	48.66
C	8.08	4.57
Mg	0.75	0.85
K	0.20	0.37
Ca	18.96	35.76
Fe	0.04	0.11



Şekil 6'a gösterilen mikro yapı fotoğrafına ait A bölgesinin kimyasal analizi sonuçları Tablo 9'da gösterilmiştir. Taneleri arasındaki alan A bölgesi olarak tanımlanmıştır. Bu alan % 66 O, % 19 Ca, % 7 C, % 6 Si, % 1 Al ve % 1 Mg'den oluşmuştur. Burada T ve A bölgesi atom yüzdelerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Taneler arasındaki bölgenin C-S-H ve C-H'ler den oluştuğu tahmin edilmektedir.

Tablo 9. CHH40 numunesi A bölgesinin kimyasal yapısı.

Element	Atomsal %	Ağırlıkça %
Al	0.98	1.24
Si	5.78	7.67
O	66.16	50.02
C	7.28	4.13
Mg	0.78	0.90
K	0.18	0.34
Ca	18.81	35.63
Fe	0.03	0.07

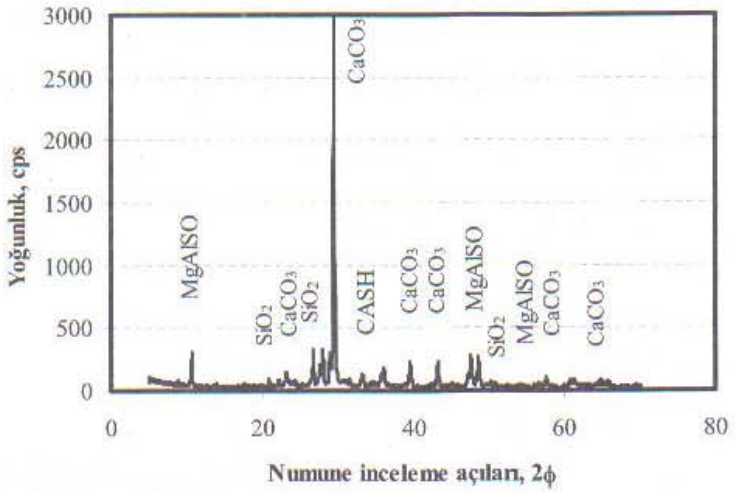


Horasan harcı numuneleri toz haline alınan örnek toz haline getirilerek 63 μm'lik elekten elenmiş ve elenen numune kalıba yerleştirilip sıkıştırıldı. XRD cihazına yerleştirilen numune 10^0-70^0 arasında inceleme yapılarak horasan harcının kimyasal yapısı bulunmaya çalışılmıştır.



Şekil 7. Numune hazırlanması ve XRD cihazı

Şekil 7'de toz halinde kalıba sıkıştırılan numune ve XRD cihazı görülmektedir. XRD analizi sonuçları Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde $CaCO_3$, SiO_2, M-A-S, C-A-S-H bileşiklerinin oluştuğu görülmüştür. CH ve CO_2 reaksiyonu sonucunda $CaCO_3$ ortaya çıkmıştır. M-A-S oluşumu ise Mg'nin Ca ile yer değiştirerek C-S-H'ı bozduğunu göstermektedir [15].



Şekil 8. Horasan harcı numunesinin XRD incelemesi

4. SONUÇ:

- Basınç dayanımı, tüm gruplarda kiremit tozlu numunelerde gözlemlenen farklılıklar dışında zamanla artmaktadır.
- Yüksek fırın cüruflu numunelerin basınç dayanımı SKHH numunelerinden daha yüksek çıkmıştır. Yüksek fırın cürufu oranı arttıkça dayanım artmaktadır.
- Kiremit tozu katkılı numunelerin basınç dayanımı SKHH numunelerinden ve yüksek fırın cüruflu numunelerden daha düşük çıkmıştır. Kiremit tozu oran arttırıldıkça basınç dayanımlarının azaldığı gözlemlenmektedir.
- Sadece Standart kum ve kireç kullanılarak üretilen numunelerin basınç dayanımları kiremit kırığı katkılı (KKHH) numuneler ile yaklaşık olarak aynı çıkmıştır.

- Puzolan olarak kiremit tozunun kullanıldığı grupların (KTHH) basınç dayanımlarının düşük olduğu ve zamana bağlı olarak dayanımlarının düzenli olarak artmadığı gözlemlenmiştir.
- Bu şekilde çıkmasının nedeni, kiremit tozu elde etmek için temin edilen kiremitlerin puzolanik maddelerinin az olmasına bağlanmaktadır. Kiremit tozunun puzolanik etkilerini incelemek için farklı fabrikaların ürettiği malzemelerle incelenmelidir.
- Mermer tozu kullanılarak üretilen numunelerin (MTHH) basınç dayanımları kiremit tozlu numunelerle yaklaşık çıkmaktadır. Mermer tozu oranı arttırıldıkça basınç dayanımımda artış görülmektedir. Zamana bağlı olarak dayanım artışı gözlenmektedir.
- Kireç ve standart kum kullanılarak ürettiğimiz (SKHH) numunelerin ultrases geçiş hızları kiremit kırıklı numunelerden yüksek çıkmıştır.
- Yüksek fırın cüruflu numunelerin cüruf oranı arttırıldıkça ultrases geçiş hızını arttırdığı gözlemlenmiştir.
- Kiremit tozlu numunelerin ultrases geçiş hızları SKHH numunelerinden daha düşük çıkmıştır. Kiremit tozu arttırıldıkça geçiş hızları düşmektedir.
- Mermer tozlu numunelerde ise mermer tozu oranı attırıldıkça ultrases geçiş hızı artmaktadır.
- Standart kum kullanılarak üretilen numunelerinin yaş birim ağırlıkları ve sertleşmiş birim ağırlıkları kiremit kırıklı numunelere göre daha yüksek çıkmıştır.
- Kiremit kırığı kullanılan numunelerde dinamik elastisite modülü standart kumlu SKHH numuneler göre daha düşüktür.
- Yüksek fırın cüruflu numunelerin dinamik elastisite modülleri SKHH numunelerinden daha yüksek çıkmıştır.
- Kiremit kırıklı numunelerin dinamik elastisite modülleri yüksek fırın cüruflu numunelere göre daha düşük olduğu gözlenmiştir.
- Tarihi bir yapının onarımı için harç üretimi söz konusu olduğunda tek bir karışım oranının önerilmesi mümkün değildir. En uygun harcın elde edilmesi için yerinde ve laboratuvarda deneyler yapılarak mevcut yapıdaki harcın özeliklerini belirlemek gerekir.
- Onarılacak yapıdaki harcın özelikleri belirlendikten sonra üretilecek harca deneyler ile belirlenecek oranlarda öğütülmüş pişmiş tuğla, pişmiş tuğla tozu veya cüruf ve mermer tozu katılarak istenilen özeliklere en yakın özelikte harç üretilmelidir.
- Horasan harcının başarılı olması ve onarımlarda iyi sonuç vermesi için yapılan deneylerden de görüleceği gibi tuğla kalitesi, kullanılan malzeme cinsleri önem taşımaktadır.
- Hazırlanan horasan harcının beklediğimiz yükü taşıyabilmesi, yeterli basınç dayanımı göstermesi için kullanılan tuğla iyi pişmiş, yeterli kimyasal aktivite kazanmış olmalıdır.

- Numunenin saklanacağı ortam koşulları da ayrı bir önemli noktadır. Numuneler ne kür havuzunda ne de kuru ortam da bırakılmamalıdır. Sürekli bir nemlilik sağlanmasına dikkat edilmelidir.
- Üretilen numunenin istenilen dayanımı göstermesi için uzun bir zaman geçtiği göz önünde bulundurulmalıdır.
- Belirtilen veriler dikkate alındığında onarımlarda kullanılacak horasan harcı başarılı bir şekilde görev yapmaktadır.

KAYNAKLAR

Akman M.S., Güner A., Aksoy, İ. H. (1986) Horasan Harcı ve Betonunun Tarihi ve Teknik Özelikleri, II. Ulus. Türk. İslam Bilim ve Teknolojisi Tarihi Kongresi, İstanbul, 17s.

Aksak A., Kara İ. (2006) Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılacak Horasan Harçlarının Mühendislik Özelikleri, Bitirme Ödevi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 85s.

Böke H., Akkurt S., Ipekoğlu B., Uğurlu E. (2002) Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılacak Horasan Harç ve Sıvalardaki Puzolanik Malzemelerin Özeliklerinin Araştırılması, Tübitak Projesi, Kod: İÇTAG-1674, 106s.

Böke H., Akkurt S., İpekoğlu B. (2004) Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı ve Sıvalarının Özelikleri, Yapı Dergisi, Sayı 269, ss. 90-95.

Freidin C., Meir. I.A. (2004) Byzantine Mortars of the Negev Desert, Construction & Building Materials 19, pp. 19-23.

Güleç A., Tulun T. (1997) Physico-Chemical and Petrographical Studies of Old Mortars and Plasters of Anatolia, Cement and Concrete Research, 27 (2): ss. 227-234,

Holmes S., Wingate M. (1997) Building with Lime, Intermediate Techn. Publ., London.

Lea F.M. (1940) Investigations on Puzolanas, Building Res., Tec. Paper No.27, pp. 1-63.

Moropoulou A., Polikreti K., Bakolas A., Michailidis P. (2003) Correlation of Physicochemical and Mechanical Properties of Historical Mortars and Classification by Multivariate Statistics, Cement and Concrete Research, 33(6), pp 891-898.

Moropoulou A., Cakmak A., Labropoulos K.C., Van Grieken R., Torfs K. (2004) Accelerated Microstructural Evolution of a Calcium-Silicate-Hydrate (C-S-H) Phase in Pozzolanic Pastes Using Fine Siliceous Sources: Comparison with Historic Pozzolanic Mortars, Cement and Concrete Research, 34(1), pp. 1-6.

Moropoulou A., Bakolas A., Anagnostopoulou S. (2005) Composite Materials in Ancient Structures, Cement and Concrete Composites, 27 (2), pp. 295-300.

Satongar (Laçinyurt) Ş. (2004) İstanbul Şehir Surları Üzerine Bir Araştırma, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. ABD, YL Tezi, 123s.

Sickels L.B. (1981) Organics and Synthetics: Their Use as Additives in Mortars, Mortars, Cements and Grouts Used in the Conservation of Historic Buildings, Proceedings of Symposium in Rome, Roma, İtalya, pp. 25-52.

Topçu İ.B., Aksak A., Kara İ. (2005a) Tarihi Horasan Harcının Mühendislik Özelikleri, İMO Eskişehir Şubesi Bülten 2005, Yıl 9, Sayı 17, ss. 28-31.

Topçu İ.B., Canbaz M., Karanfil H. (2005b) Horasan Harcının Mühendislik Özellikleri, Yapı Mekaniği Semineri 2005, Eskişehir, ss. 96-104.