

Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı ve Sıvalarının Özellikleri

DR. HASAN BÖKE

Doç.
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Mimari Restorasyon Bölümü
Öğretim Üyesi

DR. SEDAT AKKURT

Yrd. Doç.
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Makina Mühendisliği Bölümü
Öğretim Üyesi

DR. BAŞAK İPEKOĞLU

Doç.
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Mimari Restorasyon Bölümü
Öğretim Üyesi

Giriş

Tuğla kırığı ve kireç kullanılarak hazırlanan horasan harcı ve sıvaları tarihi yapıların inşasında kullanılan en önemli bağlayıcı malzemelerdendir. Tarihi yapıların korunmasına yönelik yapılacak müdahalelerden önce bunların özelliklerinin bilinmesi ve bu özelliklere sahip harç ve sıva üretilerek koruma çalışmalarının yürütülmesi gerekmektedir. Çimento gibi bilinçsizce seçilen malzemelerle yapılan müdahaleler, tarihi yapıların bozulma sorunlarını artırmaktadır. Bu nedenle, çok sayıda araştırmacı tarihi yapılarda kullanılan harç ve sıvaların özellikleri üzerine çalışmıştır. Bu çalışmalar **Eric Hansen** ve arkadaşları (2003) tarafından toplanmış ve sınıflandırılmıştır. Bu bibliyografya, konu ile ilgili araştırma yapanlar için önemli bir kaynaktır.

Burada sunacağımız çalışma, tarihi horasan harcı ve sıvalarının en temel özelliklerini tanımlamaya yöneliktir. Bilindiği gibi, horasan harcı ve sıvaları, kireç harçları içinde tanımlanmaktadır. Bu nedenle, bu yazıda öncelikle kireç harcı ve sıvalarının hammadde kompozisyonları ve elde edilmeleri konularında özet bilgi verilecek daha sonra horasan harcı ve sıvalarının özellikleri tanımlanacaktır.

Kireç Harcı ve Sıvaları

Kireç kullanılarak elde edilen harç ve sıvalar, Eski Yunan, Roma ve onu izleyen dönemlerden, çimentonun bulunmasına kadar geçen sürede yapıların inşalarında kullanılmıştır. Kireç harcı ve sıvaları, bağlayıcı olarak kireç ve dolgu malzemesi olarak agregaların karıştırılması ile elde edilir. Kireç harçlarının hazırlanmasında kirecin veya harcın özelliklerini geliştirmek amacı ile kirece veya harca organik ve inorganik maddelerin katıldığı da bilinmektedir. Aşağıda kireç harç ve sıvaları oluşturan bu hammaddeler tanımlanmaktadır.

Kireç: Kirecin hammaddesi, kalsiyum karbonat (CaCO_3) minerallerinden oluşan kireç taşlarıdır. Bu taşlar ısı ile kalsine olup karbondioksit gazının (CO_2) yapıdan ayrılması sonucunda kalsiyum oksite (CaO) dönüşürler. Elde edilen bu ürün sönmemiş kireç olarak adlandırılır. Kalsiyum karbonatın kalsinasyon sıcaklığı, 100 % CO_2 ortamında ve 760 mm civa basıncında 900 °C dir (Boynton, 1980). Bu sıcaklık, CO_2 derişiminin azalması ile birlikte düşmektedir.

Kalsinasyon sonucunda elde edilen sönmemiş kireç (CaO), su veya havada bulunan

nem ile reaksiyona girerek kalsiyum hidroksite dönüşmektedir (Ca(OH)_2). Bu ürün, sönmüş kireç olarak adlandırılmaktadır. Kirecin sönmesi için havada % 15 oranında nisbi nemin olması yeterlidir (Boynton, 1980; Oates, 1998).

Kirecin kalitesini etkileyen birçok etken bulunmaktadır. Kireç taşlarının, yumru büyüklüğü, gözenekliliği, gözeneklilik dağılımı gibi fiziksel özellikleri ve kalsiyum karbonat kristallerinin büyüklüğü sönmemiş kirecin reaktifliğine etki eden en temel etkenlerdir (McClellan ve Eades, 1970). Bu etkenlerin yanısıra su/kireç oranları, sönmemiş kirecin saflığı, parçacık büyüklüğü, sıcaklık, karıştırma, söndürmede kullanılan suyun saflığı da kirecin özelliklerini etkilemektedir.

Gözenekli, saf ve çok yüksek sıcaklıklarda kalsine edilmemiş kireç taşından elde edilen sönmemiş kireç, suyla daha çabuk reaksiyona girmektedir (Boynton, 1980). Öğütülmüş sönmemiş kireç de su ile daha hızlı bir şekilde sönmektedir (Boynton, 1980). Söndürülme işleminde kullanılan suyun saflığı da söndürülme işlemine etki etmektedir (Cowper, 1998; Hassibi, 1999). Eğer su içinde 500 mg/L sülfat veya sülfid iyonları varsa, bu su söndürülme işlemi için uygun değildir (Hassibi, 1999). Sülfid veya sülfat iyonları kirecin yüzeyini kaplayarak söndürülme işlemini geciktirmektedirler. Su içinde bulunan şeker ve klorür iyonları ise kirecin söndürülme işlemini hızlandırmaktadırlar. Deniz suyu, içerdiği klorür iyonlarından dolayı kirecin daha çabuk sönmesini sağlamakla birlikte tuzlanmaya yol açtığı için kullanılmazlar. Söndürülme işlemi sırasında yapılan karıştırma, söndürülme hızını artırarak daha yüksek oranlarda sönmüş kireç elde edilmesini sağlamaktadır (Boynton, 1980).

Söndürme işleminde kullanılan suyun sıcaklığı da elde edilen kirecin kalitesine etki etmektedir. Bu işlem, sıcaklık arttıkça hızlanmakta, ancak yüksek sıcaklık kirecin toplanmasına neden olmaktadır. Bu ise kirecin plastik olmasını engellemektedir (Cowper, 1998). Bundan kaçınmak için soğutma işlemini hızlı bir şekilde gerçekleştirmek gerekmektedir (Hedin, 1963).

Söndürülmüş kirecin uzun yıllar hava ile temas etmeden bekletildikten sonra kullanılması, Roma ve onu izleyen dönemlerden bu yana bilinmektedir. Roma döneminde kirecin en az üç yıl bekletildikten sonra kullanılması gerektiği ileri sürülmüştür (Peter, 1850). Kirecin bekletilme süreci uzadıkça, plastik özelliği ve su tutma kapasitesi artmaktadır (Cowper, 1998). Bu süreçte, kireç kristallerinin (portlandit) boyutları küçülmekte ve havanın karbondioksiti ile reaksiyona girecek yüzey alanı artarak karbonatlaşma daha hızlı gerçekleşmektedir (Rodriguez ve diğerleri, 1998).

Agregalar: Kireç harcı ve sıvalarının yapımında dolgu malzemesi olarak agregalar kullanılmaktadır. Agregalar, kireç ile reaksiyona

girmeyen (etkisiz) ve reaksiyona giren (puzolan) agregalar olarak sınıflandırılabilir (Lea, 1940). Etkisiz agregalar; taş ocağı, dere ve denizlerden elde edilen agregalardır. Puzolanik agregalar kireç ile reaksiyona girerek harç ve sıvaların nemli ortamlarda hattâ su altında da sertleşmesini sağlayan amorf silikatlar ve alüminatlardan oluşan agregalardır. Puzolanlar doğal ve yapay olarak iki grupta incelenebilir (Lea, 1940).

Doğal puzolanlar (tüf, tras, opal vb.) genelde volkanik küllerden oluşmaktadır (Lea, 1940). Tuğla, kiremit vb. pişirilmiş malzemeler ise yapay puzolan olarak birçok tarihi yapının harç ve sıvalarında kullanılmıştır (Buna ilişkin örnekler, "Horasan Harcı ve Sıvaları" başlığı altında verilecektir). Yapay puzolana bir başka örnek de, pirinç kabuğunun yakılması ile elde edilen küllerdir (James ve Rao, 1986).

Katkı Malzemeleri: Kireç harçlarının hazırlanmasında kirecin veya harcın fiziksel özelliklerini geliştirmek, karbonatlaşmayı hızlandırmak amacıyla kirece veya harca organik ve inorganik maddelerin katıldığı bilinmektedir. Bunlardan bazıları; kan, yumurta, peynir, gübre, arap zamkı, hayvan tutkalları, bitki suları, kazein gibi malzemelerdir (Sickels, 1981).

Katkı malzemelerinden arap zamkı, hayvan tutkalları ve incirin sütlü suyu yapışkan olarak kullanılmıştır. Çavdar hamuru, domuz yağı, kesik süt, kan ve yumurta beyazı kirecin daha çabuk sertleşmesini sağlamaktadır. Arpa, idrar ve hayvan tüyleri dayanıklılığı artırmaktadır. Şeker, suyun donma erime periyotlarında meydana getirdiği bozulmaları yavaşlatmaktadır. Balmumu, harçtaki büzülme önlemektedir. Yumurta akı, hayvan tutkalları, şeker, süt, mineral ve keten tohumu gibi yağlar ise kirecin plastik özelliğini artırıp kırılabilirliğini azaltarak, harcın çalışılabilirliğini artırmaktadırlar. Günümüz malzemelerinden polyamino-fenoller de kirecin karbonatlaşmasını hızlandırarak daha çabuk sertleşmesini sağlamaktadır (Medici ve diğerleri, 2000).

Kireç Harç ve Sıvaların Sertleşmesi: Harç ve sıvaların sertleşmesi, kirecin havada bulunan karbondioksit gazı ile karbonatlaşması sonucu gerçekleşmektedir. Karbonatlaşma, gaz-sıvı-katı reaksiyonu ile açıklanabilir (Morehead, 1986). Gaz halindeki karbondioksit (CO_2) kirecin yüzeyindeki veya gözeneklerindeki yoğunlaşmış su (H_2O) içinde çözünür. Bu çözünmede, hidrojen iyonu (H^+), bikarbonat (HCO_3^-) ve karbonat (CO_3^{2-}) iyonları oluşarak su asidik hale gelir. Oluşan asidik suda kireç ($Ca(OH)_2$) çözünerek kalsiyum (Ca^{+2}) iyonları oluşur. Ca^{+2} iyonları ile CO_3^{2-} iyonları ile birleşerek kalsiyum karbonatı ($CaCO_3$) oluşturur.

Kirecin karbonatlaşmasına etki eden birçok etken bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri su miktarı, karbondioksit gazının derişimi ve kirecin gaz geçirgenliğidir (Van Balen ve Van Gemert, 1994). Karbondioksit derişiminin artması ile karbonatlaşma art-

maktadır. Suyun yokluğunda veya aşırı miktarda varlığında karbonatlaşma çok yavaş olmaktadır. Ortam bağıl nemi de karbonatlaşmaya etki eden başka bir etkidir. Bağıl nem arttıkça karbonatlaşma artmaktadır (Swenson ve Sereda, 1968).

Karbonatlaşma kirecin dış yüzeyinden iç yüzeyine doğru olmaktadır. Bu nedenle, kireç harçlarının ve sıvalarının kalınlığı, kireç/ agrega oranları, agrega dağılımları, karıştırma ve bunların sonucunda oluşan gözenekli yapı karbonatlaşmaya etki etmektedir.

Tarihi Horasan Harcı ve Sıvaları

Kireç harçları hidrolik ve hidrolitik olmayanlar olarak iki grupta tanımlanmaktadır (Lea 1940). Hidrolik olmayanlar, kireç ile etkisiz agregaların karışımıyla elde edilmektedir. Bu harçlar; kirecin, havanın karbondioksiti ile kalsiyum karbonata dönüşmesi sonucu sertleşmektedir. Hidrolik harçlar ise hidrolik kireç kullanılarak veya saf kireç ile puzolanların karıştırılmasıyla elde edilmektedir (Lea, 1940). Hidrolik kireç kullanılarak elde edilen harçlar, kirecin kalsiyum karbonata dönüşmesi ve içinde bulundurduğu kalsiyum alüminat silikatların su ile kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum alüminat hidratları oluşturması sonucu sertleşmektedirler (Lea, 1940). Puzolan kullanılarak elde edilen hidrolik harçlarda ise kireç, puzolanlar ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat, kalsiyum alüminat hidrat, vb. ürünleri oluşturur (Lea, 1940). Hidrolik harçların mukavemetleri, oluşan bu ürünlerden dolayı hidrolik olmayanlardan daha büyüktür (Lea 1940; Akman ve diğerleri, 1986; Tunçoku, 2001).

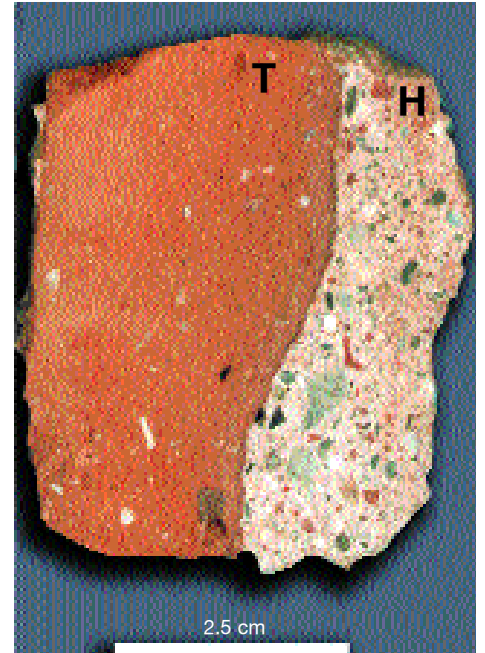
Kirecin puzolanlarla olan reaksiyonu için ortamda suyun bulunması gerekmektedir. Bu nedenle, hidrolik harçlar su altında da mukavemet kazanabilmektedir. Yüzey alanı büyük puzolan kullanımı (Shi ve Day, 2001), ortam sıcaklığının yüksek olması (Shi ve Day, 1993), karışıma alçı eklenmesi, bu harçların sertleşme sürecini hızlandırarak daha büyük basma dayanımlarına sahip olmalarını sağlamaktadır (Lea, 1940).

Tuğla, kiremit ve benzeri malzemeler, kireç ile karıştırılarak birçok tarihi yapının harç ve sıva malzemesinin hazırlanmasında kullanılmıştır. Bu harç ve sıvalar hidrolik olup ülkemizde, horasan harcı ve sıvaları olarak bilinmektedir. Bu harçlar Roma döneminde "Cocciopesto" (Massazza ve Pezzuoli, 1981), Hindistan'da "Surkhi" (Spence, 1974), Arap ülkelerinde "Homra" (Lea, 1940) olarak adlandırılmıştır.

Hidrolik özelliklerinden dolayı bu harç ve sıvalar Bizans, Roma, Selçuklu ve Osmanlı dönemi sarnıç, su kuyusu, su kemerleri ve hamam yapılarında kullanılmıştır (Akman ve diğerleri, 1986; Güleç ve Tulun, 1996; Böke ve diğerleri, 1999; Moropoulou ve diğerleri, 2000a; Moropoulou ve diğerleri, 2002a).



Şekil 1. Ördekli Hamamı sıcaklık mekânında kullanılan Horasan sıvanın dokusu.
Figure 1. The texture of the Horasan plaster used in the caldarium of Ördekli Hamam.



Şekil 2. Horasan harcının, tuğla ile yaptığı bağ (T: Tuğla, H: Harç).
Figure 2. The bond between Horasan mortar and brick (T: Brick, H: Mortar).

Tuğla, kiremit ve benzeri malzemelerin hammaddesi kil (kaolin, illit vb.), kuvars ve feldspat minerallerinin karışımından oluşmaktadır. Bu karışım 600-900 °C larda ısıtılırsa killer sıcaklık derecelerine ve sahip oldukları mineralojik yapıya bağlı olarak farklı puzolanlık derecelerine sahip olmaktadır (He ve diğerleri, 1995; Baronio ve Binda, 1997). Bu sıcaklıklarda kil minerallerinin yapıları bozulmakta ve amorf alümina silikatlar oluşmaktadır. Bu yapıdan dolayı kalsine edilen killer puzolan özelliğine sahip olmaktadır. Eğer kalsinasyon sıcaklıkları 900 °C in üzerinde olursa mullit, kristobalit vb. kararlı minerallerin oluşması sonucunda bu özellik kaybolmaktadır (Lee ve diğerleri, 1999). Tuğlaların hammaddelerinden olan kaolinin ısıtılması ile elde edilen puzolanik aktivite, montmorillonit ve illitden daha fazladır (Ambrose ve diğerleri, 1985). Feldspatlar ise mineralojik yapılarına bağlı olarak farklı puzolanik özellik göster-

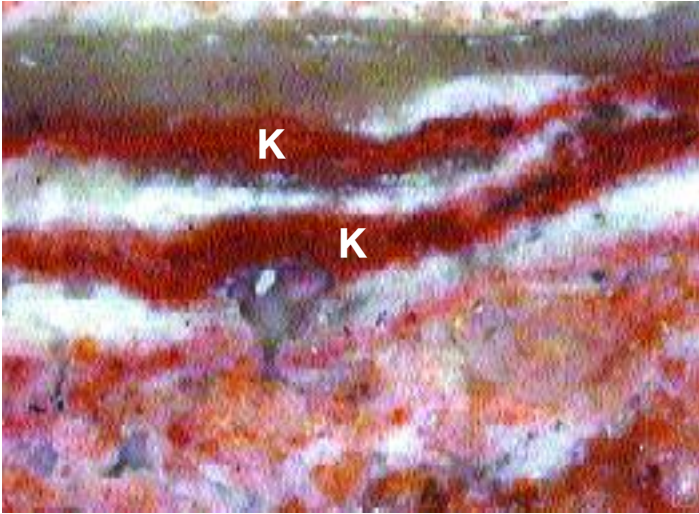
alümina hidratlarda bulunan su kaybindan ve 700-900 °C da kalsitte bulunan karbondioksit kaybindan meydana gelen ağırlık azalmalarının oranlarından, harçların hidrolik özellikleri hakkında bilgi edinilmektedir (Bakolas ve diğerleri, 1998; Moropoulou ve diğerleri, 2000b; Biscontin ve diğerleri, 2002).

Agrega olarak kullanılan tuğlaların yoğunlukları; kireç taşı, granit, bazalt vb. agregalardan daha düşüktür. Bu nedenle, horasan harçları daha hafif ve daha yüksek çekme dayanımına sahiptir. Ayasofya'nın kubbesinde kullanılan horasan harçları bu durumu örneklemektedir (Livingston, 1993; Moropoulou ve diğerleri, 2002a). Horasan harçlarının yanısıra kubbe kullanılan yapı tuğlaların da çok gözenekli ve düşük yoğunlukta olması (Moropoulou ve diğerleri, 2002b) kubbenin depreme daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır.

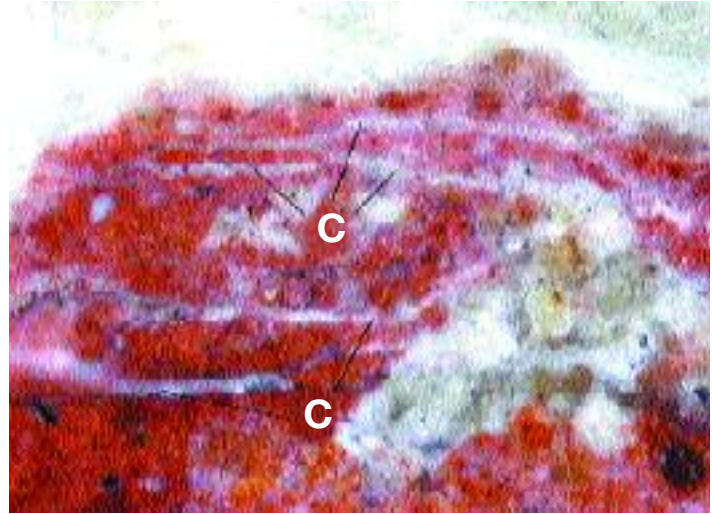
Ülkemizde horasan harçları ve sıvaları üzerine yapılmış çalışmalar sınırlı sayıdadır.

ların doğru seçilememesinden dolayı amacına ulaştığını söylemek güçtür.

Osmanlı döneminde horasan harcı hazırlamada kullanılacak tuğlaların yeni ve iyi pişirilmiş olması koşulu şartnamelerde belirtilmiştir (Denel, 1982; Akman ve diğerleri, 1986). Bize göre, buradaki iyi pişirme, tuğlaların hammaddesi olan killerin tamamının amorf hale dönüşümünün sağlanmasının gerekliliği ile açıklanabilir. En fazla amorf malzemenin elde edildiği sıcaklığın 550-600 °C da gerçekleştiği bilinmektedir (Moropoulou ve diğerleri, 2002a). Yeni pişirilmiş olması ise tuğlaların su ile temas etmeden kullanılarak reaktifliğini yitirmemesinin gerekliliği ile açıklanabilir. Çünkü, su ile aktif hale gelen amorf silikalar, silisik asit üreterek tuğlada olması muhtemel karbonatlarla reaksiyona girerek reaktifliklerini yitirmektedir (Lynch ve diğerleri, 2002). Bu koşulların eski şartnamelerde yer alması, horasan harcı ve sıvası hazırlan-



Şekil 3. Sıva tabakasından ayrılan katmanların (K) optik mikroskop görüntüsü. / Figure 3. View of the layers (K) dividing from the plaster as seen through an optical microscope.



Şekil 4. Sıva içindeki tuğlaların gözeneklerinde çökelen kalsit kristallerinin (C) optik mikroskop görüntüsü. / Figure 4. Calcite crystals precipitated in the pores of the brick in the plaster as seen through an optical microscope.

mektedir. Bunlar, kireç ile reaksiyona girerek tetrakalsiyum alümina hidratları oluşturmaktadır (Aardt ve Visser, 1977). Kuvars mineralleri ise puzolanik aktiviteye sahip değildir.

Horasan harçlarının özellikleri birçok tarihi yapıdan alınan örneklerde incelenmiştir. Bunlardan Rodos, Venedik ve Girit'teki bazı Bizans ve daha geç dönem yapıları ile İstanbul'da Ayasofya'da kullanılan horasan harçlarının, kireç/tuğla tozu oranlarının 1:4 ile 1:2 arasında değiştiği saptanmıştır (Livingston, 1993; Moropoulou ve diğerleri, 1995 ve 2000b; Güleç ve Tulun, 1996; Biscontin ve diğerleri, 2002). Bu harçların XRD analizlerinden bağlayıcı malzemenin, kirecin karbonatlaşması sonucu oluşan kalsit kristalleri ve tuğla tozu ile kirecin reaksiyonu sonucu oluşan kalsiyum, silikat ve alüminat hidratlardan oluştuğu gözlenmiştir (Moropoulou ve diğerleri, 1995 ve 1996). Bu örneklerin 200-600 °C da kalsiyum silika ve

Konu ile ilgili ilk çalışma, **Süheyl Akman** ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir (Akman ve diğerleri, 1986). Bu çalışmada, Bizans devrinden kalma bir sarnıçta kullanılan horasan harçlarının basma dayanım değerleri belirlenmiş ve onarım amaçlı horasan harçları üretilerek bunların basma dayanım özellikleri incelenmiştir. Bu çalışma, aynı zamanda horasan harçlarıyla ilgili eski yazılı kaynakları içermesi açısından da önemli bir çalışmadır. Horasan harcı ve sıvaları üzerine daha sonra yapılan çalışmalarda, bazı tarihi yapılardan toplanan örneklerin fiziksel özellikleri, kullanılan hammadde oranları belirlenmiş ve laboratuvar koşullarında horasan harcı üretilmiştir (Satongar, 1994; Güleç ve Tulun, 1996; Böke ve diğerleri, 1999). Onarım amaçlı horasan harcı hazırlamaya yönelik olan çalışmaların (Akman ve diğerleri, 1986; Satongar, 1994) kısa süreli olması ve kireç ile karıştırılan tuğla-

ması ile ilgili oluşan yılların deneyimini ve birikimini ifade etmektedir. Bu birikim, çimentonun yapı malzemesi olarak kullanılmaya başlanması ile birlikte yok olmuştur.

Ülkemizde yapılan çalışmalarda, horasan harcı ve sıvalarında kullanılan tuğla, kiremit vb. malzemelerin puzolanik özellikleri araştırılmamıştır. Yurtdışında ise konu ile ilgili çok az çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar, tarihi ve günümüz yapılarında kullanılan tuğlaların puzolanik özelliklerini belirlemeye yöneliktir (Baronio ve Binda, 1997; Wild ve diğerleri, 1997).

Bu çalışmalardan **Baronio** ve **Binda**'nın yaptıkları çalışmada (Baronio ve Binda, 1997), tarihi St. Lorenzo Kilisesi'nden (Milano) 600-900 °C aralarında pişirilmiş farklı tuğlalar toplanmış ve bunların puzolanik aktiviteleri incelenmiştir. Bu örneklerde puzolanik etki gözlenmemiştir. Bu sonuç, geçmişte tarihi yapılarda kullanılan ve düşük sıcaklıklarda pişiri-

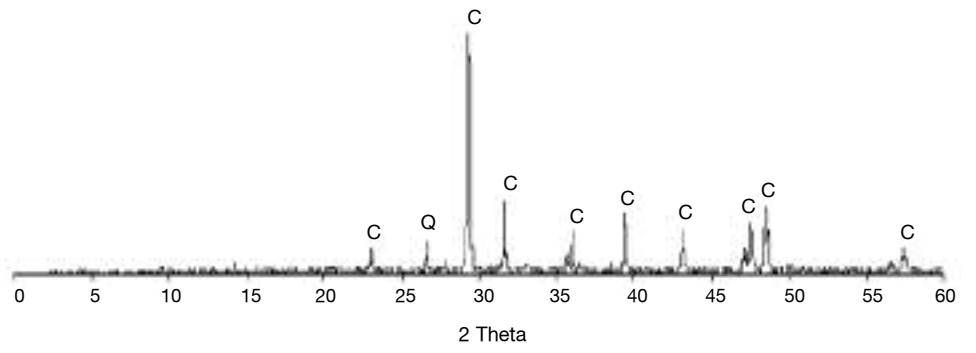
len bütün tuğlaların puzolanik özelliğe sahip oldukları görüşünü doğrulamamaktadır. Yine bu çalışmada kaolinitik kil ile yeni tuğla yapımında kullanılan karışımlar 650-750 °C aralarında ısıtıldıktan sonra puzolanik özellikleri incelenmiştir. Yeni tuğla yapımında kullanılan örneklerde puzolanik özellik görülmezken, kaolinitik kilde bu özellik gözlenmiştir. Bu gözlemlerin sonucunda, tuğlaların puzolanik özelliğe sahip olması için pişirilme sıcaklıklarının 900 °C altında olması gerektiği ve içinde puzolanik özelliği sağlayacak miktarlarda kil minerallerinin olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmadan çıkan sonuçların tersine Avrupa'nın çeşitli ülkelerinden alınan ve pişirilme sıcaklıkları 900 °C in üstünde olan tuğlalarda puzolanik özellik saptanmıştır (Wild ve diğerleri, 1997).

Bu sonuçlar, horasan harcı ve sıvası hazırlamada kullanılacak modern veya geleneksel yöntemlerle üretilen tuğlaların puzolanik olup olmadıklarının kontrol edilmesi gerektiğini göstermektedir. Harç ve sıva hazırlamada kullanılacak tuğlaların puzolanik özelliğe sahip olması gerekmektedir. Bu özellik, harç ve sıvaların hidrolik olmasını sağlayan en temel özelliktir. Ülkemizde yürütülen koruma çalışmalarında bu konu göz ardı edilmekte, günümüzde üretilen modern tuğla veya harman tuğlalarının horasan harcı ve sıvası yapımı için uygun olduğu sanılmaktadır.

Konuyla ilgili, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde TÜBİTAK tarafından desteklenen bir çalışma başlatılmıştır (Böke ve diğerleri, 2002). Bu çalışmada tarihi horasan harcı ve sıvalarında kullanılan tuğlaların puzolanik özellikleri araştırılarak, onarımlar için hazırlanacak yeni horasan harcı ve sıvalarında kullanılacak tuğla malzemelerin özellikleri belirlenecektir. Çalışma kapsamında, daha önce temel fiziksel özellikleri belirlenmiş (Böke ve diğerleri, 1999) üç tarihi hamam yapısından toplanan harç ve sıvalarda kullanılan tuğlalar incelenmektedir. Bu yapılar; 14. yüzyıl yapısından Bursa'da bulunan Ördekli Hamamı ile 15. yüzyıl yapılarından Edirne'de bulunan Saray ve Beylerbeyi Hamamlarıdır.

İncelenen horasan harcı ve sıvalarında kullanılan kireç ve tuğla kırıkları oranları 1/1 ve 1/2 arasında değişmektedir. Harçlarda kullanılan tuğla kırıklarının boyutlarının sıva katmanlarında kullanılanlardan daha büyük olduğu görülmüştür. Örneklerin dokuları incelendiğinde, kireç ile tuğla kırıklarının birbirine iyi bağlandıkları gözlenmektedir (Şekil 1). Bu, kireç ile tuğla kırıklarının çok iyi karıştırıldıklarını göstermektedir. Aynı şekilde horasan harçları ile yapıda kullanılan tuğlalar da birbirlerine iyi bir şekilde bağlanmıştır (Şekil 2).

Horasan harcı ve sıvaları hidrolik özelliklerinden dolayı suya karşı dayanıklıdır. Hamam yapılarındaki sıvalar, su ile doğrudan veya yüksek nemin duvarlarda yoğunlaşması sonucunda sürekli temas halindedir. Sıvanın ya-



Şekil 5. Horasan harçlarında gözlenen X-ışınları kırınım deseni (C: Kalsit, Q: Kuvars).
Figure 5. Pattern of x-ray diffraction in Horasan mortars (C: Calcite, Q: Quartz).

pısında bulunan kalkerleşmiş kireç (CaCO_3), gözenek suyunun içinde çözülmekte ve yeniden çökelmektedir. Bu süreçte, sıva tabakası bozulmaya uğrayarak tabakalara ayrışmasına karşın, çöken kalsiyum karbonat sayesinde kopmamaktadır. Şekil 3'te sıva yüzeylerinde tabakalara ayrılan ancak, çöken kalsiyum karbonatın tutmasıyla sıvanın yapısında kalan katmanlar görülmektedir. Bu durum sıvaların iç kısımlarında da gözlenmektedir. Yer yer, çözünen kalsiyum karbonat, harç içindeki tuğlaların gözeneklerinde yeniden çöküp, sıvaların dağılmasını önleyerek onları dayanıklı hale getirmektedir (Şekil 4). Bu gözlemler, horasan harcı ve sıvalarının ıslak mekânlar için kullanılabilir en uygun malzemeler olduğunu göstermektedir.

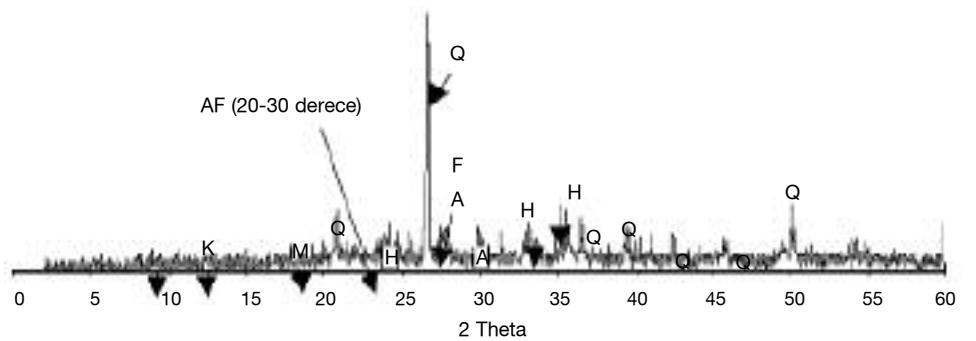
Harç ve sıvaların XRD ile yapılan mineralojik analizlerinden, kalsit ve kuvars mineralleri gözlenmiştir (Şekil 5). Kalsit, kirecin karbonatlaşması sonucu oluşan, kuvars ise kullanılan tuğlalarda var olan minerallerdir. Harç ve sıva içinde kullanılan tuğlaların XRD analizlerinde ise, kuvars, feldspatlar ve amorf fazlar gözlenmiştir (Şekil 6).

Tuğla kırıkları içinde bulunan amorf yapılar kireç ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidratları ve kalsiyum alüminat hidratları oluşturmaktadır. İncelenen örneklerde bu oluşumların saptanması (Şekil 7) kullanılan tuğla kırıklarının puzolanik özelliğe sahip ol-

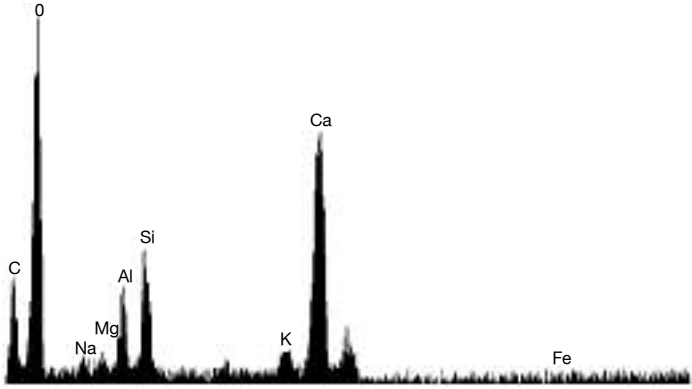
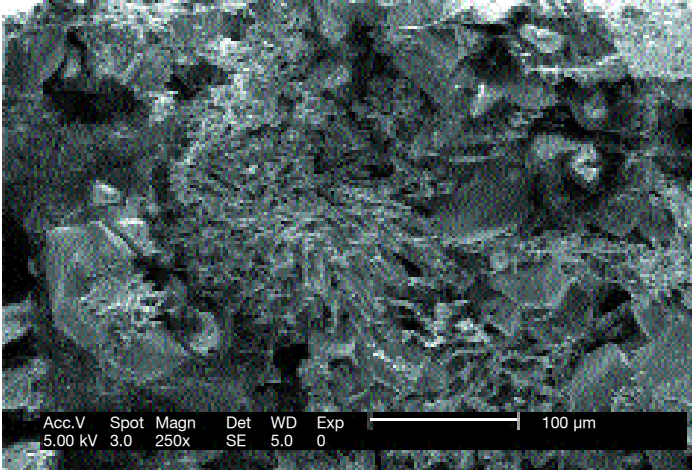
duğunu göstermektedir. Bu ürünler harcın basma dayanımını artırmaktadırlar.

Horasan harcı ve sıvaları içinde kullanılan tuğla kırıklarının ve tozlarının EDX ile yapılan kimyasal kompozisyon analizlerinden yüksek oranlarda silikat, alüminat ve daha az oranlarda demir ve alkaliler saptanmıştır. Bu kompozisyonların temel olarak alınması ve $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ faz diagramlarının kullanımıyla (Lewin ve diğerleri, 1956) tuğlaların camsı olma sıcaklığının 800-1000 °C arasında olduğunu söylemek mümkündür. Tuğla örneklerinin taramalı elektron mikroskop görüntülerinden ise camsı yapının oluşmadığı saptanmıştır (Şekil 8). Bu durum, tuğlaların düşük sıcaklıklarda pişirildiklerini göstermektedir. XRD analizlerinde yüksek sıcaklıkta oluşan mullit piklerinin görünmemesi sıcaklığın 900 °C yi geçmediğini göstermektedir.

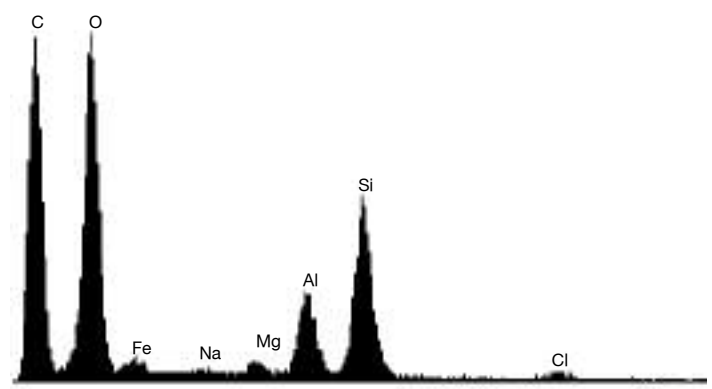
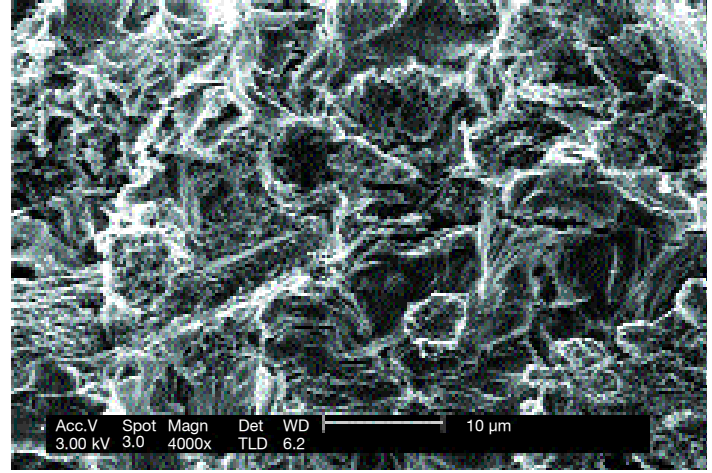
Çalışma sürecinde Saray Hamamı'ndan alınan bazı geç dönem horasan sıva örneklerinin daha fazla bozulmaya uğradıkları gözlenmiştir. Bu bozulmanın sıvalarda oluşan etringit kristallerinden (Şekil 9) kaynaklandığı saptanmıştır (Böke ve Akkurt, 2003). Etringit kristalleri, alçının varlığında yüksek sıcaklıklarda ve nemde tuğla içinde bulunan metakalin ile kirecin reaksiyonu sonucu oluşmaktadır. Bu gözlem, alçı katılan horasan sıvaların, hamam sıvası olarak kullanılmasının uygun olmadığını göstermektedir.



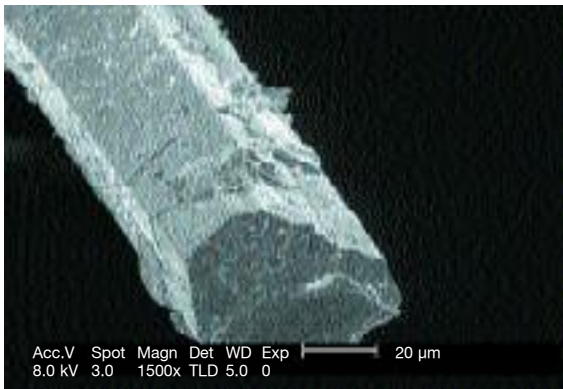
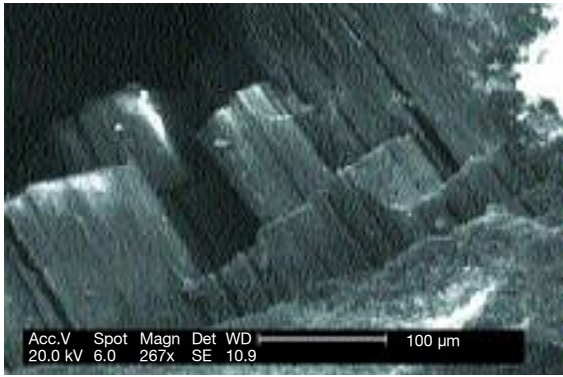
Şekil 6. Horasan harçlarında ve sıvalarında kullanılan tuğlalarda gözlenen X-ışınları kırınım deseni (Q: Kuvars, F: Feldspat, H: Hematit, I: Illite, K: Kaolinit, A: Albit, AF: Amorf faz).
Figure 6. Pattern of x-ray diffraction in the brick material in Horasan mortars and plasters (Q: Quartz, F: Feldspat, H: Hematite, I: Illite, K: Kaolinite, A: Albite, AF: Amorphous phase).



Şekil 7. Horasan harç ve sıvalarda gözlenen kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum alüminat hidrat kristallerinin elektron mikroskop görüntüsü ve bunların EDX ile yapılan kimyasal kompozisyon analizleri.
Figure 7. Crystals of calcium silicate hydrate and calcium aluminate hydrate seen in Horasan mortars and plasters through an electron microscope, and EDX analyses of their chemical composition.



Şekil 8. Harç içinde kullanılan tuğlanın elektron mikroskop görüntüsü ve kimyasal analiz spektrumu.
Figure 8. The brick particles in the mortar as seen through an electron microscope and their chemical spectrum.



Şekil 9. Horasan sıvaların bozulmasına yol açan etringit kristalleri.
Figure 9. Etringite crystals which cause Horasan plasters to deteriorate.

Şu ana kadar bulunan sonuçlar, konu ile ilgili olarak halen yürütülmekte olan araştırma projemiz (Böke ve diğerleri, 2002) kapsamında elde edilmiştir. Çalışma tamamlandığında, gerekli onarımlarda, yeni horasan harcı ve sıvalarının hazırlanmasında kullanılacak tuğlaların sahip olması gereken özellikler belirlenecektir.

Teşekkür: "Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılacak Horasan Harcı ve Sıvalarındaki Puzolanik Malzemelerin Özelliklerinin Araştırılması", başlıklı araştırma projemizi (İÇTAG-1674) destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Aardt, J.H.P.; Visser, S.; "Calcium Hydroxide Attack on Feldspars and Clays: Possible Relevance to Cement - Aggregate Reactions", Cement and Concrete Research, 7, s.643-648, 1977.
- Akman, M.S.; Güner, A.; Aksoy, İ.H.; "The History and Properties of Khorasan Mortar and Concrete", Turkish and Islamic Science and Technology in the 16th Century, Vol. I, s.101-112, I.T.U. Research Center of History of Science and Technology, İstanbul, 1986.
- Ambrose, J.; Murat, M.; Pera, J.; "Hydration Reaction and Hardening of Calcined Clays and Related Minerals", V. Extension of the Research and General Conclusions, Cement and Concrete Research, 15, s.261-268, 1985.
- Bakolas, A.; Biscontin, G.; Moropoulou, A.; Zendri, E.; "Characterization of Structural Byzantine Mortars by Thermogravimetric Analysis", Thermochimica Acta, 321, s.151-160, 1998.

- Baronia, G.; Binda, L.; "Study of the Pozzolanicity of Some Bricks and Clays", Construction and Building Materials, 11/1, s.41-46, 1997.
- Biscontin, G.; Birelli, M.P.; Zendri, E.; "Characterization of Binders Employed in the Manufacture of Venetian Historical Mortars", Journal of Cultural Heritage, 3, s.31-37, 2002.
- Boynton, R.S.; "Chemistry and Technology of Lime and Limestone", 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 1980.
- Böke, H.; Saltık, E.N.; Güçhan, N.Ş.; Özgönül, N.; "Osmanlı Dönemi Yapılarında Kullanılan Horasan Sıvaların Özelliklerinin Belirlenmesi", AFP projesi, 98.02.01.08, ODTÜ, 1999.
- Böke, H.; Akkurt S.; İpekoğlu B.; Uğurlu E.; "Tarihi Yapıların Onarımlarında Kullanılacak Horasan Harç ve Sıvalardaki Pozzolank Malzemelerin Özelliklerinin Araştırılması", TÜBİTAK Projesi, Kod: İÇTAG-İ674 (Proje sürüyor), 2002.
- Böke, H.; Akkurt, S.; "Ettringite Formation in Historic Bath Brick Lime Plasters", Cement and Concrete Research, 33/9, s.1457-1464, 2003.
- Cowper, A.; "Lime and Lime Mortars", Donhead Publishing Ltd, Dorset (first published in 1927 for the Building Research Station by HM Stationary Office, London), 1998.
- Denel, S.; "Batılılaşma Sürecinde İstanbul'da Tasarım ve Dış Mekanlarda Değişim ve Nedenleri", ODTÜ Yayını, Ankara, s.XL-XLIV, 1982 (Ebniye Beyannamesi, 28 Zilhicce 1264/1848).
- Güleç, A.; Tulun, T.; "Studies of Old Mortars and Plasters from the Roman, Byzantine and Ottoman period of Anatolia", Architectural Science Review, 39, s.3-13, 1996.
- Hansen, E.F.; Balen, K.V.; Elert, K.; Rodriguez-Navarro, C.; Simon, S.; "Preservation of Lime Mortars and Plasters", The GCI Project Bibliographies Series, The Getty Conservation Institute, 2003.
- Hassibi, M.; "An Overview of Lime Slaking and Factors that Affect the Process", presented to: 3rd International Sorbalit Symposium, November 3-5, New Orleans, LA, USA, 1999.
- He, C.; Bjarne, O.; Emil, M.; "Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation", Reactivity Assessments and Technological Effects, Cement and Concrete Research, 28/8, s.1691-1702, 1995.
- Hedin, R.; "Plasticity of Lime Mortars", Azbe Award No.3, National Lime Association Washington DC, 1963.
- James, J.; Rao, M.S.; "Reactivity of Rice Husk Ash", Cement and Concrete Research, 16, s.296-302, 1986.
- Lea, F.M.; "Investigations on Pozzolanas", Building Research, Technical Paper No.27, s.1-63, 1940.
- Lee, S.; Youn, J.K.; Moon, H.S.; "Phase Transformation Sequence from Kaolinite to Mullite Investigated by an Energy-Filtering Transmission Electron Microscope", Journal of American Ceramic Society, 82, (10) 5, s.2841-2848, 1999.
- Lewin, E.M.; McMurdie, H.F.; Hall, F.P.; "Phase Diagrams for Ceramists", American Ceramic Society, Columbus, 1956.
- Livingston, R.; "Materials Analysis of the Masonry of the Hagia Sophia Basilica", Structural Repair and Maintenance of Historic Buildings, II, s.15-32. (ed. C.A. Brebbia, R.J.B Frewer), Computational Mechanics Publications, Southampton, U.K., 1993.
- Lynch, G.; Watt, D.; Colston, B.; "The Conservation and Repair of Historic Decorative Brickwork", Proceedings of the RICS Foundation Construction and Building Research Conference, Nottingham Trent University, 5-6 September 2002.
- Massazza, F.; Pezzuoli, M.; "Some Teachings of a Roman Concrete Mortars, Cement and Grouts Used in the Conservation of Historic Buildings", Proceedings of Symposium in Rome, s. 219-245, 1981.
- McClellan, G.H.; Eades, J.L.; "The Texture Evolution of Limestone Calcines", ASTM Special Technical Publication 472, American Society for Testing and Materials, s.209-227, Philadelphia, 1970.
- Medici, F.; Piga, L.; Rinaldi, G.; "Behaviour of Polyaminophenolic Additives in the Granulation of Lime and Fly-Ash", Waste Management, 20, s.491-498, 2000.
- Moorehead, D.R.; "Cementation by the Carbonation of Hydrated Lime", Cement and Concrete Research, 16, s.700-708, 1986.
- Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Bisbikou, K.; "Characterization of Ancient, Byzantine and Later Historic Mortars by Thermal and X-ray Diffraction Techniques", Thermochimica Acta, 269/270, s.779-795, 1995.
- Moropoulou, A.; Tsiourva, Th.; Bisbikou, K.; Biscontin, G.; Bakolas, A.; Zendri, E.; "Hot Lime Technology Imparting High Strength to Historic Mortars", Construction and Building Materials, 10/2, s.151-159, 1996.
- Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Bisbikou, K.; "Investigation of the Technology of Historic Mortars", Journal of Cultural Heritage, 1, s.45-58, 2000a.
- Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Bisbikou, K.; "Physico-chemical and Cohesion Bonds in Joint Mortars Imparting Durability to the Historic Structures", Construction and Building Materials, 14, s.35-46, 2000b.
- Moropoulou, A.; Cakmak, A.; Biscontin, G.; Bakolas, A.; Zendri, E.; "Advanced Byzantine Cement Based Composites Resisting Earthquake Stresses: The Crushed Brick-Lime Mortars of Justinian's Hagia Sophia", Construction and Building Materials, 16, s.543-552, 2002a.
- Moropoulou, A.; Cakmak, A.; Polikreti, K.; "Provenance and Technology Investigation of Hagia Sophia Bricks, Istanbul, Turkey", Journal of American Ceramic Society, 85(2), s.366-372, 2002b.
- Oates, J.H.; "Lime and Limestone Chemistry and Technology", Production and Uses, Wiley-VCH Publishers, Weinheim, 1998.
- Peter, N.; "Encyclopedia of Architecture", 2 Vol., Fry & Co., New York, 1850.
- Rodriguez-Navarro, C.; Hansen, E.; Ginell, W.S.; "Calcium Hydroxide Crystal Evolution upon Ageing of Lime Putty", Journal of the American Ceramic Society, 81, s.3032-3034, 1998.
- Satongar, L.Ş.; "İstanbul Şehir Surları Horasan Harçları Üzerine Bir Araştırma", yayınlanmamış yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1994.
- Shi, C.; Day, L.R.; "Acceleration of Strength Gain of Lime - Pozzolan Cements by Thermal Activation", Cement and Concrete Research, 23, s.824-832, 1993.
- Shi, C.; Day, L.R.; "Comparison of Different Methods for Enhancing Reactivity of Pozzolans", Cement and Concrete Research, 31, s.813-818, 2001.
- Sickels, L.B.; "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, s.25-52, 1981.
- Spence, R.; "Lime and Surkhi Manufacture in India", Appropriate Technology, 1 (4), s.6-8, 1974.
- Swenson, E.G.; Sereda, P.J.; "Mechanism of the Carbonation Shrinkage of Lime and Hydrated Cement", Journal of Applied Chemistry, 18, s.111-117, 1968.
- Tuğçoku, S.S.; "Characterization of Masonary Mortars Used in Some Anatolian Seljuk Monuments in Konya, Beyşehir and Akşehir", yayınlanmamış doktora tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2001.
- Van Balen, K.; Van Gemert, D.; "Modelling Lime Mortar Carbonation", Materials and Structures, 27, s.393-398, 1994.
- Wild, S.; Gailius, A.; Hansen, H.; Pederson, L.; Szwabowski, J.; "Pozzolanic Properties of a Variety of European Clay Bricks", Building Research and Information, 25/3, s.170-175, 1997.

The Characteristics of Brick Powder Mortars and Plasters Used in Historic Buildings

Mortars and plasters containing lime have been used since the time of the ancient Greeks, ancient Romans and their successors, until the discovery of cement. Lime mortar and plasters consist of a combination of lime as a binder and aggregates used as fill material. Organic and inorganic substances are added to the lime in order to enhance the properties of the lime or mortar. Lime mortars fall into two categories, hydraulic and non-hydraulic. Non-hydraulic mortars consist of lime mixed with inactive aggregates. Such mortars harden as a result of the lime combining with carbon dioxide in the air to form calcium carbonate. Hydraulic mortars are obtained by mixing hydraulic lime or pure lime with pozzolans.

Mixing brick or tile dust, and similar materials with lime produced mortars and plasters were used in many historical buildings. Mortars and plasters of this type are hydraulic, and known in Turkey as 'horasan.' Due to their hydraulic properties, these mortars and plasters were used for the construction of cisterns, wells, aqueducts and baths during the Byzantine, Roman, Seljuk and Ottoman periods.

A study has now been launched at İzmir Institute of High Technology with the support of the Turkish Institute of Scientific and Technological Research. In this study the pozzolanic attributes of the brick used in historical 'horasan' mortar and plasters is being researched to determine the characteristics of the brick; the object being to make new horasan mortar and plasters to be used in the renovation of historic buildings. Samples of mortar and plaster from three historic baths are being used in the study. These are the 14th century Ördekli Hamam in Bursa, and the 15th century Saray and Beylerbeyi baths in Edirne.

The results obtained from analysis of the samples so far include the following:

- When the textures of the samples are examined, it is seen that the lime and pulverised brick are extremely well bonded.
- Due to the hydraulic properties of horasan mortar and plasters, they are the most appropriate materials for wet spaces.
- It has been found that the brick dust is pozzolanic, and that this ingredient increases the mortar's durability under pressure.
- The addition of plaster to horasan renders it unsuitable for use in bath buildings.