

# Horasan Harcı Karışımında Yumurta Kabuğunun Kullanılması

## The Use of Eggshell in Khorasan Mortar Mixture

İsmail Kılıç<sup>1\*</sup> , Saadet Gökçe Gök<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırklareli, Türkiye

### Öz

Tarihi bir harç türü olan Horasan harcı, kireç, tuğla veya kiremit kırığı, kum, su ve katkı maddesi gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Bu harç türü, tarihi eserlerimizde yaygınca kullanılmıştır, günümüzde ise daha çok restorasyon çalışmalarında kullanılmaktadır. Bu nedenle, Horasan harcının geliştirilmesi yararlı olacaktır.

Yapılan çalışmada, atık durumunda olan yumurta kabukları Horasan harcı üretiminde değerlendirilmiştir. Yumurta kabukları ezilerek öğütülmüş ve 1 mm kare gözlü elekte elenmiştir. Elekten geçen 0-1 mm aralığındaki kısım, harç üretiminde kullanılmıştır. Yumurta kabuğu, karışımlara kireç ağırlığının %0, %4, %8, %12 ve %16'sı oranlarında ilave edilmiştir. Bir tanesi şahit harç olmak üzere 5 farklı karışımdan toplam 15 adet Horasan harcı örneği üretilmiştir. Harç örnekleri üzerinde yayılma çapları ölçülmüş, su emme, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. En yüksek dayanım artışları, %16 yumurta kabuğu kullanılan harç örneklerinde, eğilme dayanımı 2.255MPa ve basınç dayanımı 7.736MPa olarak tespit edilmiştir. Horasan harcında yumurta kabuğunun kullanılması sonucu, ikame oranı ile yayılma azalmış ancak eğilme ve basınç dayanımlarında ikame oranı artışı ile birlikte %73'e varan dayanım artışı gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Horasan Harcı, Yumurta Kabuğu, Sürdürülebilirlik, Restorasyon, Tarihi Harç

### Abstract

Khorasan mortar, a type of historical mortar, consists of components such as lime, brick or tile fragments, sand, water, and admixtures. This type of mortar has been widely used in our historical monuments and is now more commonly used in restoration works. Therefore, the improvement of Khorasan mortar would be beneficial.

In this study, waste eggshells were evaluated for use in the production of Khorasan mortar. The eggshells were crushed, ground, and sieved through a 1 mm square mesh sieve. The fraction passing through the sieve, ranging from 0-1 mm, was used in mortar production. Eggshell was added to the mixtures at ratios of 0%, 4%, 8%, 12%, and 16% of the lime weight. 15 Khorasan mortar specimens were produced for 5 different mixtures, one of which was a control mortar. Spread diameters of fresh mortars were measured, and water absorption, ultrasonic pulse velocity, flexural strength, and compressive strength tests were performed on the mortar specimens. The highest increases in strength were observed in mortar samples containing 16% eggshells, with flexural strength reaching 2,255 MPa and compressive strength reaching 7,736 MPa. The use of eggshells in Khorasan mortar resulted in a decrease in spread with increasing substitution ratio, but an increase in flexural and compressive strength of up to 73% was observed with increasing substitution ratio.

**Keywords:** Khorasan Mortar, Eggshell, Sustainability, Restoration, Historic Mortar

## 1. Giriş

Günümüzde, doğal ve tarihi çevrenin korunması ve korumada gösterilen başarı, ülkelere kültürel zenginlik alanında güç ve prestij kazandırmaktadır. Bu nedenle, son yıllarda tarihi yapıların restorasyonuna yönelik çalışmalara verilen önem artmıştır. Restorasyon öncesi, tarihi yapılardan alınan harçlar üzerinde yapılan analiz çalışmaları ile bu malzemelerin özellikleri belirlenmektedir. Bu çalışmalar, restorasyon aşamasında malzemelerin özgünlüğünün korunmasına büyük katkı sağlamaktadır.

Harçlar, yapı malzemelerinin birbirleriyle olan bağlantısını sağlamaktadır [1]. Bileşenleri bağlayıcı ve agrega bileşiminden oluşan harçlar, gerekli olması durumunda katkı maddeleri içerebilmektedir. Hacimce veya ağırlıkça belirlenen oranlarda, kum ve bağlayıcı malzemelerin karıştırılmasıyla hazırlanmakta, hidrasyon ve işlenebilme için belirli miktarda su ilave edilmektedir. Bağlayıcı türüne göre bu karışımlar, alçı, kireç, çimento ve melez harçlar olarak isimlendirilmektedir [1-6].

Kireç harcı, Mısır, Mezopotamya, Anadolu, Çin ve Roma'da kullanılmıştır. Roma döneminde genellikle kireç veya alçı-kireç bağlayıcılı harçlar tercih edilmiştir. Puzolanik malzeme olarak kireç harçlarında tuğla kırığı, tuğla tozu ve volkanik kül benzeri malzemeler kullanılmıştır. Bu malzemelerden üretilen harçlar, Roma harcı olarak da bilinmektedir [7].

Bağlayıcı olarak kil, tarihte kullanılan ilk harç malzemesi olarak Mezolitik çağda kullanılmıştır. Daha sonra Roma'da kireç, Mısır'da alçı ve puzolanik özelliği olan malzemeler kullanılmaya başlanmıştır [1]. Geçmiş dönemlerde kireç, kiremit, tuğla benzeri malzemelerin toz ve kırıkları ile karıştırılarak harçlar üretilmiştir. Bu harçlar, hidrolik özellikte olup Anadolu'da "Horasan", Roma'da "Cocciopesto", Arap ülkelerinde "Homra", Hindistan'da "Surkhi" adlarıyla bilinmektedir [7].

Dünyada nüfusun hızla artması ve enerji kaynaklarının tüketilmesi sonucunda meydana gelen atık sorunu, insanları yeni arayışlara zorlamıştır. Hammadde kaynağı olarak atıkları değerlendirmek önem kazanmış, ülkeleri çevre ve enerjiyi etkin kullanmaya yönlendirmiştir. Bu atık malzemelerden biriside, yüksek oranda kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) içeren, kireçtaşı formunda olan yumurta kabuklarıdır. Kalsiyum açısından zengin olan yumurta kabuğu, kireçtaşı ile benzer yapıya sahiptir. Yumurta kabuğunun %93-97'si kalsiyum karbonattan oluşmaktadır. Ev, lokanta ve tesislerden çıkan yumurta kabuklarının yeniden kullanılması atığın değerlendirilmesi açısından önem kazanmıştır [8- 12].

TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu) 2024 yılı Ekim ayı verilerine göre, 1.88 milyar adet yumurta bir aylık üretim olarak gerçekleşmiştir [13]. TÜİK Mart 2017 verilerine göre, Türkiye'de üretilen yumurta kabuklarının yaklaşık 100 bin tonu çöpe atık olarak gitmektedir [14]. Dünyada ve Türkiye'de atık olarak bulunan yumurta kabuğu miktarının büyüklüğü ve bu miktarın devamlı artması, yumurta kabuklarının değerlendirilmesini oldukça önemli hale getirmiştir.

Yumurta kabuğu, kütikula, kalsiyum tabakası ve çift katlı kabuk altı zarından oluşmaktadır. Kabuk, yumurta ağırlığının %10-12'sini oluşturur. Yumurta kabuğunun özgül ağırlığı  $2.325 \text{ gr/cm}^3$ , kırılma dayanımı  $> 30 \text{ N}$ 'dur. Yumurta kabuğu, 0.3-0.4 mm kalınlığındadır. Kabuk üzerinde yaklaşık 8000 mikroskopik por (gözenek) vardır. Yumurtanın kabuğu, %85-95 kalsiyum karbonat, %1-1.4 magnezyum karbonat, %0.76-1 kalsiyum fosfat ve %3.3-4 organik maddelerden oluşmaktadır. Bir adet yumurta kabuğu yaklaşık  $2.07 \pm 0.18 \text{ g}$  kalsiyum içerir [14-18].

Yüksek oranda kalsiyum karbonat içeren yumurta kabuğu, inşaat sektöründe kendine yer bulmaktadır [7,12,19,20]. Yumurta kabuğu tozu katkılı kompozitlerin özelliklerinin incelendiği çalışmalar mevcuttur [20]. Genellikle, harç özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla organik katkıların kullanılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır [21-25]. Organik katkıların karışım içindeki oranı az olmasına rağmen harcın mukavemeti ve dayanımı açısından önemli etkileri vardır [7]. Bununla birlikte, Horasan harçlarında, karışımda kullanılan bağlayıcı oranı ve kireç miktarı da dayanım değerleri üzerinde etkilidir [26].

Yapılan çalışmada, yumurta kabuğunun yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ezilerek öğütülmüş yumurta kabuğu, Horasan harcı üretiminde ilave olarak karışıma katıldığında, bu malzemenin harcın özellikleri üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Yumurta ve yumurta kabuğu ile akademik çalışmalar mevcut olmasına rağmen bu çalışma horasan harcında yumurta kabuğunun kullanıldığı özgün bir çalışmadır. Bu yönüyle literatüre katkı sağlayacaktır.

## 2. Materyal ve Metot

Deneylerde kullanılan Horasan harç örnekleri, TS EN 1015-11 [27] standardına göre üretilmiştir. Üretilen harcın kıvamı, yayılma tablası yöntemi ile TS EN 1015-3 [28] standardına uygun yapılmıştır. Harcın karışım oranları ağırlıkça bir kısım su, bir kısım kireç ve 3 kısım kum+tuğla kırığından oluşmaktadır. Hazırlanan harç karışımları 40×40×160 mm boyutlarındaki prizmatik kalıplara yerleştirilmiştir. Harç örnekleri iki gün sonra kalıplardan çıkarılmıştır. 28 gün sonra 40×40×160 mm boyutundaki örnekler sırasıyla ultrases geçiş hızı, üç noktalı eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Harç örnekleri üzerinde eğilme ve basınç dayanımı deneyleri TS EN 1015-11 [27], ultrases geçiş hızı deneyi ise ASTM C597-16'ya [29] göre yapılmıştır. Pundit PL200 marka ultrasonik test cihazı kullanılarak numunelerde ultrases geçiş hızı tespit edilmiştir.

Horasan harcı karışımlarında 0–4 mm aralığındaki boyutlarda tuğla kırığı, doğal kum, hidrolik kireç, şehir şebeke suyu ve 0–1 mm aralığındaki boyutlarda yumurta kabuğu kullanılmıştır (Şekil 1). Bağlayıcı olarak doğal hidrolik kireç (Teknorep 550) kullanılmıştır. Kullanılan hidrolik kirecin teknik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Horasan harcı üretiminde kullanılan kireç, kum, tuğla kırığı ve yumurta kabuğu

Çizelge 1. Hidrolik kirecin teknik özellikleri [30]

Teknik Özellikler	
Eğilme Dayanımı	En az 1.0 N/mm <sup>2</sup>
Basınç Dayanımı	En az 4.0 N/mm <sup>2</sup>
Yoğunluk	1.65 ± 0.1 kg/L
Uygulama Sıcaklığı	(+5 °C) - (+35 °C)
Yangına Tepki	A1 Sınıfı

Harman tuğlası, 0–4 mm aralığında çeneli kırıcıda kırılmıştır. Elde edilen tuğla kırıklarının elek analizi sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir. Tuğla kırıklarının özgül ağırlığı 2.79 ve gevşek birim hacim ağırlığı 1.21 g/cm<sup>3</sup> olarak tespit edilmiştir. Yumurta kabukları önce etüvde 105 °C sıcaklıkta 24 saat kurutulmuş, daha sonra 10 cm kalınlığında ve 30 cm çapında olan dairesel demir silindir ile ezilmiştir. Ezilen yumurta kabukları, 1 mm'lik kare gözlü elekte elenmiş ve elekten geçen 0–1 mm aralığında kalan yumurta kabuğu kırıkları Horasan harcı karışımında kullanılmıştır (Şekil 2). Yumurta kabuğu kırıklarının elek analizi Çizelge 3'te verilmiştir.



Şekil 2. (a) Atık durumunda ve (b) 0-1 mm aralığına getirilmiş yumurta kabuğu görüntüleri

Yumurta kabuğu, kireç ağırlığının yüzdesi miktarında ilave olarak karışıma eklenmiştir. Şahit harc üretiminde yumurta kabuğu kullanılmamıştır. Yumurta kabuğu, kullanıldığı karışımlarda kireç ağırlığının %4, %8, %12 ve %16 oranlarında ve sırasıyla 18 g, 36 g, 48 g ve 64 g ağırlıklarında karışımlara ilave edilmiştir. Karışım kodları yumurta kabuklarının karışımda kullanılma yüzdesine göre YK0, YK4, YK8, YK12 ve YK16 olarak verilmiştir.

Çizelge 2. Tuğla kırığının elek analizi

Elek No (mm)	Elekten Geçen (%)
4	100
2	54.15
1	35.22
0.5	23.47
0.25	9.15
0.125	0.68
0.075	0.03

Yumurta kabuğunun elek analizi Çizelge 3'te, Horasan harcı örneklerinin kodları ve ağırlıkça karışım miktarları Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 3. Yumurta kabuğunun elek analizi

Elek No (mm)	Elekten Geçen (%)
1	100
0.5	72.56
0.25	24.12
0.125	5.46
0.075	2.34

Çizelge 4. Horasan harcı örneklerinin ağırlıkça karışım miktarları

Karışım kodu	Ağırlıkça karışım miktarları (g)				
	Su	Kireç	Kum	Tuğla kırığı	Yumurta kabuğu
YK0	400	400	300	900	0
YK4	400	400	300	900	16
YK8	400	400	300	900	32
YK12	400	400	300	900	48
YK16	400	400	300	900	64

Yapılan çalışmada, her bir karışımdan 3 adet olmak üzere toplamda 15 adet Horasan harç örneği üretilmiştir. Ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve su emme deneylerinde her bir karışım türü için 3 adet horasan harcı örneğinden yararlanılmıştır. Ultrases geçiş hızı ölçümünde kullanılan örnekler eğilme dayanımı deneyinde de kullanılmıştır. Eğilme dayanımı deneyinde kırılarak ikiye ayrılan harç örneklerinin yarısı basınç dayanımı deneyinde diğer yarısı su emme deneyinde kullanılmıştır. Harçların üretimi, harç mikseri kullanılarak yapılmıştır. Üretilen harçların kıvamı yayılma tablası yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Kıvam deneyinden sonra taze harç 40×40×160 mm boyutlarında olan prizmatik üçlü kalıba doldurulmuştur (Şekil 3). Kalıba doldurulan harç, sarsma tablası üzerine konulmuştur. Harcın kalıba yerleşmesi için sarsma tablasında 25 kez düşüş yaptırılmıştır. Kalıptan çıkarılan harç örnekleri 28 günlük yaşa gelinceye kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Su emme yüzdesini belirlemek için harç örnekleri önce 2 gün suda bekletilmiş daha sonra etüvde 105 °C sıcaklıkta değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur.



Şekil 3. (a) Kalıplara doldurulmuş Horasan harç örnekleri ve (b) eğilme dayanımı deney görüntüsü

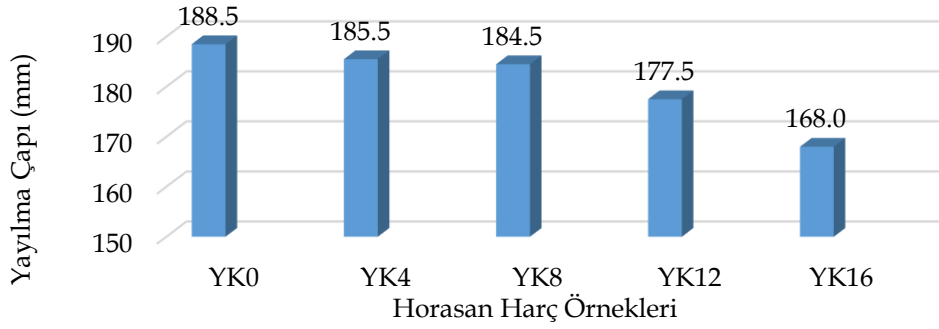
### 3. Bulgular ve Tartışma

Horasan harcı örneklerinin yayılma çapları Çizelge 5 ve Şekil 4'de, su emme yüzdeleri Çizelge 6 ve Şekil 5'te, ultrases geçiş hızı değerleri Çizelge 7 ve Şekil 6'da, eğilme ve basınç dayanımı değerleri Çizelge 8, Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir.

Şekil 4 incelendiğinde, Horasan harcı karışımlarında yumurta kabuğu yüzdesinin artması sonucunda harç örneklerinin yayılma çapı değerlerinin YK0 kodlu şahit harca kıyasla düştüğü tespit edilmiştir. Yayılma çapındaki bu düşüşün, yumurta kabuklarının harçlara ilave olarak katılması nedeniyle karışımdaki su/agrega oranının azalması ve ince madde içeriğinin artması sonucunda karışımın kıvamını azaltmasından kaynaklandığı kanaatine varılmıştır. En fazla düşüş, %16 yumurta kabuğu kullanılan YK16 kodlu karışım örneklerinde %10.8 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 5. Horasan harcı örneklerinin yayılma çapları

Horasan Harç Örnekleri	Ölçülen Yayılma Çapları (mm)				Ortalama Yayılma Çapı (mm)
YK0	190	188	184	192	188.5
YK4	182	188	189	183	185.5
YK8	184	180	187	187	184.5
YK12	177	176	178	179	177.5
YK16	168	170	169	165	168.0

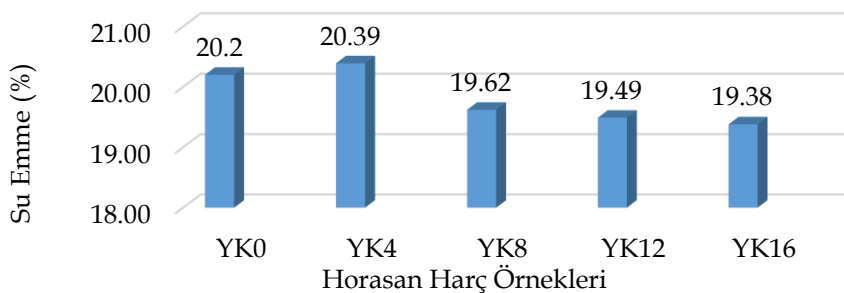


Şekil 4. Taze haldeki Horasan harcı örneklerinin yayılma çapları

Çizelge 6. Horasan harcı örneklerinin su emme yüzdeleri

Horasan Harç Örnekleri	Suya doygun ağırlık (g)	Etüv kurusu ağırlık (g)	Su emme (g)	Su emme (%)	Standart sapma	Ortalama su emme (%)
YK0 <sub>1</sub>	514.5	428.0	86.5	20.21		
YK0 <sub>2</sub>	517.5	430.5	87.0	20.21	0.01	20.20
YK0 <sub>3</sub>	515.0	428.5	86.5	20.18		
YK4 <sub>1</sub>	510.0	423.5	86.5	20.42		
YK4 <sub>2</sub>	515.5	428.0	87.5	20.44	0.05	20.39
YK4 <sub>3</sub>	512.0	425.5	86.5	20.33		
YK8 <sub>1</sub>	516.5	431.5	85.0	19.69		
YK8 <sub>2</sub>	518.0	432.5	85.5	19.77	0.19	19.62
YK8 <sub>3</sub>	520.0	435.5	84.5	19.40		
YK12 <sub>1</sub>	517.0	433.0	84.0	19.39		
YK12 <sub>2</sub>	518.0	433.0	85.0	19.63	0.14	19.46
YK12 <sub>3</sub>	517.5	433.5	84.0	19.38		
YK16 <sub>1</sub>	519.5	435.0	84.5	19.42		
YK16 <sub>2</sub>	516.0	431.5	84.5	19.58	0.21	19.38
YK16 <sub>3</sub>	519.5	436.0	83.5	19.15		

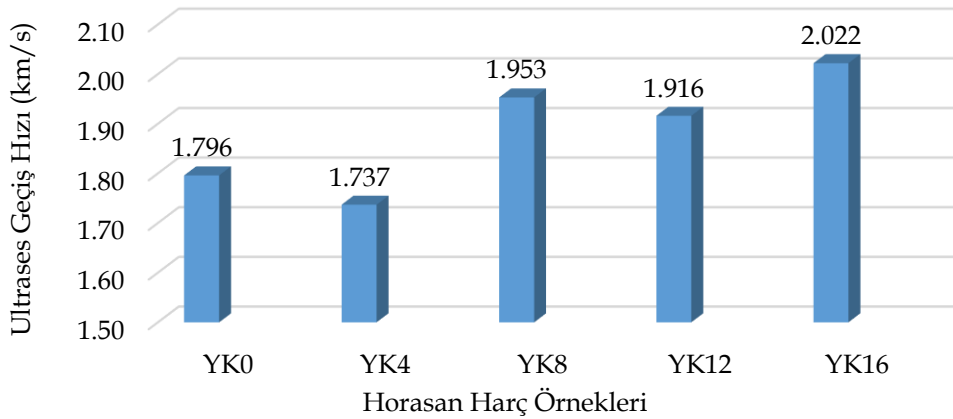
Harç karışımlarının Şekil 5'teki su emme yüzdeleri dikkate alındığında, yumurta kabuğu kullanımıyla birlikte su emme değerlerinde genelde bir azalma olduğu görülmektedir. YK8 kodlu örnekte %2.87, YK12 kodlu örnekte %3.51 ve YK16 kodlu örnekte ise %4.06 oranlarında bir azalma olduğu Şekil 5'te görülmektedir. Buna karşın, sadece YK4 kodlu %4 yumurta kabuğu kullanılan karışımın su emme değerinde az da olsa şahit harca göre %0.94 oranında bir artış olduğu belirlenmiştir. Bu artış, yumurta kabuğu granülometrisinin her karışım için aynı olmama durumundan kaynaklanmış olabilir. Tartım yapılırken, iri boyutlu tanelerin farkında olmadan daha fazla konulması veya tane boyutundaki farklılıklar sonucunda değerlerde sapma meydana gelmiştir. YK kodlu örneklerin su emme yüzdelerinin de diğer örneklerle birlikte azalma göstermesi gerektiği düşünülmektedir. Su emme yüzdelerindeki bu azalma, ezilerek öğütülmüş toz halindeki yumurta kabuklarının harcın içerisindeki boşlukları doldurarak daha kompakt bir karışım meydana getirmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5. Horasan harcı örneklerinin su emme yüzdeleri

**Çizelge 7.** Horasan harcı örneklerinin ultrases geçiş hızı değerleri

Horasan Harç Örnekleri	Ultrases geçiş süresi ( $\mu$ s)	Standart sapma	Ortalama ultrases geçiş süresi ( $\mu$ s)	Ortalama ultrases geçiş hızı (km/s)
YK0 <sub>1</sub>	89.7			
YK0 <sub>2</sub>	88.8	0.49	89.1	1.796
YK0 <sub>3</sub>	88.9			
YK4 <sub>1</sub>	93.5			
YK4 <sub>2</sub>	91.2	1.25	92.1	1.737
YK4 <sub>3</sub>	91.5			
YK8 <sub>1</sub>	82.2			
YK8 <sub>2</sub>	81.9	0.35	81.9	1.953
YK8 <sub>3</sub>	81.5			
YK12 <sub>1</sub>	83.1			
YK12 <sub>2</sub>	84.0	0.45	83.5	1.916
YK12 <sub>3</sub>	83.4			
YK16 <sub>1</sub>	78.9			
YK16 <sub>2</sub>	80.1	0.91	79.1	2.022
YK16 <sub>3</sub>	78.3			

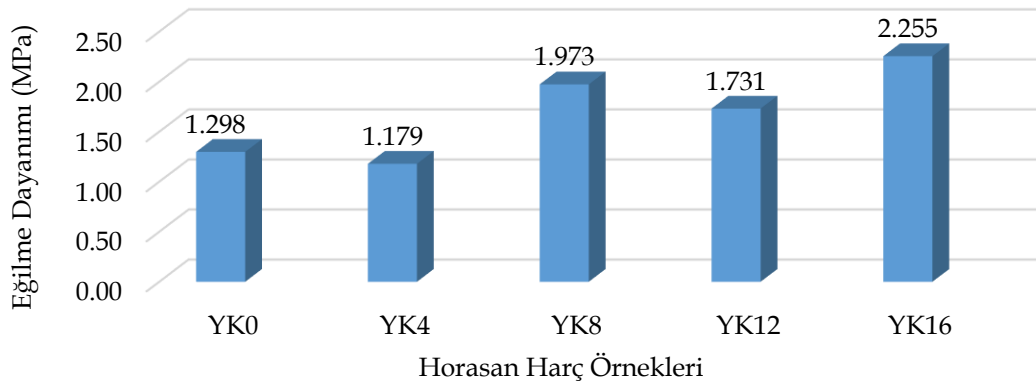
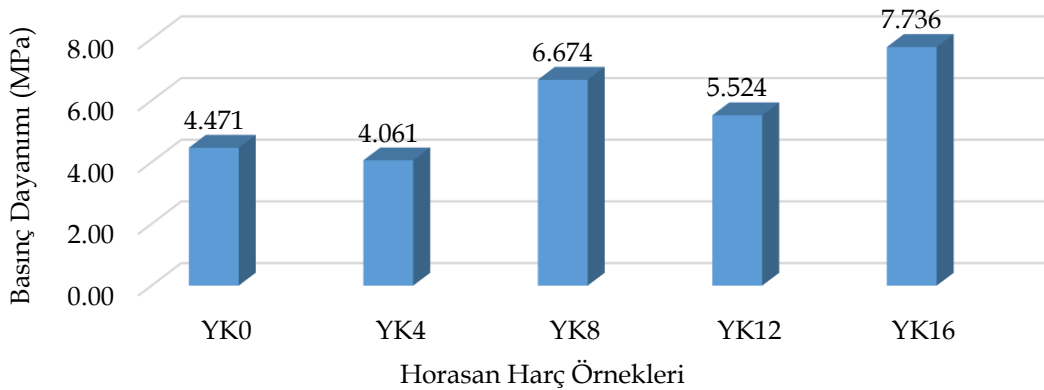
**Şekil 6.** Horasan harcı örneklerinin ultrases geçiş hızı değerleri

Ultrases geçiş hızı değerleri Şekil 6 incelendiğinde, karışımlarda yumurta kabuğu kullanımıyla birlikte geçiş hızı değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir. Artış oranları, YK8 kodlu örnekte %8.74, TK12 kodlu örnekte %6.68 ve YK16 kodlu örnekte ise %12.58 oranlarında artış belirlenmiştir. Sadece, YK4 kodlu örnekte %3.28 azalma olduğu görülmektedir. Bu azalmayı, yumurta kabuğu granülometrisinin her karışım için aynı olmamasına, iri boyutlu yumurta kabuğu tanelerinin bu karışımda daha fazla olmasına bağlamak mümkündür. YK4 kodlu örnekte de artış olması gerektiği düşünülmektedir. Yumurta kabuğu kullanılan karışımlarda genel olarak ultrases hızı değerinin artış göstermesi, yumurta kabuğunun karışımları daha kompakt hale getirdiğinin ispatıdır. Yapı malzemelerinde, boşluk oranı azaldıkça ultrases geçiş hızı değerleri artmaktadır.

Eğilme ve basınç dayanımı değerleri Şekil 7 ve Şekil 8’de görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, yumurta kabuğu kullanılan Horasan harcı örneklerinin eğilme ve basınç dayanımı değerleri artmıştır. Bu durum, sadece YK4 kodlu örneklerde aksi yönde gelişmiştir. Şahit harç örneğine oranla YK4 kodlu örnekte dayanım azalması meydana gelmiştir. Beklentimiz, bu örnekte de dayanım artışının sağlanması olmuştur. YK4 kodlu örnekteki azalmaya, yumurta kabuğu tanelerinin bu karışımda daha fazla iri boyutlu olması, tane şekli ve boyutundaki farklılıklar neden olmuştur. Buna ilave olarak, 0-1 mm aralığında ezilerek öğütülmüş yumurta kabuklarının karışımda homojen dağılım gösterememesi nedeniyle de böyle bir sonucun ortaya çıkabileceği değerlendirilmiştir.

**Çizelge 8.** Horasan harcı örneklerinin eğilme ve basınç dayanımı değerleri

Horasan Harç Örnekleri	Eğilme Dayanımı (MPa)	Standart sapma	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Standart sapma	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
YK0 <sub>1</sub>	1.166			4.286		
YK0 <sub>2</sub>	1.320	0.12	1.298	4.526	0.16	4.471
YK0 <sub>3</sub>	1.409			4.601		
YK4 <sub>1</sub>	1.039			3.916		
YK4 <sub>2</sub>	1.212	0.12	1.179	4.069	0.14	4.061
YK4 <sub>3</sub>	1.286			4.198		
YK8 <sub>1</sub>	1.944			6.548		
YK8 <sub>2</sub>	2.077	0.09	1.973	7.091	0.36	6.674
YK8 <sub>3</sub>	1.900			6.385		
YK12 <sub>1</sub>	1.714			5.668		
YK12 <sub>2</sub>	1.690	0.05	1.731	5.392	0.13	5.524
YK12 <sub>3</sub>	1.790			5.514		
YK16 <sub>1</sub>	2.355			7.815		
YK16 <sub>2</sub>	2.222	0.08	2.255	8.020	0.33	7.736
YK16 <sub>3</sub>	2.190			7.373		

**Şekil 7.** Horasan harcı örneklerinin eğilme dayanımı değerleri**Şekil 8.** Horasan harcı örneklerinin basınç dayanımı değerleri

Yumurta kabuğunun kullanımı, YK8, YK12 ve YK16 kodlu Horasan harcı örneklerinde sırasıyla eğilme dayanımı değerlerini %52, %33 ve %73, basınç dayanımı değerlerini ise %49, %23 ve %73 oranlarında artırmıştır. En yüksek dayanım artışları %16 yumurta kabuğu kullanılan YK16 kodlu karışım örneklerinde meydana gelmiştir. Genel olarak, yumurta kabuğu kullanım oranının artmasıyla birlikte dayanım değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir. YK12 kodlu örneğin dayanım artış oranında, YK8 kodlu örneğe

göre azalma olduğu görülmektedir. Bu durum, YK12 karışımında kullanılan yumurta kabuğu granülo metrisinin YK8 ve YK16'ya göre farklılık göstermesinden kaynaklı olduğunu söylemek mümkündür. Harcın üretim aşamasında, 0-1mm aralığında ve 48 g ağırlığında yumurta kabuğu karışımında kullanılırken, 0.5-1mm aralığındaki iri tanelerin diğer karışımlara oranla fazla olması böyle bir sonuç doğurmuştur. İnce boyutlu, toz halindeki yumurta kabuğu dayanım artışı sağlarken, daha iri boyutlu ve yassı taneler ise dayanım artışını olumsuz etkilemiştir. Aynı durum YK4 kodlu örnek içinde geçerlidir. Erdem vd. [20], kompozit birçok uygulama için %7 yumurta kabuğu kullanımını önerilebilecek en olası yapı olarak değerlendirmişlerdir. Akpınar vd. [31], yumurta kabuğu tozunun karışımında hacminin artmasıyla eğilme dayanımında da artış sağladığını ifade etmişlerdir. Akyıldız [12], çimento bağlayıcı harçlar ile ilgili çalışmasında, yumurta kabuğu katkılı harç örneklerinin, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımı değerlerinin azaldığını tespit etmiştir. Yapmış olduğumuz bu çalışmada ise Horasan harcında yumurta kabuğunun kullanılması, %73'e varan yüksek oranlarda dayanım artışı sağlamıştır. Yumurta kabuğu, dolayısı ile kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) miktarının artması ile doğru orantılı olarak dayanım artışı elde edilmiştir.  $\text{CaCO}_3$  yapısal olarak Horasan harcına mukavemet kazandıran bir bileşik olmuştur.

Killerin, 600-900°C sıcaklıkta pişirilmesi sonucunda oluşan amorf ürünler, kireç ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidratları oluştururlar. Horasanın kireç ile yaptığı bu reaksiyon sonucunda, suda çözünmeyen kalsiyum silikat tuzları oluşur. Bu reaksiyon, puzolanik aktivite olarak adlandırılır. Nemli ortamda silisin, kireç ile bağlanması, hidrolik ürün oluşmasına neden olur [32,33]. Jel halindeki bu ürünler suda çözünmeden, tuğla kırıklarının gözeneklerinde yer almaktadır. Bu reaksiyon sonucu, horasan harçlarının dayanım kazanması ve su içerisinde sertleşebilmesi mümkündür [34]. Horasan harcındaki gözeneklerin yoğunluğu, tuzların hidratlanma-dehidratlanma hareketleri sonucu meydana gelen iç gerilmelere karşı malzemenin dayanımını arttırmaktadır [35,36]. Bağlayıcı olarak hidrolik kireç kullanımıyla kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli oluşurken, bağlayıcı olarak çimento kullanılması durumunda bu etki beklenmemelidir. Bu nedenle, Akyıldız [12]'in yumurta kabuğu ile ilgili yapmış olduğu çalışmasında dayanım artışları sağlanamamıştır.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Horasan harcında yumurta kabuğunun kullanımı ile ilgili yapılan bu çalışmada, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Yumurta kabuğunun karışımlarda ilave olarak kullanılması, karışımın su/agrega oranını düşürmesi nedeniyle normal olarak harç örneklerinin yayılma çaplarının düşmesine neden olmuştur. Karışım tasarımı yapılırken bu durum dikkate alınmalıdır.
- Harcın su emme yüzdesini %4.06 oranına kadar düşürmüş, ultrases geçiş hızı değerini ise %12.58 oranına kadar artırmıştır. Bu verilerden, ezilerek öğütülmüş toz halindeki yumurta kabuğunun harç içerisindeki boşlukların dolmasına katkı sağlayarak kompakt bir yapı sağladığı söylenebilir.
- Harcın eğilme ve basınç dayanımı değerlerini %73 gibi büyük bir oranda artırmıştır. Bu orana, YK16 kodlu %16 yumurta kabuğu kullanılan karışımında ulaşmıştır. Yüksek oranda kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) içeren yumurta kabuğunun Horasan harcına dayanım kazandırdığı tespit edilmiştir.

Yumurta kabuklarının karışıma ilave olarak katılması, harcın yayılma çapını düşürmüştür. Bu nedenle karışıma ikame olarak katılması önerilmektedir. Örneğin karışımında kum yerine veya tuğla kırığı yerine ikame olarak kullanılabilir. Bu çalışmada ilave olarak kullanılmasının sebebi, devam ettirilecek olan bir çalışma olduğu için öncelikle harcın bileşen miktarlarında hiçbir değişiklik yapılmadan yumurta kabuğu ilave olarak kullanılmıştır. İlave kullanım sonucu, su/agrega oranının azalmasına bağlı olarak, yayılma çapında azalma olacağı beklenen bir sonuçtur. Elde edilecek verilere göre yeni karışım tasarımları planlanmıştır. Bu çalışmada, yumurta kabuğunun ilave olarak kullanımı ile dayanım artışı sağlanmıştır. Bu artışın, ne kadarının yumurta kabuğu kaynaklı, ne kadarının su/agrega oranındaki azalmaya bağlı

olduğu sonraki çalışmalarda görülecektir. Bu nedenle, yumurta kabuğunun ikame olarak kullanılması sonraki çalışmalara bırakılmıştır. Sonraki çalışmalarda, Horasan harcı karışımında %16'dan daha yüksek bir oranda yumurta kabuğunun kullanılması veya 0-1 mm aralığında değil de 0-0.5 mm gibi daha ince haldeki yumurta kabuğunun kullanılması durumunda fiziksel özelliklerin, mekanik özelliklerin ve dayanıklılığın ne şekilde etkileneceği araştırılacaktır.

### Katkı Beyanı

İsmail Kılıç: Araştırma tasarımı, literatür taraması ve değerlendirilmesi, veri toplama ve verilerin analizi, deneysel çalışmalar, bulguların yorumlanması, makalenin yazılması.

Saadet Gökçe Gök: Veri toplama ve verilerin analizi, deneysel çalışmalar, makalenin yazılması.

### Çıkar Çatışması Beyanı

Makalenin yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

### Kaynaklar

- [1] Güleç A. Harç, Sıva ve Diğer Kompozit Malzemelerde Kullanılan Bağlayıcılar ve Özellikleri. Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi, 2016;17:77-91.
- [2] Ashurst J. Mortars, Plasters and Renders in Conservation. Ecclesiastical Architects and Surveyors Association, Londra. 1984.
- [3] Güleç A. Bazı Tarihi Anıt Harç ve Sıvalarının İncelenmesi [Doktora Tezi]. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü; 1992.
- [4] Borelli E. Binders, Conservation of Architectural Heritage, Historic Structures and Materials: porosity. ARC Laboratory Handbook, vol. 4, ICCROM, Roma. 1999.
- [5] Balksten K. Traditional Lime Mortar and Plaster Reconstruction with Emphasis on Durability [Thesis for Degree of Doctor of Technology]. Göteborg, İsveç: Department of Chemical and Biological Engineering, Chalmers University of Technology; 2007.
- [6] Kozlu HH. Kayseri Yöresindeki Tarihi Harçların Karakterizasyonu ve Onarım Harçlarının Özellikleri [Doktora Tezi]. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü; 2010.
- [7] Tekin Ç, Kurugöl S. Çeşitli Organik Katkıların Kirecin Karbonizasyonu Üzerindeki Etkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2012;27( 4):717-728, Ankara. (Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 2012;27( 4):717-728).
- [8] Erol A. Yumurta Tavuklarında Rasyona Farklı Kalsiyum Kaynakları İlavesinin Performans ve Yumurta Kabuk Kalitesine Etkisi [Yüksek Lisans Tezi]. Konya: Selçuk Üniversitesi, ss: 76; 2011.
- [9] Binici H, Temiz H, Sevinç A, Eken M, Küçükönder A, Ergül T. Atık Pül Kömürü ve Yumurta Kabuğunun Radyasyon Tutucu Materyal Olarak Üretimde Kullanılması. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2013;16(1):8-14.
- [10] Gowsika D, Sarankokila S, Sargunan K. Experimental Investigation of Egg Shell Powder as Partial Replacement with Cement in Concrete. Inter. Jour. of Eng. Trends and Tech. 2014;14(2):65-68.
- [11] Pliya P, Cree D. Limestone derived eggshell powder as a replacement in Portland cement mortar. Construction and Building Materials, 2015;95:1-9.
- [12] Akyıldız A. Yumurta Kabuğu Katkılı Harçların Mekanik Özellikleri. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 2018;8(2):570-574, Zonguldak. DOI: 10.7212/2Fzkufbd.v8i2.1187
- [13] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) "Kümes Hayvancılığı Üretim Miktarı, Ekim 2024". <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Kumes-Hayvanciligi-Uretimi-Ekim-2024-53571> (Erişim tarihi: 24 Ocak 2025)
- [14] Okur M, Ak Ç, Tümtürk U. Doğal ve Kalsine Yumurta Kabuklarının Cr(III) Gideriminde Değerlendirilmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 2019;24(2), Bursa. DOI: 10.17482/uumfd.383572
- [15] Milli Eğitim Bakanlığı (MEB). Yumurta. Milli Eğitim Bakanlığı Yayını, Hayvan Yetiştiriciliği ve Sağlığı Alanı, Ankara. 2019.

- [16] Karagöz B. Yumurta Kabuğu, Antep Fıstığı Kabuğu, Fındık Kabuğu, Pirinç Kabuğu ve Zeytin Çekirdeğinden Hazırlanan Adsorbanların Adsorpsiyon Performansları [Yüksek Lisans Tezi]. Edirne: Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, ss: 185; 2011.
- [17] Zerek E. Yumurta Kabuğu Tozu Eklenmiş Kurabiyelerin Bazı Besinsel ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul: İstanbul Medipol Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, ss: 68; 2021.
- [18] Şamlı E, Ağma Okur A. Tüm Yönleriyle Yumurta. İstanbul Ticaret Borsası Yayınları, Yayın No: 208, İstanbul. 2016. ISBN: 978-605-137-521-2.
- [19] Mittal A, Teotia M, Soni RK, Mittal J. Applications of Egg Shell and Egg Shell Membrane as Adsorbents: A Review. *J. Mol. Liq.*, 2016;223:376–387.
- [20] Erdem M, Akdoğan E, Üreyen ME, Uysal O, Kaya M, Irmak C. Yumurta Kabuğu Tozu Katkılanmış Sert Poliüretan Köpükler: Termal İletkenlik, Basma Mukavemeti ve Yanma Davranışlarının İncelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 2018;38(1):83–93, ISSN 1300-3615
- [21] Kılıç İ. Horasan Harcında Yumurta Akı Kullanımının İncelenmesi. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2021;7(1):122–134. DOI: 10.34186/klujes.882789
- [22] Çuçen A, Altuncı YT. Horasan Harcında Şeker Pancarı Posasının Lif Katkı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2023;14(1):85-95. DOI: 10.29048/makufebd.1229417
- [23] Şimşek N, Kılıç İ. Keçi Kılının Lif Olarak Horasan Harcında Kullanılması. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 2021;3(2):115–131. e-ISSN: 2687-2129
- [24] Kılıç İ. Horasan Harcında Pirinç Kabuğu Külünün Puzolan Olarak Değerlendirilmesi. *Mimarlık ve Tasarım: Araştırma ve Uygulama*, Livre de Lyon, s: 115–127, Fransa. 2022. ISBN: 978-2-38236-257-0
- [25] Kılıç İ, Gökçen G. Horasan Harcında Farklı Karışım Oranlarının Taze ve Sertleşmiş Harç Özelliklerine Etkileri. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi (ECJSE)*, 2022;9(1):203–219. DOI: 10.31202/ecjse.957224.
- [26] Kılıç İ, Gök SG. The Effect of Binder Ratio on Mechanical Properties of Khorasan Mortar. In: *3<sup>rd</sup> International Conference on Organic Electronic Material Technologies (OEMT2018)*, Sep. 20-22, 2018; (p. 323–330), Kırklareli, Türkiye.
- [27] TS EN 1015-11: Kâgir Harcı-Deney Yöntemleri-Bölüm 1: Sertleşmiş Harcın Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımının Tayini. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2020.*
- [28] TS EN 1015-3: Kâgir Harcı-Deney Metotları-Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası ile). *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.*
- [29] ASTM C597-16: Standard test method for pulse velocity through concete. *American Society for Testing Materials International; West Conshohocken, PA, 2016.*
- [30] Tekno Yapı Kimyasalları. “Teknorep 550 Doğal Hidrolik Kireç Teknik Doküman Sayfası”. <https://teknoyapi.com.tr/documents/TDS-teknorep-550.pdf> (Erişim Tarihi: 05.11.2025)
- [31] Akpınar Borazan A, Kuru D, Sert S. Atık Yumurta Kabuğu Katkısının Polyester Kompozit Malzeme Üretimine Etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2019;6:135–145. Bilecik. e-ISSN: 2458-7575, DOI: 10.35193/bseufbd.582065
- [32] Çizer Ö, Böke H, İpekoğlu B. Bazı Osmanlı Dönemi Hamam Yapılarının Kubbe ve Duvarlarında Kullanılan Kireç Harçların Özellikleri. *2.Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi*, 2004; (p.1-13), Mimarlar Odası Büyükşehir Şubesi.
- [33] Alhan Şimşek, ET. Tarihi Yapılarda Tuğla Duvarların Çelik Hasır ve Tekstil Donatılı Horasan Harcı ile Güçlendirilmesinin Deneysel Olarak İncelenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü; 2018.
- [34] Mavioğlu ÜA. Farklı Puzolanik Katkıları ile Hazırlanan Horasan Harçlarının Değişen Parametrelerinin İncelenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü; 2011.
- [35] Uğurlu E, Böke H. The Use of Brick-Lime Plasters and Their Relevance to Climatic Conditions of Historic Bath Buildings. *Construction and Building Materials*, 2009;23(6):2442-2450.
- [36] Özgünler AS, Ersen A, Güleç A. Yedikule Kara Surları'nda Kullanılan Erken Bizans Dönemi Harçlarının Karakterizasyonu Üzerine Bir Araştırma. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*, 2010;(5):31-39.