



Atık Mermer Tozunun Çimento Harçlarının Dayanım Özelliklerine Etkisi

Ahmet Ferdi Şenol^{1*} ve Cenk Karakurt¹

¹*İnşaat Mühendisliği Bölümü / Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye*

**(ahmetferdi.senol@bilecik.edu.tr) Başlıca yazarın mail adresi*

Özet –Beton sektöründe, çevrenin korunmasına yönelik giderek artan ilgi, endüstriyel ve maden atık ürünlerinin değerlendirilmesi için yeni teknolojilerin geliştirilmesine yol açmaktadır. Bu kapsamda, çimentolu harç üretimlerinde çimento kullanımını azaltabilmek amacıyla, mermer işletmelerinde atık ürün olarak elde edilen atık mermer tozlarının, çimentolu harçlarda kullanımı araştırılmıştır. Çalışmada, çimento yerine %0, %5, %10 ve %15 oranlarında atık mermer tozu ikame edilen dört serilik harç karışımları hazırlanmıştır. Üretilen taze harç serileri üzerinde işlenebilirlik deneyi, 7 ve 28 günlük sertleşmiş harç numuneleri üzerinde ise eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçları; çalışmada kullanılan atık mermer tozunun, çimento yerine en fazla %10'a kadar kullanımı ile kabul edilebilir dayanım kayıpları elde edildiğini göstermiştir. Atık mermer tozlarının çimentolu harçlarda kullanımı ile inşaat endüstrisi için alternatif bir hammadde kaynağı olmasının yanı sıra atık mermerlerin bertaraf edilmesine de katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler – Atık Mermer Tozu, Çimento, Harç, Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı

I. GİRİŞ

Türkiye, Dünyanın en zengin mermer yataklarının bulunduğu Alp kuşağında yer aldığından, yaklaşık 5,1 milyar m³ mermer rezervine sahiptir [1]. Ülkemizdeki yüksek mermer üretimi beraberinde atık mermer miktarının da artmasına sebep olmaktadır. Üretim sonrası oluşan bu atık mermer ürünleri, doğal kaynaklarımızı kirletmekte ve çevremizde olumsuz etkilere yol açmaktadır. Son yıllarda meydana gelen hızlı kentleşme ile birlikte yüksek miktarlarda çimento üretilmekte, bu durum ise yüksek enerji ihtiyacı ile birlikte çevre ve sağlık sorunlarına neden olmaktadır. Bu kapsamda araştırmacılar tarafından, harç ve beton üretiminde çimento kullanımını azaltmak amacıyla, çimento yerine alternatif endüstriyel atık toz (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, atık mermer vb.) malzemelerin kullanılabilmesi araştırılmaktadır.

Mermer; kalker (CaCO₃) ve dolomitin (CaMg(CO₃)₂) yüksek sıcaklık ve basınç altında yeniden kristalleşmesi sonucu oluşan doğal bir taştır

[2]. Mermer bloğunun %70'i taş ocağından çıkarma ve kesme işlemlerinden sonra atık olarak çevrede depolanmakta, bunun da %40'ı atık mermer çamuruna dönüşmektedir [3]. Mermer atıkları; toz, bulamaç ve mermer blokları şeklinde arazilere gelişigüzel dökülerek ocak ve tesislerin yakınındaki su kaynaklarının ve yeşil arazilerin kirletilmesine sebep olmaktadır.

Yeşil harç üretiminde kısmi çimento ikamesi olarak atık mermer tozunun kullanılması, kabul edilir bir performansla endüstrileştirilebilir. Böylelikle atıkların çevreye olan zararlı etkilerinin azaltılması da sağlanabilir [4]. Günümüze kadar yapılan bazı araştırmalarda [5]; mermer atıklarının, çevresel yönetim sistemine zararını en aza indirmek ve geri dönüşümünü sağlayarak ekonomiye kazandırmak amacıyla, beton teknolojisinde kullanımı değerlendirilmiştir.

Rid vd. [6] yaptıkları bir çalışmada, kısmi çimento ikamesi olarak atık mermer tozu ve uçucu kül gibi atık malzemeleri içeren çevre dostu yüksek dayanımlı bir beton geliştirmeyi amaçlamışlardır. Karışım serilerindeki toplam

bağlayıcının; %2,5, %5, %7,5 ve %10 ağırlığına göre atık mermer tozu ve uçucu külü birlikte kullanarak, çimento içeriğini %5, %10, %15 ve %20 oranlarında değiştirmişlerdir. Üretilen beton serilerinin taze hal özellikleri ile basınç ve eğilme dayanımları açısından sertleşmiş hal özelliklerini; 7, 14, 28, 56 ve 90 günlük kür sonrası değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda, %10'luk kısmi çimento ikâmeli serilerin (%5 mermer tozu ve %5 uçucu kül) en yüksek dayanımları sağladığı ve %15 (%7,5 mermer tozu ve %7,5 uçucu kül) ikâmeli karışımın ise optimal olduğunu tespit etmişlerdir. Çelikten ve Canbaz tarafından yapılan bir çalışmada [7], çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında atık andezit ve mermer tozu ayrı ayrı kullanılarak harç numuneleri üretmişlerdir. Üretilen numuneler üzerinde ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımı deneylerini gerçekleştirmişler ve deney sonuçlarına göre, kullanılan mermer tozunun çimento yerine en uygun ikame oranının %10, andezit tozunun ise %15 olduğunu tespit etmişlerdir. Vardhan vd. [8], çimentonun atık mermer tozu ile yer değiştirmesi (%10'dan %50'ye kadar) ile elde edilen çimento harçlarının, dayanım gelişimi ve mikroyapısal özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, harç karışımında, çimento yerine %10'a kadar atık mermer tozunun kullanılabileceğini tespit etmişlerdir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

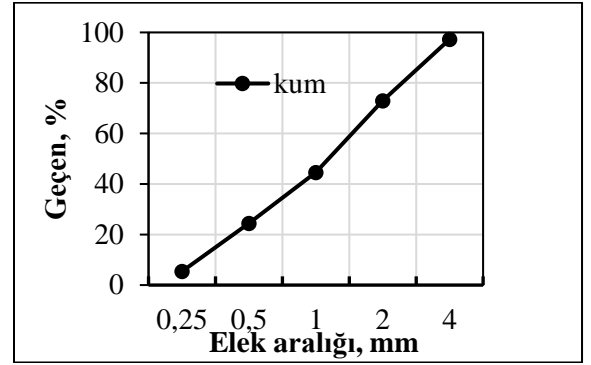
A. Materyal

Harç serilerinin üretiminde kullanılan atık mermer tozları, Bilecik ili şehir merkezindeki yerel mermer kesim işletmelerinden toplanan atık mermer parçalarının laboratuvarındaki çeneli kırıcıda 0-4 mm boyutlarına getirilip, bilyalı değirmende 120 dakika süre ile öğütülerek toz haline getirilmesi sonrasında kullanılmıştır. Atık mermer tozlarının %95'i 90 µm'lik elekten geçebilecek şekilde öğütülmüştür (Şekil 1).



Şekil 1. Atık mermer tozu.

Harç serilerinin üretiminde, Bilecik Vezirhan Çimento Fabrikasında üretilen CEM I 42,5 R Portland çimentosu ve agrega olarak 0-4 mm boyutlarında Osmaneli nehir kumu kullanılmıştır. Agrega granülometri eğrisi Şekil 2'de verilmiştir. Karışımlarda kullanılan çimento ve atık mermer tozu üzerinde yapılan kimyasal analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Harç serilerinin üretiminde, karışım suyu olarak, Bilecik ili şehir şebeke suyu kullanılmıştır.



Şekil 2. Agrega granülometri eğrisi.

Tablo 1. Karışımlardaki malzemelerin kimyasal analizi.

Oksitler, %	Atık mermer	CEM I 42,5R
SiO ₂	1,2	18,9
Al ₂ O ₃	-	4,7
Fe ₂ O ₃	1,2	3,7
CaO	72,1	63,2
MgO	0,4	1,6
SO ₃	-	3,0
K ₂ O	-	0,6
TiO ₂	-	-
P ₂ O ₅	-	-
MnO	-	-
Kızdırma Kaybı	25,1	3,2
Özgül Ağırlık, g/cm ³	2,3	3,1

B. Yöntem

Harç karışımları TS EN 196-1[9] standartlarına uygun olarak, 4 farklı seri olarak hazırlanmıştır. Atık mermer tozları, çimento ile ağırlıkça; %0 (kontrol numunesi; C), %5, %10 ve %15 oranlarında değiştirilmiştir. Tüm serilerde su/bağlayıcı oranı 0,5 ve agrega (kum) miktarı da 1350 gr olarak kullanılmıştır. Buradaki bağlayıcı ifadesi, çimento ve atık mermer tozlarından oluşmaktadır. C serisindeki çimento miktarı 450 gramdır. Harç serileri C, M5, M10 ve M15 olarak adlandırılmıştır. Seri kodlarındaki M indisi; atık mermer tozunu, sayılar ise çimento yerine ağırlıkça ikame yüzdesini ifade etmektedir. Örnek olarak, M5; %5 atık mermer tozu içeren harç karışımını belirtmektedir. Harç serilerindeki malzeme karışım oranları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Harç serileri karışım miktarları.

Harç Serileri	M (g)	Çimento (g)	Kum (g)	Su (g)
C	0	450	1350	225
M5	22,5	427,5	1350	225
M10	45,0	405	1350	225
M15	67,5	382,5	1350	225

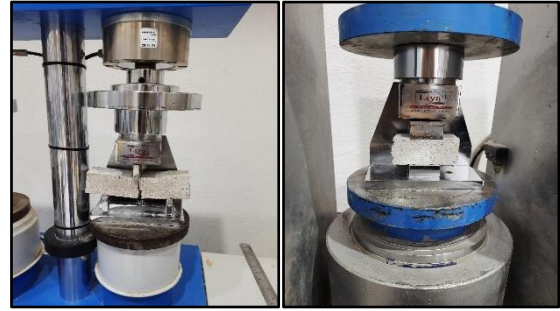
Harç karışımlarında kullanılan tüm malzemeler, hassas terazi ile tartılmış ve laboratuvar tipi hız kademeli harç mikserinde karıştırılmıştır. Taze harç serilerinin yayılma tablası ile işlenebilirlik tayini, TS EN 1015-3 [10] standardına göre belirlenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Harç üretimi ve işlenebilirlik deneyi.

Hazırlanan harç serileri, 40x40x160 mm boyutlarındaki çelik prizmatik kalıplara iki parça halinde dökülmüş, her parça sarsma tablasında

sıkıştırılarak kalıplara yerleştirilmiş ve ortam şartlarında 24 saat boyunca kalıplarda bekletilmiştir. Her kür süresindeki seri için 3 adet numune üretilmiştir. Kalıplardan çıkartılan sertleşmiş harç numuneleri, laboratuvar ortamındaki kirece doymuş suda (20 ± 2 °C sıcaklıkta), 7 ve 28 günlük kür sürelerine kadar bekletilip sonrasında deneyleri uygulanmıştır. Harç numuneleri üzerinde, TS EN 196-1 [9]’e göre, üç noktalı eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır (Şekil 4). Bu deneyler için çimento basma ve eğilme test presi kullanılmıştır. Eğilme dayanımı deney sonuçları, üç numunenin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Basınç dayanımı deney sonuçları ise eğilme dayanımı deneyinde ikiye ayrılan harç numunelerinden elde edilen 6 numune sonuçlarının, aritmetik ortalamaları alınarak tespit edilmiştir.

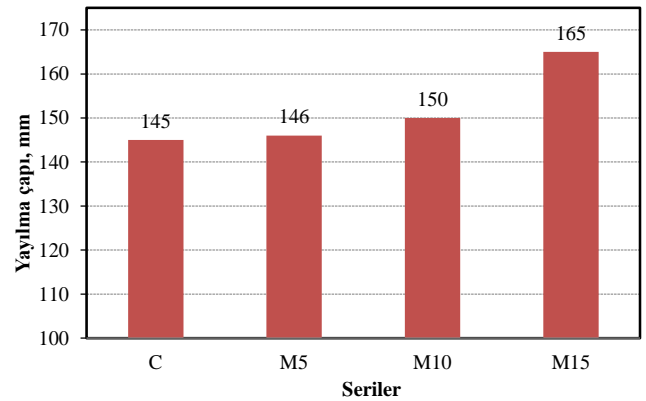


Şekil 4. Eğilme ve basınç dayanımı deneyleri.

III. BULGULAR

A. İşlenebilirlik Deney Sonuçları

Harç serilerinin işlenebilirlik özellikleri, yayılma tablası deneyi ile belirlenmiştir. Üretilen harç serilerinin yayılma çaplarındaki değişimler Şekil 5’te verilmiştir.

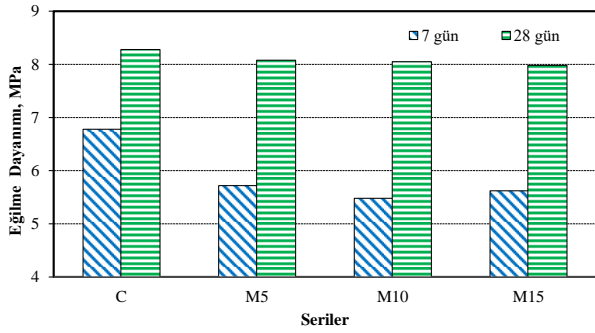


Şekil 5. Yayılma çaplarının serilere göre değişimi.

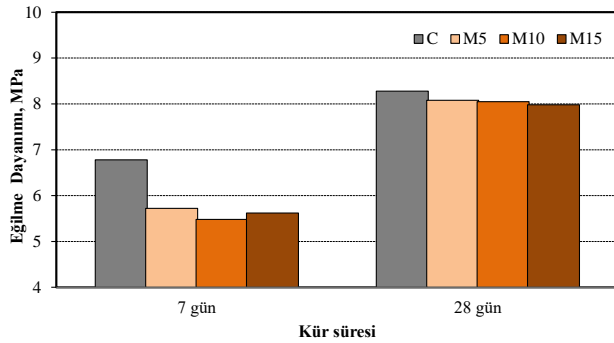
Yayıma çapı sonuçlarına göre, karışımda M ikamesi arttıkça yayılma değerleri artmıştır. C serisine göre M5, M10 ve M15 serilerindeki yayılma çapları sırasıyla; %0,7, %3,4 ve %13,8 oranlarında artmıştır.

B. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Harç serilerinin, kür süresi ve eğilme dayanımı sonuçlarına göre değişimi Şekil 6'da sunulmuştur. Serilerin kür artışı ile birlikte eğilme dayanımları da artmıştır. En yüksek eğilme dayanımı 28 günlük kür sonundaki C serisinden elde edilmiştir. Kür sürelerinin seriler ve eğilme dayanımı sonuçlarına göre değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Üretilen harçların 7 günlük eğilme dayanımları Şekil 6'da görüldüğü gibi 5,5 MPa ile 6,8 MPa arasında, 28 günlük eğilme dayanımları ise 7,9 MPa ile 8,3 MPa arasında elde edilmiştir.



Şekil 6. Serilerin eğilme dayanımı sonuçlarının kür sürelerine göre değişimi.

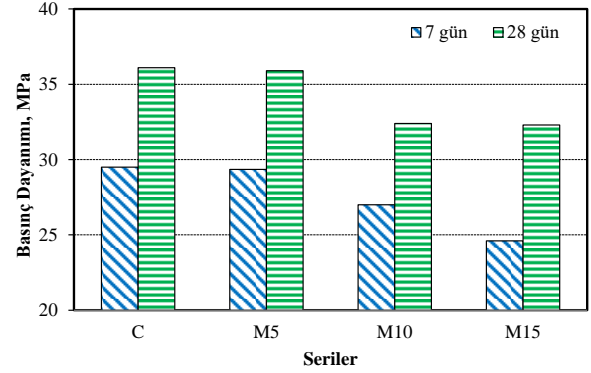


Şekil 7. Kür sürelerinin seriler ve eğilme dayanımı sonuçlarına göre değişimi.

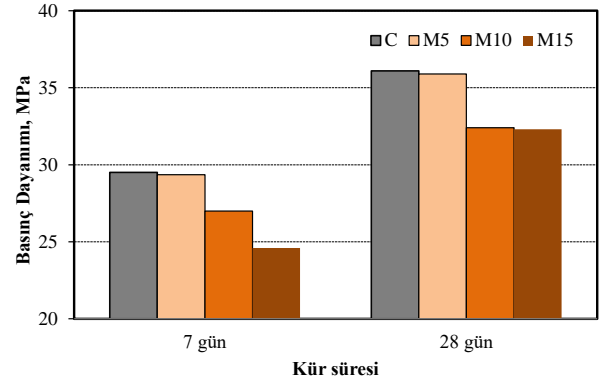
Buna göre, serilerin 7 günlük kür süresi sonundaki eğilme dayanımları; M5'de %15,6, M10'da %19,2, M15'de %17,1 oranlarında azalış ile sonuçlanmıştır. 28 günlük kür süresi sonunda ise; M5, M10 ve M15 serilerinin dayanımları C serisine göre sırasıyla; %2,4, %2,8 ve %3,6 oranlarında azalmıştır.

C. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Serilerin basınç dayanımı sonuçlarının kür sürelerine göre değişimi Şekil 8'de, kür sürelerinin seriler ve basınç dayanımı sonuçlarına göre değişimi ise Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 8. Serilerin basınç dayanımı sonuçlarının kür sürelerine göre değişimi.



Şekil 9. Kür sürelerinin seriler ve eğilme dayanımı sonuçlarına göre değişimi.

Üretilen harçların 7 günlük basınç dayanımları Şekil 8'de görüldüğü gibi 24,6 MPa ile 29,5 MPa arasında, 28 günlük basınç dayanımları ise 32,3 MPa ile 36,1 MPa arasında elde edilmiştir.

Serilerin basınç dayanımları, kürlenme süresinin artması ile önemli ölçüde artmıştır. Buna göre, harç serilerinde M ikamesi arttıkça, 7 günlük kür süresi sonunda M5, M10 ve M15'de sırasıyla; %0,5, %8,5 ve %16,6 oranlarında dayanımlar azalmıştır. 28 günlük kür süresi sonundaki basınç dayanımları ise M5, M10 ve M15'de sırasıyla; %0,6, %10,3 ve %10,5 oranlarında azalmıştır.

IV. TARTIŞMA

Karışım serilerine uygulanan yayılma tablası deneyi sonuçlarına göre, harç serilerinde M ikamesi arttıkça, karışımların işlenebilirliği artmıştır. Bu

durum, M'nin özgül ağırlığının çimentonunkinden düşük olmasına bağlanabilir.

M ikameli harç serilerindeki eğilme dayanımları incelendiğinde, M5 ve M10 serilerinin 28 günlük eğilme dayanımlarının C serisine çok yakın (en fazla %2,8' e kadar dayanım kaybı) değerlerde olduğu ve 7'nci günden sonra oluşan dayanım kayıplarının kür süresi artışı ile birlikte giderek azaldığı tespit edilmiştir.

Harç serilerinde M ikamesinin artması; erken yaşlardaki (7 güne kadar) basınç dayanımlarının, M5 serisinde hariç giderek azalması ile sonuçlanmıştır. Kısa kür (7 günlük) süresi ile harç serilerinde; M ikamesinin artması, artan gözenek hacmine ve basınç dayanımlarının azalmasına neden olmuştur. Bu durum atık mermer tozunun, çimentoya (%18,9) göre çok az miktarlarda (%1,2) SiO₂ içermesinden kaynaklandığı şeklinde değerlendirilmektedir. Kür süresinin artması ile M serilerinin basınç dayanım kaybı da giderek azalmış ve C serisine en yakın basınç dayanımlarının M5 serilerinden elde edildiği tespit edilmiştir.

V. SONUÇLAR

Deneysel çalışmalar kapsamında elde edilen sonuçlar, sırasıyla aşağıda sunulmuştur. Buna göre;

- İşlenebilirlik sonuçlarına göre, harç serilerinde atık mermer tozu ikamesi arttıkça, harç serilerinin işlenebilirliği de %14 (M15'de)'e kadar artmıştır. Sonuç olarak, harç serilerinde %15 oranına kadar atık mermer tozu kullanımı çimentolu harçların işlenebilirliğini artırmıştır.

- M ikameli harç serilerindeki en yüksek eğilme dayanımı 28 günlük kür sonundaki M5 serisinden (8,1 MPa) elde edilmiştir. Kür süresi arttıkça M serilerindeki eğilme dayanımı kaybı azalmıştır. Eğilme dayanımları; 7 günlük kür süresinde en fazla %19,2'ye kadar azalırken, 28 günlük kür süresinde en fazla %3,6 'ya kadar azaldığı ve kür süresindeki artışların dayanım kaybını azalttığı tespit edilmiştir.

- Serilerin basınç dayanımları, kür süresi ile birlikte artarken, karışımdaki M ikamesinin artışı ile giderek azalmıştır. 28 günlük kür süresi sonunda, C serisine göre en az basınç dayanımı kaybı M5 serisinde (%0,6) oluşurken, en yüksek dayanım kaybı %10,5 ile M15 serisinde tespit edilmiştir.

- Mekanik dayanım deneyleri sonrasında, atık mermer tozunun çimento yerine %10'a varan oranlarda kullanılması ile kabul edilebilir dayanım

kayıplarında harçlar üretilbileceği değerlendirilmiştir.

- Atık mermer tozlarının çimentolu harçların özelliklerini iyileştirmesi kapsamında, endüstriyel atık tozlarla (yüksek fırın cürufu, silis dumanı vb.) birlikte üretilen harç serilerinin, dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin de araştırılması değerlendirilmelidir.

- Mermer işletmelerinden elde edilen atık mermer parçalarının geri dönüştürülerek çimentolu harçlarda ikame olarak kullanımı; küresel CO₂ emisyonlarının azaltılmasına, çimento üretimi kaynaklı enerji tasarrufuna, atık çevre yönetiminin desteklenmesine ve doğal kaynakların korunmasına destek olacağı şeklinde değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, Doğal Taşlar Sektör Raporu, 2021.
- [2] Demirel, B., & Alyamaç, K. E. (2018). Waste marble powder/dust. In *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete* (pp. 181-197). Woodhead Publishing.
- [3] Bilir, T., Karadağ, Ö., & Aygün, B. F. (2022). Waste marble powder. In *Sustainable Concrete Made with Ashes and Dust from Different Sources* (pp. 479-506). Woodhead Publishing.
- [4] Benjeddou, O., Alyousef, R., Mohammadhosseini, H., Soussi, C., Khadimallah, M. A., Alabduljabbar, H., & Tahir, M. M. (2020). Utilisation of waste marble powder as low-cost cementing materials in the production of mortar. *Journal of Building Engineering*, 32, 101642.
- [5] Boğa, A. R., & Şenol, A. F. (2023). The effect of waste marble and basalt aggregates on the fresh and hardened properties of high strength self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 363, 129715.
- [6] Rid, Z. A., Shah, S. N. R., Memon, M. J., Jhatial, A. A., Keerio, M. A., & Goh, W. I. (2022). Evaluation of combined utilization of marble dust powder and fly ash on the properties and sustainability of high-strength concrete. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(19), 28005-28019.
- [7] Çelikten, S., & Canbaz, M. (2021). Atık Andezit Ve Mermer Tozunun Çimento Harçlarının Dayanım Özelliklerine Etkisi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(1), 43-48.
- [8] Vardhan, K., Goyal, S., Siddique, R., & Singh, M. (2015). Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement. *Construction and Building Materials*, 96, 615-621.
- [9] TS EN 196-1. (2016), Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [10] TS EN 1015-3. (2000), Kagir harcı-deney metotları-bölüm 3: taze harç kıvamının tayini (yayımla tablası ile), Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.