Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

# Ham Perlit agregasının betonun mekanik ve taşınım özeliklerine etkisi

# Effect of Raw Perlite aggregate on concrete mechanical and transport properties

*Cevdet Taha ACAR[1*], Kambiz RAMYAR[1]*

[1]İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
c.tahaacar95@hotmail.com, kambizramyar@ege.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 06.02.2023 Düzeltme Tarihi/Revision: 03.07.2023 doi: 10.5505/pajes.2023.38202
Kabul Tarihi/Accepted: 25.07.2023 Araştırma Makalesi/Research Article

**Öz**

*Bu çalışmada, Türkiye'nin iki farklı ocağından temin edilen ham perlit agregası ile üretilen beton karışımlarının mekanik ve taşınım özellikleri, kırma kireçtaşı agregası içeren beton karışımları ile kıyaslamalı olarak incelenmiştir. XRD analizi, perlit agregalarının kabaca benzer kristal bileşenleri içerdiğini göstermiştir. Ancak Erzincan perlitinin daha fazla amorf faz içerdiği görülmüştür. Ayrıca İzmir perlitinin su emmesi %7.25 ile %12.45 arasında olup su emmesi %5.08 ile %7.45 arasında değişen Erzincan perlitinin çok üzerinde olduğu saptanmıştır. Ancak 100 ve 500 devir Los Angeles deneyi ağırlık kayıplarından kullanılan agregaların yeterli ve üniform bir sertliğe sahip olduğu anlaşılmıştır. Çalışma kapsamında üç farklı su/çimento oranına sahip (0.69, 0.56 ve 0.41) 9 farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Sonuç olarak, ham perlit agregası ile üretilen betonların birim hacim ağırlıklarının hafif beton sınırları içerisinde kaldığı, kontrol betonuna oranla %15-21 daha hafif olduğu bulunmuştur. Buna karşılık Erzincan perliti içeren betonlar, benzeri kireçtaşı agregası içeren kontrol karışımlarına göre %12-41 arasında daha düşük basınç dayanımı göstermiştir. Hem mekanik hem de taşıma özellikleri açısından en düşük performans İzmir perlit agregalı beton karışımlarından elde edilmiştir.*

**Anahtar kelimeler:** Perlit agregası, hafif beton, basınç dayanımı, basınç altında su işleme, kapiler yolla su emme, klor iyonu geçirgenliği

**Abstract**

*In this study, the mechanical and transport properties of concrete mixtures containing two raw perlite aggregates, obtained from two different quarries in Turkey, were compared with those of the concrete produced with crushed limestone aggregate. XRD analysis of the perlites showed that the aggregates contain roughly similar crystal components. However, Erzincan perlite was found to contain more amorphous phases. Moreover, water absorption of İzmir perlite ranged from 7.25 to 12.45% which was far above that of the Erzincan perlite with water absorption ranging from 5.08 to 7.45%. However, the 100 and 500 cycles Los Angeles weight losses revealed that the aggregates had a suffient and uniform hardness. Within the scope of the study, 9 concrete mixtures with three different water/cement ratios (i.e., 0.69, 0.56 and 0.41) were prepared. It was found that the unit weights of the concretes produced with raw perlite aggregate remained within the limits of lightweight concrete and were 15-21% lighter than those of the control concretes. Moreover, the Erzincan perlite-bearing concretes showed 12-41% lower compressive strength that those of the control mixtures. The lowest performance in terms of either mechanical or transport properties were obtained in the İzmir perlite aggregate-bearing concrete mixtures.*

**Keywords:** Perlite aggregate, lightweight concrete, compressive strength, water treatment under pressure, capillary water absorption, chloride ion penetration

Düzenlenmemiş Sürüm - Uncorrected Version

## 1 Giriş

Günümüzde çok yaygın olarak kullanılan betonun dünya çapında tüketiminin yıllık 11 milyar tona yaklaştığı tahmin edilmektedir [1]. Temel olarak çimento, agrega, su ve katkı maddelerinden oluşan beton hacminin yaklaşık %65-80'ini agrega fazı oluşturmaktadır. Doğal afetler, restorasyon, mevcut betonarme binaların yıkılması ve yenilenmesi, yeni yapıların inşası vb. sebepler nedeniyle dünyadaki doğal agrega kaynakları gün geçtikçe tükenmekte ve özellikle büyük şehirlerde agregaların temini zorlaşmaktadır. Bu nedenle yeni ve düşük maliyetli kaynak arayışları ortaya çıkmaktadır [2],[3].

Volkanik kökenli olan ham perlit, amorf yapısı ve kimyasal bileşiminden dolayı ilgi çekici bir yapıdadır. Kimyasal yapısı ağırlıklı olarak %70-75 $SiO_2$ ve %12-18 $Al_2O_3$'ten oluşmaktadır [1],[4]. Türkiye 4.5 milyar ton rezervi ile dünyanın en büyük perlit yataklarından birine sahiptir. Ülkemizde kayda değer miktarda bulunan perlit madeninin değeri yeterli ölçüde anlaşılamadığından bu ürün inşaat sektöründe yeterli oranda kullanılmamaktadır. Perlitin kullanıldığı hafif yapı elemanları ve beton agregaları daha çok modern inşaat teknolojilerinin kullanıldığı yapılarda tercih edilmektedir. İnşaat sektöründe ham ve genleştirilmiş perlit kullanımının teşvik edilmesi sağlanmalıdır [5],[6],[7]. Perlit, yapının depreme karşı direncinde, ısı ve ses yalıtımında etkili bir malzemedir. Bu özelliklerinden dolayı inşaat sektöründeki ekonomiye pozitif yönde katkı sağladığı bildirilmiştir [8].

Gelişmiş ülkelerde oluşan depremlerin büyük kayıplarla sonuçlanmamasının nedeni inşaat sektöründeki gelişmelerin sahada uygulanması, binalarda uygun malzemelerin doğru şekilde kullanılması ve binaların ölü yükünü azaltarak sağlanmaktadır [9].

Perlitin ince agrega yerine hacimce %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kullanılan bir çalışmada 5 farklı beton karışımı hazırlanmıştır. %15 ikameli karışımın 28 günlük basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı sırasıyla 42 MPa, 4.5 MPa ve 8 MPa olarak elde edilmiştir. Kontrol karışımının benzer özelikleri sırasıyla 41 MPa, 4.3 MPa ve 7.6 MPa olarak ölçülmüştür. Perlit ikame oranı arttıkça betonun birim hacim ağırlığının azaldığı, bu azalmanın %20 ikame oranında yaklaşık olarak 400 kg/m³ olduğu belirlenmiştir. Sonuçta, perlit kumu

*Yazışılan yazar/Corresponding author

için optimum ikame oranı, geleneksel betonun işlenebilirliği ve mekanik özelliklerinden ödün vermeden %15 olarak açıklanmıştır [10].

Yapılan bir doktora çalışmasında ham perlit agregası kullanılarak yüksek dayanımlı hafif beton üretilmiştir. Çalışmada maksimum tane büyüklüğü 12.5 mm olan perlit agregası kullanılarak 0.3, 0.4 ve 0.5 olmak üzere 3 farklı su/çimento oranı ve beş farklı dozajda 23 farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Perlit agregalı betonların birim ağırlıklarının 1830 ile 1915 kg/m$^3$ arasında olduğu ve bu değerlerin normal betonun birim ağırlığından %20 oranında az olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak perlit agregası ile yüksek dayanımlı hafif beton üretmenin mümkün olduğu ve 90 günlük basınç dayanımının 660 kg/m$^3$ bağlayıcı içeren karışımda 100 MPa'ya ulaştığı görülmüştür. Perlit agregası içeren karışımların elastisite modüllerinin 17 ile 25 GPa arasında olduğu rapor edilmiştir [11].

Benzer bir diğer çalışmada ham ve genleştirilmiş perlit agregasının hafif beton üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Karışımlarda çimento dozajının artmasıyla perlit agregasıyla üretilen betonların basınç dayanımının arttığını gözlemlenmiştir. Ham perlit agregalı hafif betonların en küçük basınç dayanımı 10 MPa, en yüksek basınç dayanımı ise 37.9 MPa bulunmuştur. Genleştirilmiş perlit agregalı betonların 28 günlük basınç dayanımları kontrol numunesine göre ortalama 5 MPa daha düşük olduğu ve en küçük basınç dayanımı 34.8 MPa, en yüksek basınç dayanımı ise 40.8 MPa bulunmuştur. Üretilen hafif betonların birim hacim ağırlıkları hafif beton için belirlenen sınırın içerisinde olduğu açıklanmıştır [12].

Yapılan bir başka çalışmada, doğal kumun yerine %5, 10, 15 oranlarında genleştirilmiş perlit agregası kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB) 5 farklı koşulda kürlenmiştir. Genleştirilmiş perlit agregasının kullanımıyla betonun kılcallık katsayısının ve görünür gözenekliliğinin arttığı tespit edilmiştir. Basınç dayanımı değerleri 38.3 ile 53.9 MPa aralığında bulunmuştur. Havada kürleme koşulu haricinde bütün kürleme koşullarında dayanım seviyeleri kontrol karışımına kıyasla genleştirilmiş perlit oranının artmasıyla azalmıştır [13].

Genleştirilmiş perlit agregası ve perlit tozunun betonda kullanımıyla ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ancak ham perlitin agrega olarak betonda kullanılmasıyla ilgili araştırma sayısı azdır. Bu çalışmada düşük maliyetli ve yerel kaynaklarımızdan biri olan ham perlitin betonda agrega olarak kullanılması araştırılmıştır. Böylece üretilen betonların mekanik ve taşınım özellikleri değerlendirilerek literatürdeki bilgi birikiminin artırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla iki farklı yöreden (İzmir ve Erzincan) temin edilen ve maksimum tane büyüklüğü ($D_{max}$) 8 mm olan ham perlit agregaları ve benzer tane büyüklüğü dağılımına sahip kırma kireçtaşı agregası ile üretilen betonlar kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında üç farklı su/çimento oranına sahip 9 farklı beton karışımının mekanik özelikleri ve geçirimliliği araştırılmıştır. İlk olarak çalışmada kullanılan İzmir perlit agregasının betondaki davranışı Erzincan perliti ve kırma kireçtaşı agregası içeren betonların özellikleri ile kıyaslamalı olarak araştırılmıştır.

# 2 Materyal ve Metot

## 2.1 Materyal

Çalışmada kırma kireçtaşı ve 2 farklı ocaktan temin edilen ham perlit agregası, CEM I 42.5R tipi bir çimento, bir çeşit su azaltıcı katkı ve İzmir ili Bornova ilçesi şebeke suyu kullanılmıştır.

### 2.1.1 Agrega

Beton karışımlarında kullanılan ince ve iri ham perlit agregaları Erzincan/Mollaköy ve İzmir/Yeniköy ocaklarından alınmıştır. Perlit agregalarının üreticisinden alınan kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de, TS EN 1097-6 [14] standardına göre belirlenen fiziksel özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Perlit agregalarının kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Table 1. Chemical and physical properties of perlite aggregates.

| Analiz Edilen Bileşen | İzmir (%) | Erzincan (%) |
|---|---|---|
| $SiO_2$ | 72.11 | 72.46 |
| $Al_2O_3$ | 12.62 | 13.36 |
| $Fe_2O_3$ | 1.48 | 1.24 |
| CaO | 1.74 | 1.04 |
| MgO | 0.21 | 0.08 |
| $Na_2O$ | 1.96 | 3.97 |
| $K_2O$ | 5.09 | 4.44 |
| Kızdırma Kaybı | 4.58 | 3.30 |

Tablo 2. Agregaların fiziksel özellikleri.

Table 2. Physical properties of aggregates.

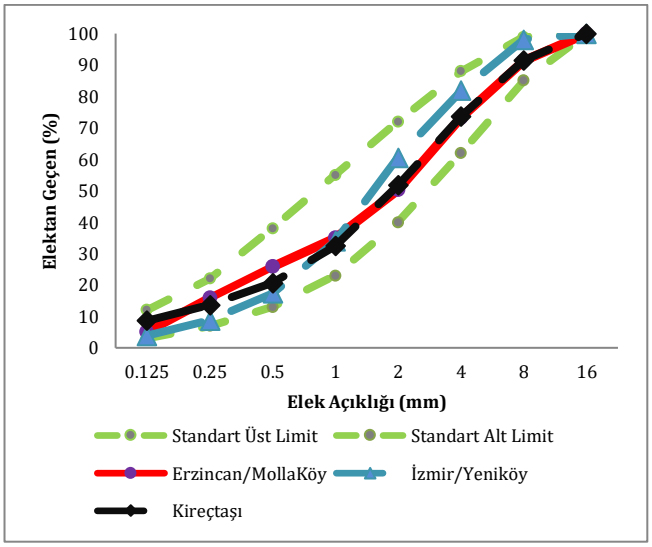
| Agregalar | Su Emme Kapasitesi (%) | Özgül ağırlık (DYK) |
|---|---|---|
| İzmir Perliti (0-4 mm) | 12.45 | 1.90 |
| İzmir Perliti (0-8 mm) | 7.25 | 2.02 |
| Erzincan Perliti (0-4 mm) | 7.45 | 2.10 |
| Erzincan Perliti (0-8 mm) | 5.08 | 2.12 |
| Kireçtaşı (0-4 mm) | 1.79 | 2.64 |
| Kireçtaşı (5-15 mm) | 1.06 | 2.66 |

Bir başka çalışmada Erzincan/Mollaköy (0-15 mm) ham perlit agregasının DYK özgül ağırlığı 2.16, su emme kapasitesi ise %5.9 olarak bulunmuştur [15].

0/4 ve 4/12 mm boyutlarında bulunan agregaların gradasyon eğrileri mümkün olduğu kadar yakın olacak şekilde oranlanmıştır. Agrega karışımlarının gradasyon eğrisi ve TS 802 standart [16] sınırları Şekil 1'de sunulmuştur.

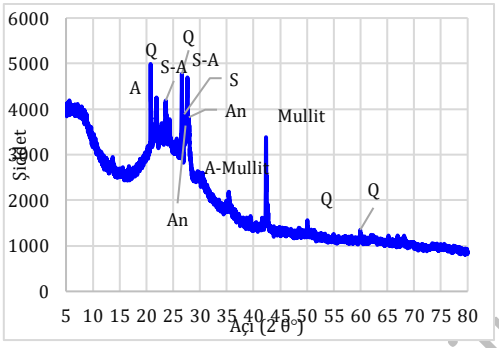
Perlit agregalarında yer alan kristal fazların ve amorf yapı varlığının belirlenmesi amacıyla, toz perlitler İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarlarında XRD analizine tabi tutulmuştur. 5-80 (Cu, Kα) 2θ°arasında yapılan analizde ''Panalytical Marka" cihaz kullanılmıştır. Şekil 2'den anlaşıldığı gibi analiz sonucu Erzincan perlitinde Kuvars (Q), Sanidin (S), Anortit (An) ve Mullit mineralleri varlık göstermiştir. İzmir perlitinde benzer kristallere rastlanmıştır. Ancak bu perlitte Mullit yerine Muskovit (Mus) kristali görülmüştür. Montmorillonit gibi kil mineralinin lava karışarak perlitin yapısına girmesi muhtemeldir. Spektrumlarda görülen, 20-25 iki teta derecesi arasında tavan yapan kamburlardan her iki perlitte amorf fazların da yer aldığı anlaşılmaktadır. Bu durumun Erzincan perlitinde daha da belirgin olduğu vurgulanmalıdır.

Düzeltilmemiş Sürüm - Uncorrected Version



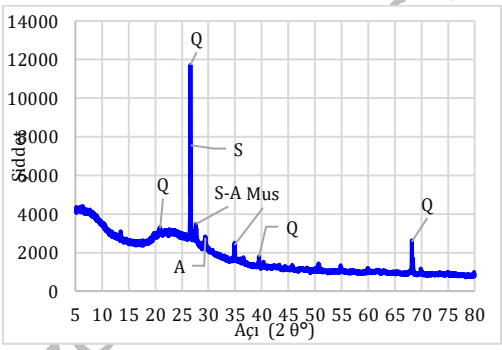

Şekil 1. Agregaların gradasyon eğrisi ve TS 802 standart sınırları.

Figure 1. Grading curves of aggregates and TS 802 standard limits.




Şekil 2. Erzincan perliti XRD spektrumu.

Figure 2. Erzincan perlite XRD spectrum.




Şekil 3. İzmir perlitinin XRD spektrumu.

Figure 3. XRD spectrum of İzmir perlite.

Çimento inceliğine yakın olacak şekilde (3250±50 cm²/g Blaine inceliği) öğütülen perlit tozlarının dayanım aktivite indekslerini belirlemek için üretilen harçların basınç dayanımı Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Harç karışımlarının basınç dayanımları (MPa).

Table 3. Compressive strength of mortar mixes (MPa).

| Karışım | 7.Gün | 28.Gün |
|---|---|---|
| İzmir | 18.3 | 24.6 |
| Erzincan | 18.2 | 27.4 |
| Kontrol | 27.9 | 32.7 |

ASTM C311/C311M [17] standardına göre 0.48 su/bağlayıcı oranında ve standart kum kullanılarak hazırlanan harç karışımlarının yayılma değeri 16.5±1 cm arasında değişmiştir. Sonuçta, İzmir perlit tozunun 7 ve 28 günlük dayanım aktivite indeksinin sırasıyla %65 ve %75 olduğu, benzer değerlerin Erzincan perlit tozunda %66 ve %84 olduğu saptanmıştır.

Agregaların parçalanmaya karşı direnci (Los Angeles darbeli aşınma direnci) ASTM C131/C131M [18] standardına uygun olarak belirlenmiştir. 100 ve 500 devir sonundaki ağırlık kayıpları Tablo 4'te sunulmuştur. Perlit agregalarının Los Angeles ağırlık kayıplarının kireçtaşından daha yüksek olduğu ancak üç agreganın üniform ve yeterli sertliğe sahip olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 4. Agregaların Los Angeles parçalanma direnci.

Table 4. Los Angeles degradation resistance of aggregates.

| Agrega Türü | $L_{100}$ Kayıp Oranları (%) | $L_{500}$ Kayıp Oranları (%) |
|---|---|---|
| İzmir Perliti | 10.4 | 44.9 |
| Erzincan Perliti | 7.6 | 36.3 |
| Kırma Kireçtaşı | 3.7 | 23 |

### 2.1.2 Su Azaltıcı Katkı

Çalışmada üretilen betonların hedeflenen çökme değerini (5±2 cm) elde etmek için, gerektiğinde bir çeşit polikarboksilat eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Tablo 5'te üretici firmadan temin edilen akışkanlaştırıcı katkının özellikleri yer almaktadır.

Tablo 5. Akışkanlaştırıcı katkının teknik özellikleri.

Table 5. Technical properties of plasticizer admixture.

| | |
|---|---|
| Görünümü | Kahverengi - Sıvı |
| Özgül Ağırlık | 1.069 - 1.109 kg/lt |
| pH Değeri | 5 - 7 |
| Alkali içeriği (%) | ≤ 3 (Kütlece) |
| Klor iyon içeriği (%) | ≤ 0.1 (Kütlece) |
| Betonda Kullanma Oranı (çimento ağırlığının %'si] | 0.8 - 1.5 |

### 2.1.3 Su

Beton üretiminde, pH değeri 7.4 olan İzmir ili, Bornova İlçesi şebeke suyu kullanılmıştır.

### 2.1.4 Çimento

Beton karışımlarında kullanılan CEM I 42.5R çimentosunun kimyasal, fiziksel ve dayanıklılık özellikleri Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. CEM I 42.5R çimentosunun kimyasal, fiziksel ve dayanım özellikleri.

Table 6. Chemical, physical and strength properties of CEM I 42.5R cement.

| Kimyasal Özellikleri | | Fiziksel Özellikleri | |
|---|---|---|---|
| Oksit kompozisyonu % | Analiz sonuçları | | |
| CaO | 63.46 | Yoğunluk (g/cm³) | 3.11 |
| $SiO_2$ | 19.34 | Özgül yüzey (cm²/g) | 3335 |

Düzeltilmiş Sürüm - Uncorrected Version

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $Al_2O_3$ | 5.12 | 90 µ elekte kalan | | 1.1 |
| $Fe_2O_3$ | 2.69 | 32 µ elekte kalan | | 22.8 |
| $SO_3$ | 3.31 | Diğer Özellikleri | | |
| MgO | 1.43 | | | |
| $Na_2O$ | 0.42 | | | |
| $K_2O$ | 0.79 | Priz süresi (dakika) | Başlangıç | 145 |
| Toplam alkali-$Na_2O$ Eşdeğer | 0.94 | | Bitiş | 185 |
| $Cl^-$ | 0.01 | Hacim genleşmesi (mm) | | 2 |
| Kızdırma kaybı | 3.14 | Basınç dayanım (MPa) | 2-G | 24.2 |
| Çözünmeyen kalıntı | 0.23 | | 28-G | 53.2 |

### 2.2 Metot

Çalışma kapsamında üretilen beton karışımlarına uygulanan deneyler ve ilgili standartlar Tablo 7'de verilmiştir. Makalede sunulan özelikler, üç numune üzerinden elde edilen sonuçların ortalamasıdır.

Tablo 7. Uygulanan deneyler ve ilgili standartlar.

Table 7. Applied tests and related standards.

| Betonlarda Yapılan Deneyler | Numune Yaşı (Gün) | İlgili Standart | Numune Şekli ve Boyutu |
|---|---|---|---|
| Basınç Dayanımı | 3, 7, 28 | TS EN 12390-3 [19] | 10x20cm Silindir |
| Yarmada Çekme Dayanımı | 7, 28 | TS EN 12390-6 [20] | 10x20cm Silindir |
| Elastisite Modülü | 7. 28 | ASTM C469 [21] | 10x20cm Silindir |
| Basınç Altında Su İşleme Derinliği | 28 | TS EN 12390-8 [22] | 15cm Küp |
| Kapiler Yolla Su Emme | 28 | ASTM C1585-20 [23] | 10cm Küp |
| Su Emme | 28 | TS EN 12390-7 [24] | 10cm Küp |
| Klor İyonu Geçirgenliği | 28 | ASTM C1202 [25] | 10x5cm Silindir |

#### 2.2.1 Beton karışımlarının hazırlanması

Çalışma kapsamında ham perlit ve kireçtaşı agregalarıyla, 0.69, 0.56 ve 0.41 olmak üzere 3 farklı su/çimento (S/Ç) oranında 9 farklı beton karışımı hazırlanmıştır (Tablo 8). Beton karışımları S/Ç oranı ve agrega türüne (E: Erzincan perliti, İ: İzmir perliti ve K: kireçtaşı) göre adlandırılmıştır. Örneğin, 0.69E; Erzincan perliti içeren ve S/Ç oranı 0.69 olan karışımı göstermektedir. TS EN 12390-2 [26] standardına göre hazırlanan numuneler 1 gün sonra kalıptan çıkarılmış olup deney gününe kadar standart koşullarda kürlenmiştir. Beton karışımlarında her S/B oranında çimento ve su içerikleri sabit tutulmuştur. Hedef çökme değerini (5±2 cm) elde etmek için gerekirse su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Betonların ölçülen ve teorik birim hacim ağırlıkları arasında kayda değer fark olmadığından, Tablo 10'de teorik içerikler verilmiştir.

## 3 Bulgular ve Tartışma

### 3.1 Basınç Dayanımı

Perlit ve kireçtaşı agregalarından üretilen beton karışımlarının 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları Tablo 8'de verilmiştir. Tabloda ayrıca her karışımın ilk 3 ve 7 günde 28 günlük dayanımının yüzde kaçını kazandığı gösterilmiştir.

Tablo 8. Beton karışımlarının basınç dayanımı (MPa).

Table 8. Compressive strength of concrete mixtures (MPa).

| Karışım | 3.Gün | 7.Gün | 28.Gün | 3/28 (%) | 7/28 (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.69-E | 9.39 | 12.66 | 17.71 | 53 | 71 |
| 0.56-E | 15.03 | 21.05 | 24.88 | 50 | 85 |
| 0.41-E | 23.11 | 32.31 | 35.82 | 64 | 90 |
| 0.69-İ | 4.07 | 7.19 | 10.70 | 38 | 67 |
| 0.56-İ | 7.96 | 10.24 | 14.23 | 56 | 72 |
| 0.41-İ | 9.86 | 12.13 | 17.67 | 56 | 69 |
| 0.69-K | 14.68 | 21.58 | 25.51 | 58 | 85 |
| 0.56-K | 17.07 | 27.78 | 35.11 | 49 | 79 |
| 0.41-K | 30.50 | 41.87 | 45.96 | 66 | 91 |

Tablo 8'deki karışımların basınç dayanımına bakıldığında her yaş ve s/ç oranında en düşük dayanım seviyesi İzmir perliti ile üretilen betonlarda görülmüştür. Kireçtaşı agregası içeren kontrol karışımlarına en yakın dayanım değerleri Erzincan perliti ile üretilen betonlarda elde edilmiştir. Erzincan perlit agregasıyla yapılan bir başka çalışmada, 300 kg/m$^3$ çimento içeren ve S/Ç oranı 0.49 olan betonların 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları sırayla; 22, 25 ve 34 MPa olarak bulunmuştur [15]. Tarafımızdan yapılan çalışmada kireçtaşı agregası içeren benzer betonlara kıyasla, Erzincan perliti kullanılan betonlarda %12-41 arasında dayanım kaybı tespit edilmiştir. Dayanım kaybının genelde 0.69 S/Ç oranı olan betonda ve erken yaşta daha bariz olduğu anlaşılmıştır. Söz konusu dayanım kaybının İzmir perliti içeren karışımlarda %53-72 arasında olduğu; bu karışımlarda da bazı istisnalar dışında, genelde 0.69 S/Ç oranına sahip betonlarda dayanım kaybının daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

### 3.2 Yarmada Çekme Dayanımı

Perlit ve kireçtaşı agregalarından üretilen beton karışımlarının 7 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımları Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Beton karışımlarının yarmada çekme dayanımları (MPa).

Table 9. Splitting tensile strength of concrete mixes (MPa).

| Karışım | 7.Gün | 28.Gün |
|---|---|---|
| 0.69-E | 1.58 | 1.90 |
| 0.56-E | 1.71 | 2.08 |
| 0.41-E | 1.90 | 2.45 |
| 0.69-İ | 0.83 | 1.13 |
| 0.56-İ | 1.06 | 1.54 |
| 0.41-İ | 1.45 | 1.71 |
| 0.69-K | 2.06 | 2.37 |
| 0.56-K | 2.49 | 2.68 |
| 0.41-K | 2.63 | 3.14 |

Düzeltilmemiş Sürüm - Uncorrected Version

Tablo 10. Betonların karışım oranları (kg/m³).

Table 10. Proportions of concrete mixtures (kg/m³).

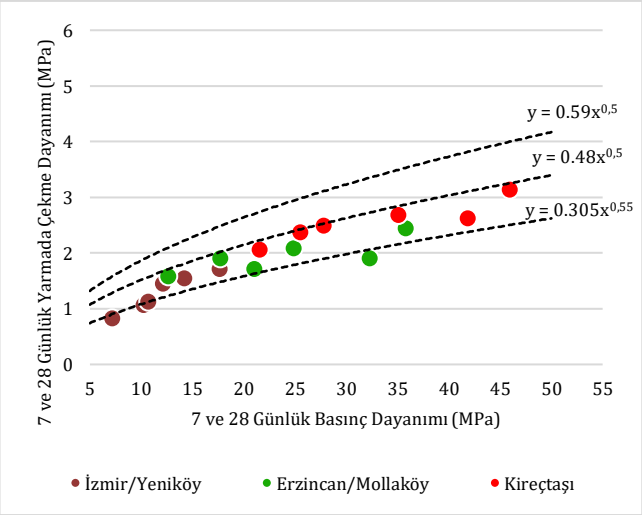
| Karışımlar | Çimento | Su | DYK Perlit Agregası | | DYK Kireçtaşı Agregası | | Su azaltıcı Katkı | Teorik BHA | Ölçülen BHA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0-4 mm | 4-8 mm | 0-4 mm | 4-12 mm | | | |
| 0.69E | 300 | 208 | 1139 | 285 | - | - | 1.4 | 1932 | 1901 |
| 0.69İ | 300 | 208 | 849 | 457 | - | - | 1.4 | 1815 | 1791 |
| 0.69K | 300 | 208 | - | - | 1432 | 358 | - | 2297 | 2307 |
| 0.56E | 340 | 189 | 1149 | 287 | - | - | 2.3 | 1967 | 1932 |
| 0.56İ | 340 | 189 | 856 | 461 | - | - | 3.1 | 1850 | 1853 |
| 0.56K | 340 | 189 | - | - | 1443 | 361 | - | 2333 | 2363 |
| 0.41E | 420 | 172 | 1136 | 284 | - | - | 2.5 | 2013 | 1978 |
| 0.41İ | 420 | 172 | 847 | 456 | - | - | 3.9 | 1898 | 1914 |
| 0.41K | 420 | 172 | - | - | 1427 | 357 | 3.9 | 2380 | 2340 |

Tablo 9'da görüldüğü gibi karışımların yarmada çekme dayanımı, su/çimento oranının artışı ile beklendiği gibi azalmıştır. En düşük dayanım değerleri İzmir perliti kullanılan karışımlarda bulunmuştur.

Erzincan perlit agregası içeren karışımların 7 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımında, kireçtaşı agregası kullanılarak hazırlanan benzer karışımlarına kıyasla sırayla; %23-31 ve %19-22 seviyesinde, İzmir perlit agregası içeren karışımlarda ise sırayla; %44-60 ve %42-52 seviyesinde düşüş gözlemlenmiştir.

Erzincan perlit agregasıyla yapılan bir başka çalışmada, 300 kg/m³ çimento ve S/Ç oranı 0.49 kullanılarak üretilen betonların 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları 2.3-2.9 MPa olarak bulunmuştur [15].

Farklı araştırmacılar tarafından normal agrega içeren (geleneksel) betonların basınç ve yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki bazı ampirik formüller ile ifade edilmiştir. Bu denklemler kullanılarak oluşturulan grafikler ve deneysel çalışmada elde edilen veriler Şekil 4'te verilmiştir. Karışımlara ait değerlerin, geleneksel betonlar için önerilen alt ve orta sınır arasında olduğu görülmüştür [27],[28].




Şekil 4. Karışımların 7 ve 28 günlük yarmada çekme ve basınç dayanımı arasındaki ilişki.

Figure 4. Relationship between 7 and 28-day splitting tensile and compressive strength of mixtures.

### 3.3 Elastisite Modülü

Araştırmada üretilen betonların 7 ve 28 günlük kiriş elastisite modülü Tablo 11'de verilmiştir. Kiriş modülünün belirlenmesinde gerilmenin betonun basınç dayanımının %40'ı olan ve birim deformasyonun $5x10^{-5}$ mm/mm mertebesinde olan noktalar dikkate alınmıştır.

Tablo 8. Beton karışımlarının elastisite modülleri (GPa).

Table 8. Elastic modul of concrete mixes (GPa).

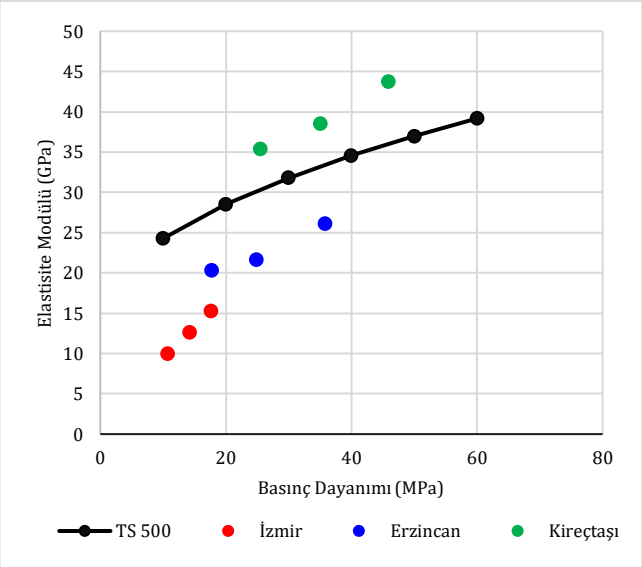
| Karışım | 7.Gün | 28.Gün |
|---|---|---|
| 0.69-E | 15.12 | 20.28 |
| 0.56-E | 18.31 | 21.67 |
| 0.41-E | 22.72 | 26.08 |
| 0.69-İ | 7.51 | 9.99 |
| 0.56-İ | 10.25 | 12.58 |
| 0.41-İ | 12.37 | 15.22 |
| 0.69-K | 27.65 | 35.35 |
| 0.56-K | 32.01 | 38.50 |
| 0.41-K | 36.74 | 43.73 |

Tablo 11'deki elastisite modülü değerlerine bakıldığında diğer mekanik özeliklerdeki gibi elastisite modülünde de en düşük değerler İzmir perlit agregası içeren karışımlardan elde edilmiştir. Kontrol karışımlarının 7 günlük elastisite modülü yaklaşık 27-36 GPa aralığındayken, Erzincan perliti içeren karışımlarda elastisite modülü, kontrol karışımlarına kıyasla %38-45 aralığında, İzmir perliti içeren karışımlardaysa %66-73 aralığında azalmıştır. Benzeri azalma 28 günlük örneklerde sırasıyla %40-43 ve %65-72 aralığında olmuştur. Her beton türünün 0.41 S/Ç oranına sahip karışımının elastisite modülü baz alındığında; S/Ç oranının 0.56 ve 0.69'a yükseltilmesi, Erzincan perliti içeren betonda sırasıyla yaklaşık %19 ve %33 elastisite modülü kaybına neden olmuştur. Benzer değerler İzmir perliti ve kireçtaşı agregası içeren betonlarda sırasıyla %17-39 ve %12-24 olmuştur. Buradan perlit agregası içeren betonların elastisite modülü, karışımın S/Ç oranının artışından daha fazla olumsuz etkilendiği sonucuna varılmıştır.

Beton karışımlarının 28 günlük basınç dayanımı ile elastisite modülleri arasındaki ilişki Şekil 5'te gösterilmiştir.

Aynı şekilde, bu konuda TS 500 standardında [29] önerilen denklem (3250 x $\sqrt{f_{ckj}}$ + 14000 MPa) dikkate alınarak çizilen eğriye de yer verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi standartta önerilen denklem, kireçtaşı agregası içeren betonların elastisite modülünü deneysel değerin altında, perlit agregası içeren karışımların ise deneysel değerin üstünde tahmin etmektedir. Bu yanılma İzmir perliti içeren (düşük dayanımlı betonlar) karışımlarda daha da çarpıcı olmuştur.

Sürüm - Uncorrected Version

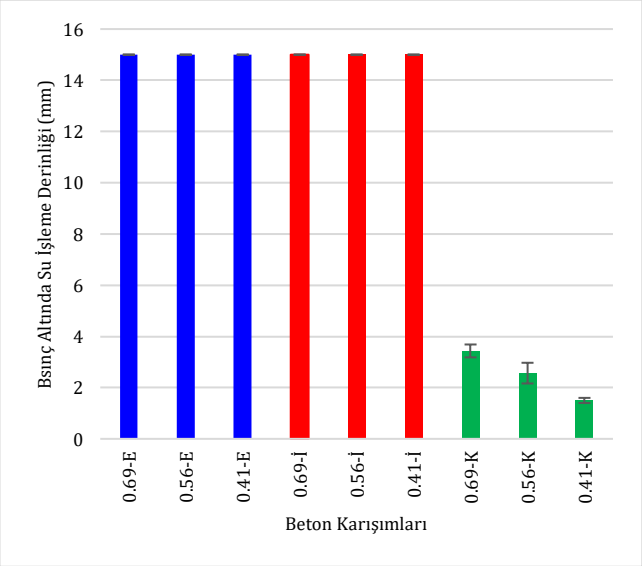



Şekil 5. Karışımların 28 günlük basınç dayanımı ve elastisite modülleri arasındaki ilişkisi.

Figure 5. Relationship between 28-day compressive strength and elastic modul of mixtures.

### 3.4 Basınç Altında Su İşleme Derinliği

28 günlük 150 mm küp numuneler üzerinde ölçülen basınç altında su işleme derinliği Şekil 6'da sunulmuştur.



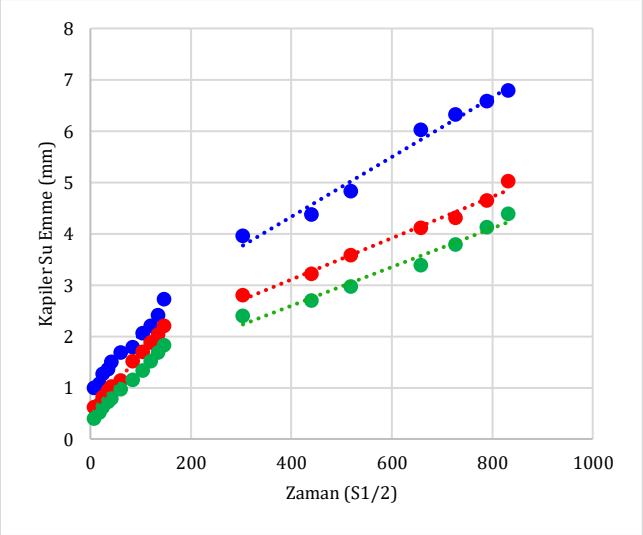

Şekil 6. 28 günlük 150 mm küp numunelere basınç altında su işleme derinliği.

Figure 6. Depth of water treatment under pressure for 150 mm cube samples of 28 days.

Şekil 7'de görüldüğü gibi S/Ç oranı arttıkça karışımların su işleme derinlikleri artmıştır. 0.69, 0.56 ve 0.41 S/Ç oranına sahip betonların su işleme derinlikleri kontrol karışımlarında sırasıyla; 34, 25 ve 15 mm; Erzincan ve İzmir perliti ile üretilen karışımlardaysa bütün S/Ç oranlarında 150 mm elde edilmiştir. Perlitli karışımlarda S/Ç oranından bağımsız olarak, numunelerin boydan boya basınç altında geçirimlilik göstermesi, agreganın bünyesindeki boşluklardan kaynaklanmaktadır. Bu boşluklar, geçiş bölgesi ve matriste olan boşluklar ile birleşerek suyun basınç altında geçmesi için olanak sağladığı düşünülmektedir. S/Ç oranının azalması ile su işleme derinlikleri kontrol karışımlarda %41–56 oranında azalmıştır. Başka bir çalışmada, $D_{max}$'ı 16 mm olan aynı kireçtaşı agregasından üretilen 0.6, 0.5 ve 0.4 S/Ç oranlarına sahip betonların basınç altında su işleme derinlikleri sırasıyla; 55, 39 ve 26 mm olarak bulunmuştur [2].

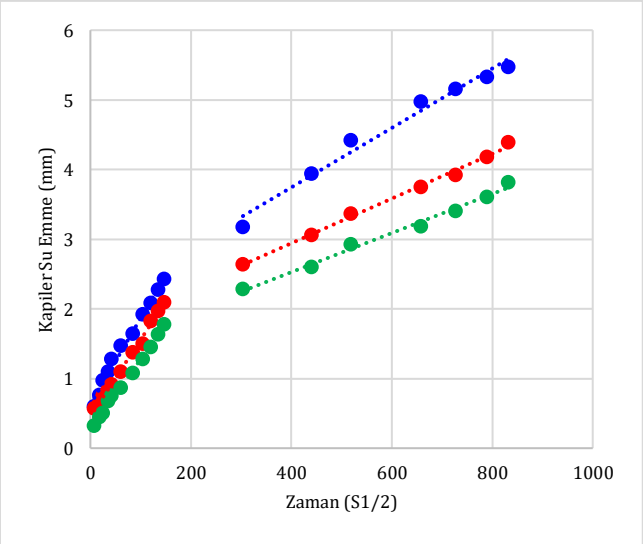
### 3.5 Kapiler Yolla Su Emme

0.69, 0.56 ve 0.41 S/Ç oranına sahip 28 günlük karışımlardan hazırlanan 100 mm ayrıtlı küp numunelerin kapiler yolla su emme deneyi sonuçları Şekil 7-8-9'da sunulmuştur. Şekillerde yer alan doğrulardan mavi olanlar İzmir perliti, kırmızı olanlar Erzincan perliti, yeşil olanlar ise kireçtaşı agregası içeren betonlardan elde edilen verileri göstermektedir.



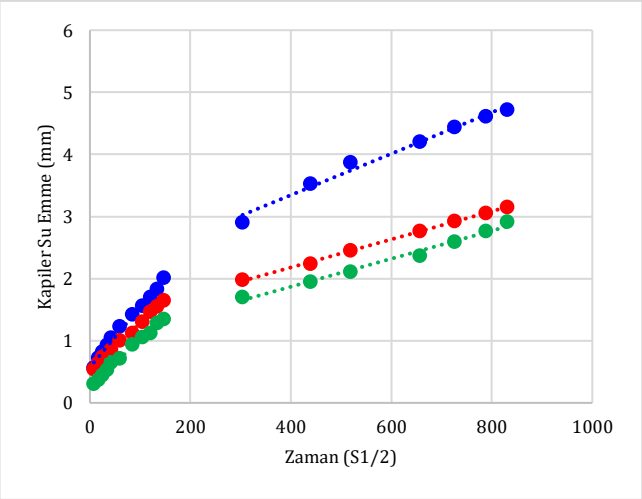

Şekil 7. 0.69 s/ç oranına sahip karışımların kılcal su emmesi.

Figure 7. Capillary water absorption of mixtures with a w/c ratio of 0.69.




Şekil 8. 0.56 s/ç oranına sahip karışımların kılcal su emmesi.

Figure 8. Capillary water absorption of mixtures with a w/c ratio of 0.56.



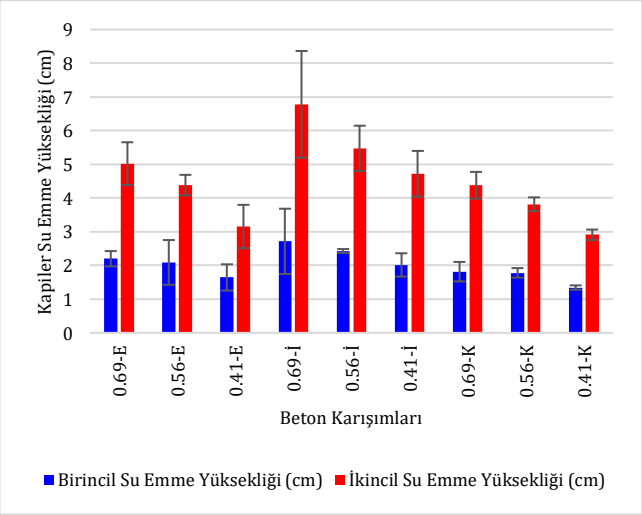

Şekil 9. 0.41 s/ç oranına sahip karışımların kılcal su emmesi.

Figure 9. Capillary water absorption of mixtures with a w/c ratio of 0.41.

S/Ç oranının artışı ile tüm karışımların kapiler yolla su emmesinin (beklendiği gibi) arttığı görülmüştür. Birincil su emme oranındaki bu artış, kontrol karışımlarında %32–35, Erzincan perliti içeren karışımlarda %27–33 ve İzmir perliti içeren karışımlarda %20–35 arasında olmuştur. Erzincan perliti içeren karışımlar kontrol karışımına kıyasla, %17–22 aralığında daha fazla birincil kapiler su emme göstermiştir. Bu artış. İzmir perliti içeren karışımlarda %36–49 aralığında olmuştur.

İkincil kapiler su emme oranları incelendiğinde Erzincan perliti içeren karışımlarda kontrol karışımına kıyasla %8–15 aralığında artış saptanmıştır. Bu artış, İzmir perliti içeren karışımlarda %43–62 aralığında olmuştur. Su/çimento oranının artışı ile ikincil kapiler su emme oranlarında kontrol karışımlarında %31–50, Erzincan perliti içeren karışımlarda %38–59, İzmir perliti içeren karışımlarda ise %16–43 seviyesinde artış kaydedilmiştir.

Kıyaslanmasını kolaylaştırmak amacıyla, deney sonuçları topluca Şekil 10'da da sunulmuştur.



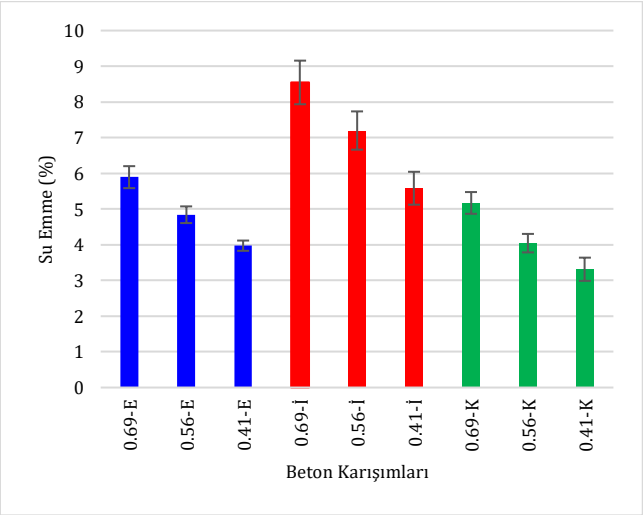

Şekil 10. Beton karışımlarının kapiler su emme yüksekliği.

Figure 10. Capillary water absorption height of concrete mixes.

$D_{max}$'ı 16 mm olan aynı kireçtaşı agregası kullanılarak yapılan bir başka çalışmada 0.6, 0.5 ve 0.4 S/Ç oranına sahip betonlarda birincil ve ikincil su işleme derinlikleri sırasıyla; 4-7, 2-4 ve 2-3 mm olarak bulunmuştur [2].

### 3.6 Su Emme

28 günlük 100 mm ayrıtlı küp numuneler üzerinde yapılan su emme deney sonuçları Şekil 11'de verilmiştir.



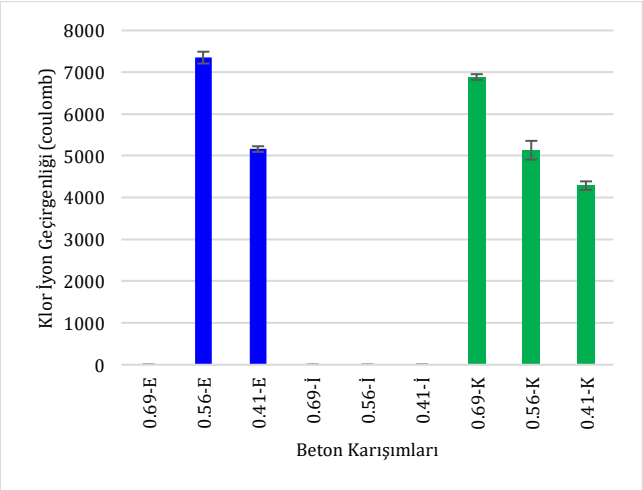

Şekil 11. 28 günlük beton karışımlarının su emme deneyi sonuçları.

Figure 11. Water absorption test results of 28-day concrete mixes.

Su emme deneyi sonuçları incelendiğinde S/Ç oranının artışı ile tüm karışımların su emme oranlarının arttığı görülmüştür. 0.69 S/Ç oranına sahip Erzincan ve İzmir perlitli karışımlarının su emmesinde kontrol karışımına kıyasla sırasıyla %14-65; 0.56 S/Ç oranındaki karışımlarda %19-78; 0.41 S/Ç oranındaki karışımlarda ise %20-68 oranında artış görülmüştür.

### 3.7 Klor İyonu Geçirgenliği

28 günlük 100 mm çapında ve 50 mm yüksekliğindeki silindir numunelerden elde edilen klor iyonu geçirgenlik deneyi sonuçları Şekil 12'de verilmiştir.




Şekil 12. 28 günlük beton karışımlarının Couloumb değerleri.

Figure 12. Couloumb values of 28-day concrete mixes.

İzmir perliti içeren tüm karışımların ve Erzincan perliti içeren 0.69 S/Ç oranına sahip karışımın geçirimliliği cihazın ölçme kapasitesini aştığından, bu numunelerde veri alınamamıştır. Veri alınabilen numunelerde ise S/Ç oranı arttıkça klor iyonu geçirimliliği artmıştır. Erzincan perlit agregası içeren karışımda S/Ç oranı 0.41'den 0.56'ya yükseldiğinde geçirimlilik değerinde %42 artış saptanmıştır. Söz konusu artış kireçtaşı agregası içeren betonda S/Ç oranının 0.41'den 0.56 ve 0.69'a yükseltilmesiyle sırasıyla %20 ve %61 olmuştur. Erzincan perlit agregasıyla yapılan bir başka çalışmada, 300 kg/m$^3$ çimento içeren ve S/Ç oranı 0.49 olan 28 günlük betonun klor iyonu geçirgenlik değerleri 2056 Couloumb olarak rapor edilmiştir [15]. Söz konusu değerin mevcut araştırmada elde edilen değerden daha az olduğu görülmüştür. Öte yandan, maksimum tane büyüklüğü 16 mm olan aynı kireçtaşı agregası kullanılarak yapılan diğer bir çalışmada 0.6, 0.5 ve 0.4 S/Ç oranına sahip betonların klor iyonu geçirgenliği sırasıyla; 4849, 4289, 3402 Couloumb olarak ölçülmüştür [2]. Bu verilerin mevcut çalışmada elde edilenlere yakın olduğu saptanmıştır.

## 4 Sonuçlar

Çalışmada kullanılan malzeme ve uygulanan deneylerden aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

1. XRD analizi, perlit agregaların kabaca benzer kristal bileşenleri içerdiğini göstermiştir. Ancak İzmir perlitinin daha az amorf faz içerdiği ve daha gözenekli olduğu saptanmıştır.

2. Perlit agregasıyla üretilen betonların kireçtaşı agregası içeren betonlara göre %15-21 daha hafif olduğu bulunmuştur.

3. S/Ç oranı ve yaşından bağımsız olarak en düşük basınç dayanımı İzmir perliti içeren betonlarda görülmüştür. Bu karışımlarda kireçtaşı agregası içeren betona kıyasla %53-72 arasında dayanım kaybı görülmüştür. Dayanım farkı 0.69 S/Ç oranına sahip betonlarda daha belirgin olmuştur.

4. Erzincan perliti ve kireçtaşı agregası içeren betonlar 7 günde 28 günlük basınç dayanımlarının ortalama %84'ünü kazanırken, bu oran İzmir perliti içeren karışımda ortalama %69 olmuştur.

5. Kireçtaşı agregası ile üretilen betonların yarmada çekme dayanımları 2.06-3.14 MPa arasında, elastisite modülleri ise 27-43 GPa arasında değişmiştir. Buna kıyasla, Erzincan perliti agregası ile üretilen betonların yarmada çekme dayanımlarında %19-31 elastisite modüllerinde ise %38-45'e varan düşüş gözlemlenmiştir. Bu azalma seviyeleri İzmir perliti içeren betonlarda sırasıyla %42-60 ve %65-73 olmuştur.

6. S/Ç oranından bağımsız olarak, perlit agregası içeren numuneler basınç altında boydan boya (150 mm) su işleme derinliği göstermiştir. Kireçtaşı agregası içeren betonlarda ise S/Ç oranı 0.69'dan 0.41'e azaltıldığında basınç altında su işleme derinliği 34 mm'den 15 mm'ye düşmüştür.

7. Su emme ve kapiler yolla su emme bakımından Erzincan perliti ve kireçtaşı içeren betonlar birbirine yakın özelik göstermiştir. İzmir perlitiyle üretilen betonların bu açılardan da performansı oldukça düşük olmuştur.

## 5 Conclusions

The following conclusions were reached from the materials used and the experiments performed in the study:

1. XRD analysis of the perlites showed that the aggregates contain roughly similar crystal components. However, it was determined that İzmir perlite contains less amorphous phase and is more porous than Erzincan perlite.

2. The concretes produced with perlite aggregate were 15-21% lighter than the concretes containing limestone aggregate.

3. Regardless of W/C ratio and age, the concretes containing İzmir perlite showed the lowest compressive strength. In these mixtures, strength loss was between 53-72% compared to concrete containing limestone aggregate. The strength difference was more pronounced in concretes with 0.69 S/C ratio.

4. While concretes containing Erzincan perlite and limestone aggregate gained 84% of their 28-day compressive strength in 7 days, this ratio was 69% in the mixture containing İzmir perlite.

5. The splitting tensile strength of the concrete produced with limestone aggregate varied between 2.06-3.14 MPa and their elastic modulus ranged between 27-43 GPa. Erzincan perlite aggregate decreased the split tensile strength and elastic modulus of concrete by 19-31% and 38-45%, respectively compared to those of the control mixtures. These reduction levels were 42-60% and 65-73%, respectively, in concretes containing İzmir perlite.

6. Regardless of the W/C ratio, samples containing perlite aggregate showed a through (150 mm) water penetration depth under pressure. Reduction of W/C ratio in concretes containing limestone aggregate from 0.69 to 0.41 decreased the water penetration depth under pressure from 34 mm to 15 mm.

7. Concretes containing Erzincan perlite and limestone showed similar characteristics in terms of water absorption and capillary water absorption. The performance of the concretes produced with İzmir perlite was also quite low in these respects.

## 6 Yazar katkı beyanı

Yazar 1, Literatür taraması, deneylerin yapılması, verilerin toplanması, yazma ve verilerin değerlendirilmesi; Yazar 2, Fikir oluşturma, tasarlama, malzeme temini, yazma ve eleştirel inceleme açısından katkı sunmuşlardır.

## 7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## 8 Kaynaklar


[1] Baradan B, Yazıcı H, Aydın S. *Beton*. Üçüncü baskı. İzmir, Türkiye, DEU Mühendislik Fakültesi Yayınları, 2022.

[2] Hosseinnezhad H. Beton Geri Dönüşüm İri Agregasının Karakterizasyonu, İyileştirilmesi ve Beton Üretiminde Kullanılması. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2022.

[3] Mehta KP. ''Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development''. *Concrete International*, 24: 23-28, 2002.

[4] Guenanou F. ''Caractéristiques physico mécaniquesdes mortiers contenant différent sajouts minéraux, exemple de la perlite'' *mémoire de Magister en Génie Civil*, USTO MB, 2014.

[5] Devlet Planlama Teşkilatı. ''Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu''. Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara, Türkiye, 2617-ÖİK: 628, 2001.


Düzeltilmemiş Sürüm - Uncorrected Version

[6] Hamamcı RB. Kompozit Malzeme Olarak Perlit Agregalı Hafif Betonun Özellikleri Üzerine Bir Araştırma. Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1998.
[7] Topçu IB, Işikdag B. ''Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete''. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 204, pp. 34-38, 2008.
[8] Azizi S. Perlit Katkılı Hafif Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.
[9] Doğan H, Şener F. ''Hafif yapı malzemeleri (pomza-perlit-ytong-gazbeton) kullanımının yaygınlaştırılmasına yönelik sonuç ve öneriler''. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Haber Bülteni 1*, 51-53, 2004.
[10] Ragul P, Hari MNT, Arunachelam N. Chellapandian M. ''An experimental study on the partial replacement of fine aggregate with perlite in cement concrete''. *Materials Today: Proceedings,* Volume 68, Part 5, Pages 1219-1224, 2022.
[11] Ulusu İ. Ham Perlit Agregası Kullanılarak Yüksek Dayanımlı Hafif Beton Üretilebilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye, 2007.
[12] Gökçe HS. Hafif Beton Üretiminde Ham ve Genleştirilmiş Perlitin Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2010.
[13] Türkmen I, Kantarcı A. ''Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete''. *Building and Environment*, Volume 42, Issue 6, Pages 2378-2383, 2007.
[14] Türk Standartları Enstitüsü. ''Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini''. Ankara, Türkiye, TS EN 1097-6, 2013.
[15] Turanlı L, Aşık M, Uzal B. ''Erzincan/Mollaköy Ham Perlit Agregasının ve Perlit Tozunun Taşıyıcı Hafif Beton Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması''. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2006.
[16] Türk Standartları Enstitüsü. ''Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları''. Ankara, Türkiye, TS 802, 2016.
[17] American Society for Testing and Materials. ''Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete''. USA, ASTM C311/C311M, 2022.
[18] American Society for Testing and Materials. ''Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine''. USA, ASTM C131/C131M, 2020.
[19] Türk Standartları Enstitüsü. ''Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayin'', Ankara, Türkiye, TS EN 12390-3, 2019.
[20] Türk Standartları Enstitüsü. ''Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm3: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini'', Ankara, Türkiye, TS EN 12390-6, 2019.
[21] American Society for Testing and Materials. ''Standard Test Method For Static Modulus Of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression''. USA, ASTM C469-14e1, 2014.
[22] Türk Standartları Enstitüsü. ''Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 8: Basınç altında su işleme derinliğinin tayini''. Ankara, Türkiye, TS EN 12390-8, 2019.
[23] American Society for Testing and Materials. ''Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes''. USA, ASTM C1585, 2020.
[24] Türk Standartları Enstitüsü. ''Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Sertleşmiş beton yoğunluğu, su emme ve boşluk oranı tayini''. Ankara, Türkiye, TS EN 12390-7, 2019.
[25] American Society for Testing and Materials. ''Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration''. USA, ASTM C1202, 2019.
[26] Türk Standartları Enstitüsü. ''Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması''. Ankara, Türkiye, TS EN 12390-2, 2019.
[27] Ahmad SH, Shah AH. ''Structural properties of high strength concrete and its implications for precast prestressed concrete''. *PCI Journal*, Vol. 30, No.6, pp 92-119, 1985.
[28] Mindess S, Young JF, Darwin D. *Concrete*. Second edition, Prentice Hall, 2003.
[29] Türk Standartları Enstitüsü. ''Beton Yapıların tasarım ve yapım kuralları''. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, TS 500, 2000.

Düzeltilmemiş Sürüm - Uncorrected Version