



Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/vyuyumfd>



Genleştirilmiş Perlit ve Poliüretan Atık Agregaların Hafif Betonların
Mekanik Davranış ve Geçirimsizlik Özelliklerine Etkileri

Fatih Özalp^{a,*}, Ömer Fatih Sak^b

^aİnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Medeniyet Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, ORCID: 0000-0001-7179-5873

^bİnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Doğuş Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, ORCID: 0000-0003-4385-4535

ÖZET

Bu çalışmanın amacı genleştirilmiş perlit malzeme ve poliüretan atık malzemelerin beton agregası olarak hafif beton üretiminde kullanılmasını araştırmaktır. Bu kapsamda, yalnızca genleştirilmiş perlit agregası, perlit ve poliüretan atık agregasının birlikte kullanıldığı ve tamamen poliüretan atık agregası kullanılan karışımlar hazırlanmıştır. Ayrıca bu karışımların mekanik özelliklerini geliştirmek için çelik ve sentetik lifler ayrı ayrı olarak karışımlara ilave edilmiştir. Karışılma amacıyla herhangi lif kullanılmayan referans karışımlarda hazırlanmıştır. Çelik ve sentetik lifler hacimce %0,5 ve %1 oranında kullanılmıştır. En yüksek eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı değerlerine sırasıyla 5,30 ve 3,05 MPa olarak sadece perlit agregası kullanılan ve %1 oranında çelik lif içeren numunelerde ulaşılmıştır. Tüm karışımlar arasında ise en düşük eğilme ve yarma çekme dayanımı değerleri ise sırasıyla 1,00 ve 0,50 MPa olmak üzere yalnızca poliüretan agregası kullanılan lif içermeyen numunelerde gerçekleşmiştir. Perlit ve poliüretan agregasının hafif betonun geçirimsizlik özelliklerine etkisi su emme ve kılcal su emme testleri ile belirlenmiştir. Poliüretan agregasının toz halde olmasından dolayı betonun su ihtiyacı perlit agregası karışımlara kıyasla çok daha fazla olmaktadır ve bu karışımların geçirimsizlik değerleri daha yüksektir. Çalışma sonucunda, perlit agregaları kullanılarak taşıyıcı özellikte yapısal hafif betonların üretilebileceği, poliüretan atık kullanılan beton karışımlarının ise mekanik dayanımlarının yapısal hafif betonlar için uygun olmadığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Genleştirilmiş Perlit, Poliüretan Atık, Lif, Hafif Beton, Mekanik Davranış, Geçirimsizlik.

Effects of Expanded Perlite and Polyurethane Waste Aggregates on Mechanical
Behavior and Permeability Properties of Lightweight Concretes

Fatih Özalp^{a,*}, Ömer Fatih Sak^b

^aDepartment of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Medeniyet University, Istanbul, Turkey, ORCID: 0000-0001-7179-5873

^bDepartment of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Doğuş University, İstanbul, Türkiye, ORCID: 0000-0003-4385-4535

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the use of expanded perlite material and polyurethane waste materials as concrete aggregate in the production of lightweight concrete. In this context, mixtures in which only containing expanded perlite aggregate, perlite and polyurethane waste aggregate together, and completely polyurethane waste aggregate were prepared. In addition, steel and synthetic fibers were added separately to the mixtures to improve the mechanical properties of these mixtures. Reference mixtures without any fibers were prepared for comparison. Steel and synthetic fibers were used at 0.5% and 1% by volume. The highest bending strength and splitting tensile strength values, 5.30 and 3.05 MPa, respectively, were reached in samples using only perlite aggregate and containing 1% steel fiber. Among all mixtures, the lowest bending and splitting tensile strength values were 1.00 and 0.50 MPa, respectively, in samples using only polyurethane aggregate and containing no fibres. The effect of perlite and polyurethane aggregate on the permeability properties of lightweight concrete was determined by water absorption and capillary water absorption tests. Since polyurethane aggregate is in powder form, the water requirement of concrete is much higher than mixtures containing perlite aggregate, and the permeability values of these mixtures are higher. As a result of the study, it was determined that structural lightweight concretes could be produced using perlite aggregates, whereas the mechanical strength of concrete mixtures using polyurethane waste was insufficient for structural lightweight concretes.

Keywords: Expanded Perlite, Polyurethane Waste, Fiber, Lightweight Concrete, Mechanical Behavior, Permeability.

1. Giriş

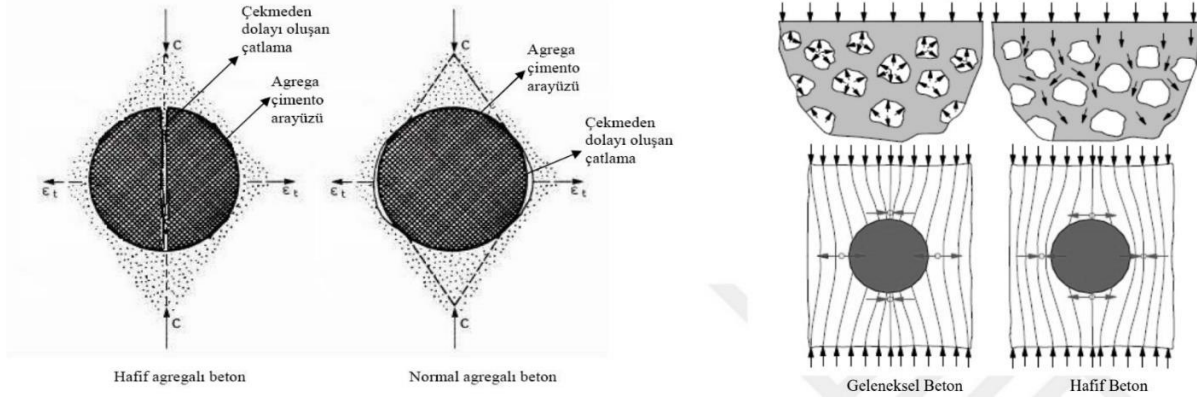
Günümüzde birçok doğal veya endüstriyel atık durumdaki malzeme beton bileşen malzemeleri yerine doğrudan ikame edilerek ya da beton bileşenlerinin bazıları ile birlikte olarak kullanılabilir. Bu malzemeler çimento üretiminde yakıt, klinker hammaddesi veya mineral katkı olarak kullanılabilirken beton bileşiminde ise agrega olarak kullanılabilir. Bu şekilde farklı malzemeleri değerlendirmek, depolama alanlarının azaltılması, doğal hammadde kullanımının en aza indirilmesi ve agrega ocaklarının maliyetlerini azaltılması gibi avantajlar sağlamaktadır [1-2].

Yapıda kullanılan temel malzeme olan “normal beton” yoğunluğu genellikle 2400 kg/m^3 civarındadır. Yoğunluğu, 2600 kg/m^3 değerinden fazla olanlar “ağır beton”, etüv kurusu durumdaki yoğunluğu 2000 kg/m^3 değerinin altında olan betonlar ise “hafif beton” olarak adlandırılmaktadır. Hafif betonlar, çimento hamurunun geliştirilmesi ya da sadece iri agrega kullanılarak üretilebileceği gibi beton bileşiminde, geleneksel agrega yerine hafif agregalar kullanılarak da üretilen betonlardır. Özellikle taşıyıcı hafif betonların üretiminde hafif agregaların kullanımı oldukça yaygındır. Hafif betonların sınıflandırılması üretim tekniğine ve malzemesine göre; ince tane içermeyen betonlar, hafif agregalı betonlar ve gaz betonları olarak; işlevlerine göre ise taşıyıcı hafif betonlar, taşıyıcı/yalıtım hafif betonları ve yalıtım hafif betonları olmak üzere üçe ayrılır [3].

Hafif beton üretiminde kullanılan agregalardan bir tanesi de perlittir. Perlit silis esaslı volkanik bir kayaç olup doğal olarak oluşmaktadır. Bu kayaç tipi geliştirildikten sonra yüksek ısı izolasyonu ve ses izolasyonu sunan bir kayaç tipidir. Dünyadaki perlit rezervinin yüksek bir bölümü ülkemizin maden yatakları içerisinde yer almaktadır. Perlit inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Genleştirilmiş perlit birim hacim ağırlığının düşük olmasından dolayı yapıların depreme olan dayanımlarına katkı sağlamaktadır. Hafif betonlarda ısı ve ses yalıtımı açısından tercih edilerek enerji verimliliği açısından ülke ekonomisine büyük katkı sağlayabilir. Hafif betonlar ve hafif agregalar inşaat sektöründe oldukça yaygın kullanılan yapı malzemeleridir. Bu yapı malzemelerinde kullanılan agregaların özelliklerine bağlı olarak, betonların birim hacim ağırlığı kullanılan hafif agregalarla düşürülebilmektedir. Hafif betonlar normal betonlara oranla; yapılarıdaki ölü yükleri azaltması, düşük işçilik maliyetleri oluşturması, ısı ve ses yalıtımı hususunda yüksek katkısı gibi üstünlükleri bulunmaktadır [4].

Perlite ısı işlem uygulanarak ortaya çıkan düşük yoğunluktaki malzemeye ise genişlemiş perlit denilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda (870 °C ve üzeri) hacmi orijinal hacminin 4–20 katı kadar artar. Bu hacim artışı ve gözenekli yapısı sonucunda geliştirilmiş perlitin su emmesi önemli ölçüde yüksektir. Ayrıca, hacminin artmasıyla ısı iletim katsayısının ve yoğunluğunun belirgin olarak azalmasından dolayı termal yalıtım için oldukça hafif ve uygun bir malzeme elde edilmiş olur. Perlit, inşaat sektöründe; çatı ve zemin izolasyonlarında, perlitli sıvalar, perlit agregalı hafif yalıtım betonu, perlit agregalı hafif yapı elemanları, ısı ve ses yalıtım amaçlı olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Perlitin inşaat dışında tarım, tıp ve kimya endüstrisinde de geniş kullanım alanları bulunmaktadır [5].

Hafif agregalı betonların normal agregalı betonlara kıyasla basınç ve çekme dayanımları nispeten daha düşüktür. Bu durumun nedeni hafif beton üretiminde kullanılan agregaların göreceli olarak düşük dayanımından kaynaklanmaktadır. Hafif agregalı betonlara yük uygulandığında agreganın dayanımı çimento harcının dayanımından düşük olduğundan dolayı kırılma işlemi agrega ile çimento ara yüzü yerine hafif agregada gerçekleşir. Normal agregalı betonlarda ise agreganın dayanımının çimento hamurundan daha fazla olmasından dolayı kırılma işlemi normal beton içerisinde en zayıf bölge olan agrega–çimento hamuru ara yüzeyinde gerçekleşir. Betonun kırılma davranışı açısından bu durum oldukça önemlidir ve hafif agregalı betonlarda agrega dayanımı arttıkça hafif betonun dayanımı da artmaktadır. Şekil 1’de normal agregalı beton ve hafif agregalı betonun yüklemeye altındaki tipik davranışı verilmektedir [6].



Şekil 1. Normal agregalı beton ve hafif agregalı betonun yüklemeye altındaki tipik davranışları [6].

Hafif betonda genişletilmiş perlit ve poliüretan malzemelerin agrega olarak kullanılmasıyla ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bazı araştırmacılar sert poliüretan köpük içeren hafif betonun performansını ve dayanıklılığını araştırmışlardır. Çalışmada, atık köpük kullanımının, malzemenin kuru yoğunluğunu %36 oranında azalttığı belirlenmiştir. Hafif beton, 8-16 MPa'lık bir basınç dayanımına ve 10-15 GPa değerinde bir dinamik elastiklik modülüne sahip olmuştur [7].

Başka bir çalışmada, poliüretan bazlı polimer betonun darbe direnci, yeni tasarlanmış bir ağırlık düşürme darbe test cihazında U şekilli numuneler kullanarak test edilmiştir. Poliüretan bazlı polimer beton numuneleri, doğal kum ve poliüretan matrisin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen numuneler geleneksel beton numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak poliüretan bağlayıcı bileşiminin darbe sürelerini ve enerji emme kapasitesini büyük ölçüde artırdığı belirlenmiştir [8]. Beton karışımındaki ana agregalar olarak perlit ve cam kumu ilavesinin incelendiği çalışmada ise genişletilmiş perlit ilavesinin betonun fiziksel özelliklerini ve dayanıklılığını iyileştirdiği bulunmuştur. Genleştirilmiş perlitin eklenmesinin cam kumuna kıyasla perlit malzemenin daha yüksek yoğunluğundan dolayı betonun mukavemetini arttırdığı değerlendirilmiştir [9].

Lif takviyeli poliüretan içeren betonun basınç dayanımı, eğilme dayanımı, işlenebilirlik ve tokluk gibi temel taze beton özellikleri ve mekanik davranışının araştırıldığı bir çalışmada geliştirilen poliüretan esaslı beton malzemenin köprü genişleme derzlerinin hızlı onarımında ve hasar tamirinde kullanılabileceği belirlenmiştir [10]. Hafif beton üretimi için poliüretan atıklarının çimento karışımlarına katılması üzerine yapılan bir diğer çalışmada poliüretan malzemenin hafif betonun ısı iletkenliği, mekanik dayanımı ve büzülmesi üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Betonda poliüretan köpük kullanımının özellikle ilk günlerde (7 gün) rötrede ciddi oranda artışa neden olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar poliüretan malzemenin yüksek sertliği ve düşük basınç dayanımı ile ilişkilendirilmiştir [11]. Genleştirilmiş perlit parçacıkları içeren çimentolu kompozitlerin farklı yaşlardaki mikro yapısı, mekanik özellikleri ve klorür penetrasyon direncinin incelendiği başka bir çalışmada ise matris ile genişmiş perlit agregalar arasında içsel kütleme etkisine atfedilebilecek kompakt bir arayüzey geçiş bölgesinin varlığı gösterilmiştir [12].

Bazı araştırmacılar atık poliüretanı hafif harç imalatında kullanmışlar ve harçların birim ağırlık değerleri, ultrasonik dalga hızları, ısı iletkenlik katsayıları gibi fiziksel özellikleri ile eğilme ve basınç dayanımı gibi mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak atık poliüretan ile imal edilen harçların EPS'li (Expanded polystyren foam) harçlara göre daha iyi performans gösterdiği ve daha yüksek eğilme ve basınç dayanımına sahip oldukları tespit edilmiştir [13]. Başka bir çalışmada polimer bağlayıcı olarak vinilester reçine, hafif agrega olarak pomza ve genişletilmiş perlit kullanarak polimer beton üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Numunelere eğilme ve basınç deneyleri yapılmıştır. Polimer betonun her iki türü değerlendirildiğinde pomza taşı ile üretilen numunenin mekanik özelliklerinin genişletilmiş perlit ile yapılan numuneye göre daha yüksek olduğu

belirlenmiştir [14]. Mermer atıklarının ve genişletilmiş perlit agreganın betonda kullanılabilirliğinin araştırıldığı bir çalışmada ise mermer atıklarının ve genişletilmiş perlit agregaların kullanılmasının betonda enerji tasarrufu sağladığı belirlenmiştir. Araştırma sonucunda geliştirilen malzemenin, ekonomik ve çevresel açıdan da faydalı olduğu tespit edilmiştir [15]. Ayrıca poliüretanla ilgili olarak demiryolu yapılarında, dolgu malzemesi alanında ve hafif harç yapımıyla ilgili olarak çeşitli araştırmalar yapılmıştır [16-18]. Ayrıca perlit esaslı geopolimer ile ilgili olarak yapılmış olan pek çok deneysel çalışma mevcuttur [19-22].

Bu çalışmada, farklı hafif agregaların ve değişik liflerin kullanılmasının hafif betonun taze ve sertleşmiş halde bazı özelliklerine etkilerini belirlemek amacı ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Karışımlarda hafif agrega olarak perlit ve poliüretan agregalar olmak üzere 2 farklı tipte agregalar kullanılmış olup tüm agregalar hava kurusu durumdadır. Ayrıca çalışmada liflerin hafif betonun mekanik özelliklerine etkisini belirlemek için çelik ve sentetik lifler olmak üzere 2 farklı tip lif kullanılmıştır. Çalışma kapsamında toplam 12 farklı tasarıma sahip beton serileri üretilmiş olup tüm karışımlar lif eklenmeden önce yaklaşık 600 mm yayılma çapı değerinde olacak şekilde hazırlanmıştır. Hafif beton karışımlarında bileşen malzeme olarak; çimento, su, hafif agrega, yüksek oranda su azaltıcı kimyasal katkı, çelik ve sentetik lifler kullanılmıştır. Bu karışımlardan küp ve kiriş numuneler üretilmiş ve numuneler 28 günlük olana kadar tüm numunelere 20°C sıcaklıkta su kürü uygulanmıştır. Kür işlemi sonrasında numunelerin basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve yarmada çekme dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca, üretilen hafif beton numunelerinin geçirimsizliği için su emme ve kılcal su emme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında hafif betonlar ile ilgili mevcut literatürden farklı olarak perlit ve poliüretan agregaların ayrı ayrı veya birlikte olarak hafif betonlarda kullanımları incelenmiştir. Ayrıca, çeşitli lifler kullanılarak bu hafif agregalarla üretilen betonların mekanik davranışı da araştırılmıştır. Böylece, genişletilmiş perlit ve atık poliüretan gibi farklı hafif agrega türlerinin ve çeşitli lifler kullanılmasının hafif betonun mekanik davranışı ve geçirimsizlik özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem

Hafif beton, çok çeşitli uygulamalar için kullanılabilen çok yönlü bir malzemedir. Hafif beton uzun yıllardan bu yana bilinmekte ve kullanılıyor olsa dahi hala mekanik davranışının ve yalıtım özelliklerinin geliştirilmesi için çalışmalar yürütülmektedir. Günümüzde değişik bağlayıcılar, agregalar ve kimyasal katkı maddelerinin kullanıldığı farklı hafif beton türleri bulunmaktadır. Bu araştırmada perlit hafif agrega ve atık durumdaki poliüretan hafif agregalar kullanılarak üretilen hafif betonların test edilmesi ve sınıflandırılması ile ilgili çalışmalar yürütülmüştür. Perlit agregası ve atık poliüretan agregalar kullanılarak hafif betonlar üretilmiş ve bu betonların taze ve sertleşmiş halde özellikleri belirlenmiştir. Beton üretiminde CEM IV / B (P) 32,5 N- Puzolanik çimentosu ve yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Beton karışımlarına %0.5 ve %1 oranda olmak üzere hacimce 2 farklı oranda çelik lifler ve sentetik lifler ayrı ayrı olarak ilave edilerek betonun mekanik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Ayrıca karşılaştırma amaçlı lif içermeyen yalın beton numuneleri de çalışma kapsamında hazırlanmıştır.

2.1. Malzemeler ve Karışım Oranları

Çalışmada CEM IV / B (P) 32,5 N- tipi katkılı çimento kullanılmıştır. Bu çimento, Portland çimento klinkerine %36-%55 arası oranda uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, kalker, gibi katkı maddelerinin ve bir miktar alçıtaşının ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) katılarak öğütülmesi ile elde edilen bir hidrolik bağlayıcıdır. Çimentonun TS EN 197-1 standardına göre bazı özellikleri Çizelge 1'de sunulmaktadır. Çimentonun özgül ağırlığı 2,85 kg/dm³ tür. Çimentonun içeriği %50 Portland Çimento Klinkeri, %40 Doğal Puzolan (Tras), %5 Kalker ve %5 Alçı taşından oluşmaktadır.

Çizelge 1. Çimento özellikleri

Temel Gereksinimler	TS EN 197-1
Ana Bileşen Klinker (K) Kütlece	% 45 - 64
Ana Bileşen Doğal Puzolan (P) Kütlece	% 36 - 55
Minör Bileşenler Kütlece	% 0 - 5
Klinker C ₃ A İçeriği	< %9
Basınç Dayanımı – 7 Günlük	> 16 MPa
Basınç Dayanımı – 28 Günlük	> 32,5 MPa - < 52,5 MPa
Priz Başlama Süresi	> 75 dakika
Genleşme	< 10mm
Sülfat Miktarı (SO ₃)	< % 3
Klorür Muhtevası (Cl)	< % 0,10
Özgül Ağırlık (H ₂ O = 1)	2,75-2,95

Bu çalışmada hafif beton tasarımlarında geliştirilmiş perlit agregası ve endüstriyel atık olan poliüretan agregası kullanılmıştır. Geliştirilmiş perlit agregası ve poliüretan atık agregasının fiziksel özellikleri Çizelge 2’de gösterilmiştir; elek analizi sonuçları Çizelge 3’te gösterilmiştir; zamana bağlı su emme miktarı ise Çizelge 4’te verilmiştir. Ayrıca bu agregaların görselleri Şekil 2’de sunulmaktadır.

Tablo 2. Perlit ve poliüretan atık agregasının fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellik	Perlit Agregası	Poliüretan Agregası
Gevşek yığın yoğunluğu (Mg/m ³)	0,11	0,49
Doğru ve yüzeyi kurutulmuş tane yoğunluğu (Mg/m ³)	0,54	0,46
Görünür tane yoğunluğu (Mg/m ³)	0,24	0,24
Etüvde kurutulmuş tane yoğunluğu (Mg/m ³)	0,14	0,17
Metilen mavisi (ml/gr)	0,25	0,25
Çok ince malzeme muhtevası (%)	8,9	13,0

Tablo 3. Perlit ve poliüretan atık agregasının elek analizi

Elek Boyutu (mm)	Perlit Agregası Geçen Miktar (%)	Poliüretan Agregası Geçen Miktar (%)
8	100	100
4	61	100
2	30	100
1	19	99
0.5	15	96
0.25	13	45
0.125	11	14
0.063	9	13

Tablo 4. Perlit ve poliüretan atık agreganın zamana bağlı su emmesi

Zaman	Perlit Agregası Su Emme (%)	Poliüretan Agregası Su Emme (%)
5 (dakika)	226	165
1 (saat)	229	166
24 (saat)	286	171



Şekil 2. Perlit ve poliüretan atık agreganın görüntüsü

Karışımlarda yüksek dayanımlı çelik lif ve polipropilen kökenli sentetik lif kullanılmıştır. Çelik lifler EN 14899-1 standardına göre üretilmiştir. Yüksek dayanımlı çelik liflerin uç kısımları betonla daha iyi aderans sağlaması ve birlikte çalışabilmesi için şekillidir. Sentetik lifler ise betona daha iyi bir tutunma için girinti ve çıkıntılı yüzey geometrisine sahiptir. Liflerin çekme mukavemetinin yanında betonla aderansları da önemlidir. Aksi takdirde lifler betondan sıyrılma şeklinde davranış gösterebilirler ve bu durum liflerin çekme dayanımından efektif yararlanılmasını engelleyebilir. Çalışmada kullanılan yüksek dayanımlı çelik liflerin geometrisi ve polipropilen sentetik lifin özellikleri Çizelge 5'te ve görüntüleri Şekil 3'te verilmektedir.

Tablo 5. Çelik ve sentetik lifin özellikleri

Karakteristik Özellik	Çelik Lif	Sentetik Lif
Fiber Sınıfı	EN 14899-1	EN 14889-2
Ham Madde	Çelik	Polipropilen
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	7,85	0,91
Uzunluk (mm)	60	54
Çap (mm)	0,90	0,95
Narinlik	65	60
Çekme Gerilmesi (MPa)	2300	530
Elastisite Modülü (GPa)	210	7,2
Erime Sıcaklığı (°C)	1450	160
Korozyon Direnci	İyi	Çok İyi
Fiber Adedi / Kg	3124	28000



Şekil 3. Yüksek dayanımlı (5D) çelik lifler ve polipropilen kökenli sentetik lif görüntüsü

2.2. Karışım Tasarımı

Çalışmada yüksek dayanımlı çelik lif ve polipropilen esaslı sentetik lif olmak üzere 2 farklı dayanıma sahip lifler kullanılmıştır. Çelik lifin çekme mukavemeti 2300 MPa' dır ve sentetik elyaf 530 MPa çekme mukavemetine sahiptir. Çalışmada çelik lif ve sentetik lif hacimce %0,5 ve %1 olmak üzere 2 farklı oranda kullanılmıştır. Ayrıca lif içermeyen yalın (referans) bir karışımda karşılaştırma amacıyla hazırlanmıştır. Hafif beton performansını iyileştirmek için yüksek oranda su azaltıcı süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı çimentoya ağırlıkça %1,0-%1,4 oranları arasında kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan süperakışkanlaştırıcının katı madde oranı %30'dur. Bu çalışmada kullanılan hafif agregalar, maksimum tane boyutu 8 mm olan genişletilmiş perlit agregası ve maksimum tane boyutu 1 mm olan poliüretan kökenli atık agregadır. Tüm karışımlarda, 600 mm yayılma çapında akıcı kıvamlı bir beton kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan tüm hafif beton karışım tasarımları Çizelge 6'da verilmektedir. Tüm numuneler çelik kalıplar kullanılarak dökülmüştür. Numuneler 1 gün sonra kalıptan çıkarılmış ve 28 günlük test yaşına kadar su dolu kür tankında bekletilmiştir. Çalışmada beton numunelerinin hazırlanmasında 100x100x500 mm ebatlarında kiriş kalıplar kullanılmıştır (Şekil 4). Bu kalıplar beton dökümü öncesinde betonun çelik numune kalıbına yapışmasını önlemek amacı ile bir fırça yardımıyla yağlanmıştır.

Tablo 6. Karışımlarda kullanılan bileşen malzemeler ve miktarları (1 m³)

Malzemeler	Çimento (kg)	Perlit agregası (kg)	Poliüretan atık (kg)	Su (kg)	Katkı (kg)	Çelik lif (kg)	Sentetik lif (kg)
K1 Perlit Lifsiz	700	257	-	324	7,0	-	-
K2 Perlit %0,5 ÇL	700	257	-	324	7,0	35,0	-
K3 Perlit %1 ÇL	700	257	-	324	7,0	70,0	-
K4 Perlit %0,5 SL	700	257	-	324	7,0	-	4,1
K5 Perlit %1 SL	700	257	-	324	7,0	-	8,2
K6 Perlit-Poliüretan Lifsiz	600	110	110	360	8,4	-	-
K7 Perlit-Poliüretan %0,4 SL	600	110	110	360	8,4	-	3,5
K8 Perlit-Poliüretan %0,8 SL	600	110	110	360	8,4	-	7,0
K9 Perlit-Poliüretan %0,6 SL	600	110	110	360	8,4	-	5,3
K10 Poliüretan Lifsiz	500	-	183	467	7,0	-	-
K11 Poliüretan %0,35 SL	500	-	183	467	7,0	-	2,9
K12 Poliüretan %0,70 SL	500	-	183	467	7,0	-	5,8



Şekil 4. Hafif beton dökümü öncesinde kiriş numune kalıplarının hazırlanması

2.3. Numunelerin Hazırlanması

Karışımların hazırlanmasında öncelikle çimento ve hafif agregalar homojen hale gelinceye kadar hava kurusu olarak karıştırılmıştır. İkinci aşamada, kuru malzemelere karışım suyunun bir kısmı ilave edilmiş ve 2 dakika süre ile karıştırılmıştır. Üçüncü aşamada, yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi ve kalan su bir kaptaki karıştırılarak birlikte karışıma ilave edilmiştir. Böylece, kuru malzemelerin katkının suyunu emmesi ve süperakışkanlaştırıcı katkı maddesinin etkinliğinin azaltılması engellenmiştir. Son aşamada ise karışımlara lifler ilave edilmiştir. Hazırlanan çelik kalıplara hafif beton karışımları dökülmüştür. Çalışmada her bir hafif beton karışımından 100x100x500 mm boyutlarında kiriş numuneleri eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, basınç dayanımı ve geçirimsizlik testleri için hazırlanmıştır. Beton karışımının hazırlanması, liflerin ilave edilmesi, betonun kalıplara yerleştirilmesi ve betonun kalıptan sökülmesi aşamaları Şekil 5’te verilmektedir.

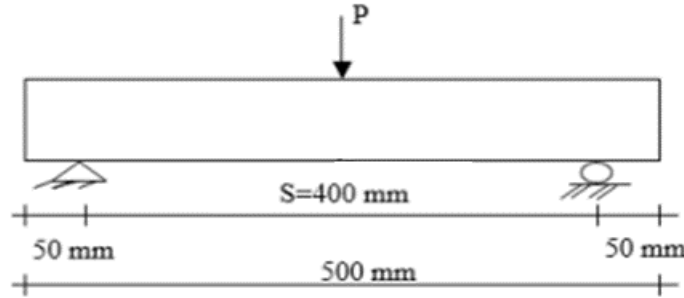


Şekil 5. Beton karışımının hazırlanması, liflerin ilave edilmesi, betonun kalıplara yerleştirilmesi ve kalıptan sökülmesi

Eğilme testlerinden kalan numuneler üzerinde basınç dayanımı, yarma çekme dayanımı ve kılcal su emme testleri yapılmıştır. Kiriş numuneleri üzerinde üç nokta eğilme testleri ile numunelerin eğilme dayanımları belirlenmiştir.

2.4. Deney Tekniği

100x100x500 mm boyutlarındaki kiriş numuneler üzerinde üç noktalı eğilme testleri yapılmıştır. Yükleme 300 kN kapasiteli bir cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Yükleme düzeneğinin test kurulumu Şekil 6'da verilmiştir. Betonların eğilme dayanımı RILEM TC 50-FMC [23] komitesi tarafından önerilen kiriş numunelere ortadan yük uygulanması yöntemine göre 'Eşitlik 1' kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 6. Eğilme deney düzeneği test kurulumu

$$F_{cf} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot B \cdot D \cdot D} \quad (1)$$

Burada F_{cf} , P , L , B ve D değerleri sırasıyla eğilme dayanımını (MPa), kırılma yükünü (N), mesnetler arası uzaklığı (mm), numune en kesit genişliği (mm) ve numune en kesit yüksekliği (mm) olarak verilmektedir.

Yarmada çekme deneyleri TS EN 12390-6 [24] standardına göre eğilme testlerinden kalan numuneler üzerinde yapılmıştır. Numunelere çizgisel yük uygulanarak yarmada çekme altında kırılma yükleri elde edilmiştir. Yük numunelere aktarılırken alttan ve üstten 4 mm kalınlıklı ince ahşap çubuklar kullanılmıştır. Bu deney yönteminde yükün uygulandığı yerlerde oluşan yerel basınç gerilmeleri, bu noktalardan uzaklaştıkça çekme gerilmelerine dönüşmektedir. Böylece, kesitin orta bölgesinde düzgün dağılımlı çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Burada uygulanan gerilme iki yönlü olduğundan aksenal çekme dayanımından daha büyük değerler elde edilmektedir. Yarmada çekme dayanımları aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_t = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot L \cdot D} \quad (2)$$

Burada f_t , P , L ve D değerleri sırasıyla yarmada çekme dayanımını (MPa), kırılma yükünü (N), numune uzunluğunu (mm) ve numune yüksekliği (mm) olarak verilmektedir.

Tüm hafif beton numunelerinde basınç dayanımı deneyleri 100x100x100 mm küp numuneleri üzerinde 28. günlerde gerçekleştirilmiştir. Deneyler, 5000 kN kapasiteli yükleme makinesi kullanılarak TS EN 12390-3 [25] standardına göre yapılmıştır.

Numunelere su emme ve kılcal su emme testleri de gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde numunelerin lif içermeyen yalnızca perlit agrega kullanılan K1, perlit agreganın poliüretan agrega ile ağırlıkça eşit miktarda kullanıldığı K6 ve yalnızca poliüretan atık agreganın kullanıldığı K10 karışımlarının sonuçları incelenmiştir. Böylece lifin betonda dağılımdan kaynaklanan belirsizlik dikkate alınmadan sadece agrega türündeki değişikliğin hafif betonların geçirimsizlik özelliklerine etkileri belirlenmiştir. Mekanik dayanım testlerine ait görseller Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 7. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı testlerine ait görseller

Kılcal su emme testleri ASTM C 1585 standardına göre bir kenarı 100 mm olan küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test yapılacak numuneler deneye başlamadan önce 70°C sıcaklıkta 1 gün boyunca etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar bekletilmiştir. Bu deneyde numunelerin su ile temas halindeki yüzeyinden kılcallık etkisinde suyun ilerlemesi ile numunelerin ağırlığının artmasından su emme miktarı 24 saat sonra belirlenmiştir. Ayrıca numuneler 3 gün su içerisinde bekletilerek ağırlıkları ölçülerek su emme değerleri de belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

100x100x500 mm boyutlarındaki kiriş numuneleri üzerinde bir yükleme cihazı kullanılarak 3 noktalı eğilme testleri yapılmıştır. Böylece numunelerin eğilme mukavemetleri belirlenmiştir. Ayrıca eğilme testi sonrası kiriş numunelerinden elde edilen 100x100x100 küp numuneler üzerinde geçirimsizlik, yarmada çekme ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Tüm mekanik dayanım ve geçirimsizlik test sonuçları Çizelge 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Perlit ve poliüretan atık agrega kullanılan hafif beton karışımlarının mekanik davranış ve geçirimsizlik özellikleri

Karışımın kodu	Basınç dayanımı (MPa)	Eğilme dayanımı (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Su emme (%)	Kılcal su emme (mm)
K1	17,0	2,5	2,05	15,9	0,76
K2	14,5	2,5	2,00	-	-
K3	18,9	5,3	3,05	-	-
K4	13,2	3,7	2,35	-	-
K5	12,7	3,3	2,15	-	-
K6	5,0	1,8	0,80	27,1	1,08
K7	7,7	2,1	2,1	-	-
K8	7,9	2,4	1,35	-	-
K9	9,1	2,6	1,35	-	-
K10	2,2	1,0	0,50	43,4	2,76
K11	3,7	1,3	0,65	-	-
K12	3,5	1,2	0,55	-	-

*Varyasyon katsayısı (C.O.V.) %3,2 ile %7,4 arasında değişmektedir.

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde tüm hafif beton karışımlarının basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı değerlerinin konvansiyonel normal yoğunluklu betonlara kıyasla düşük olduğu gözlenmektedir. Hafif agregaların dayanımının normal agregalardan daha düşük olması nedeniyle bu durum öngörülen bir sonuçtur. Dayanımı daha düşük agregalarla üretilen betonların mekanik özellikleri de düşük olmaktadır. Lif kullanım oranının hafif betonun çeşitli mekanik özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde ise çelik veya sentetik liflerin kullanılmasının mekanik özellikleri geliştirdiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar birçok başka çalışma sonuçları ile uyumludur. Liflerin kullanılması hafif betonda eğilme dayanımı, yarma çekme dayanımı ve kırılma tokluğunu artırmaktadır. Liflerin kullanım miktarı arttıkça numunelerin eğilme ve yarma çekme mukavemetleri de artmaktadır [26]. Ancak bu çalışmada bazı numunelerde lif miktarının artması ile mekanik özelliklerde azalmalar gözlemlenmiştir. Bu düşüşün nedeni, liflerin beton içerisinde dağılmasının yeterli olmaması ve homojenliğin bozulması olarak değerlendirilmektedir. Betonda kullanılan lif hacminin artması ile bu etki daha da belirgin hale gelmektedir. Liflerin yeterince dağılamaması betonun akışkanlığını da önemli ölçüde olumsuz etkilemektedir [27]. Bu nedenle liflerin beton içerisinde kullanımlarında lifin homojen dağılması ve betonun yerleştirme işlemlerine azami dikkat edilmesi gerekmektedir.

Çalışma kapsamında perlit agrega ve poliüretan atık agregaların hafif betonda kullanımında ise yalnızca perlit agregası kullanılan karışımlarda su/çimento oranı 0,46 iken, ağırlıkça aynı oranda perlit agregası ve poliüretan agrega içeren karışımlarda su/çimento oranı 0,60 ve tamamen poliüretan agrega kullanılan karışımda ise 0,93 oranındadır. Poliüretan atık agrega kullanılan karışımlarda betonun hedeflenen işlenebilirlikte olması için karışımlara yüksek miktarda su ilavesi gerekmektedir. Bu duruma bağlı olarak poliüretan atık malzemenin kullanıldığı beton karışımların dayanımları daha düşük çıkmaktadır. Yalnızca perlit agrega kullanılan numunelerin, yalnızca poliüretan agrega kullanılan numunelere kıyasla basınç dayanımları 7,73 kat daha yüksek olarak belirlenmiştir. Betonda dayanımın temel parametrelerinden olan su/çimento oranının artmasıyla poliüretan agrega içeren karışımların perlit agrega içeren karışımlara göre mekanik özellikleri daha düşük olarak gerçekleşmektedir [28].

Tüm bu deneysel çalışmalardan sonuç olarak perlit agregalar kullanılarak TS 2511 standardına göre 28 günlük dayanımı 16 MPa üzeri olan taşıyıcı hafif betonların üretilebileceği tespit edilmiştir [29]. Amerika Beton Enstitüsü (ACI 213 R) standardına göre ise 17 MPa üzeri hafif betonlar taşıyıcı kabul edilmektedir [30]. Çelik lif ilavesi ile mekanik özellikler daha da geliştirilebilir. Bununla birlikte, toz halde poliüretan atık kullanılan numunelerde beton karışımlarının belirgin olarak artan su ihtiyacı nedeniyle bu agregaların kullanılması ile yapısal hafif betonların üretilebilmesinin uygun olmadığı tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmanın sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Tüm karışımlarda beton birim ağırlıklarının 2000 kg/m^3 değerinden düşük olduğu belirlenmiştir. Böylece, bu çalışma kapsamındaki tüm karışımların TS EN 206 standardına göre hafif beton olarak sınıflandırılabilmesi tespit edilmiştir.
- Çelik ve sentetik lifler çekme gerilmelerini karşılayarak ve beton ile aderansı diğer bir ifade ile fiziksel kenetlenmeyi sağlayarak hafif betondaki mekanik özellikleri geliştirmektedir. Basınç dayanımı testinde %1 çelik lif içeren K3 kodlu numunelerin basınç dayanımı lifsiz K1 numunelerinin 1,11 katı olmaktadır. Eğilme ve yarma çekme dayanımı testlerinde ise çelik lif

içeren K3 karışımının lif içermeyen yalın K1 karışımına kıyasla eğilme ve yarma çekme dayanımlarında sırasıyla 2,12 ve 1,49 kat artış gerçekleşmiştir. Konvansiyonel betonlarda liflerin betonun basınç dayanımına kıyasla eğilme dayanımı ve yarma çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerindeki olumlu etkisinin çok daha belirgin olduğu bilinmektedir. Bu çalışma sonuçları ile de lif ilavesinin hafif betonlarda basınç dayanımından ziyade eğilme ve yarmada çekme dayanımı üzerinde daha etkili olduğu belirlenmiştir.

- Liflerin kullanım oranının artması ile numunelerin eğilme dayanımları artmıştır. Benzer şekilde lif miktarının artırılması ile numunelerin yarma çekme dayanımlarının da arttığı belirlenmiştir. Ancak liflerin betonda kullanımında liflerin homojen dağılması ve betonun yeterince yerleştirilmemesi halinde mekanik davranışta gelişme yerine düşüşler oluşturabileceği de tespit edilmiştir. Sentetik lif kullanılan K4 ve K5 karışımları incelendiğinde sentetik lif miktarının hacimce %0.5 oranından %1 e çıkması ile yerleştirme sorunlarına bağlı olarak eğilme ve yarma çekme dayanımlarında sırasıyla %11 ve %9 oranında düşüş gerçekleşmiştir. Bu sonuçlardan konvansiyonel betonlarda olduğu gibi hafif betonlarda da liflerin betonun eğilme ve yarmada çekme dayanımını arttırdığı ancak hafif betonlarda kullanılması durumunda da geleneksel betonlara benzer şekilde homojen dağılımına özen gösterilmesi gerektiği anlaşılmıştır.
- Çelik ve sentetik liflerin mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelendiğinde K3 karışımında çelik lif kullanılması ile sentetik lif kullanılan K4 ve K5 karışımlarına göre daha yüksek eğilme ve yarma çekme dayanımları elde edilmiştir. Mekanik özelliklerin geliştirilmesinde çelik lifler kullanılması ile sentetik liflere kıyasla daha etkili sonuçlar elde edilmektedir. Hacimce aynı oranda lif kullanılan çelik lifli K3 ve sentetik lifli K5 karışımları incelendiğinde çelik lif kullanılması durumunda sentetik lif kullanılan numunelere kıyasla numunelerin eğilme dayanımında 1.60 kat ve yarma çekme dayanımında 1.42 kat artış belirlenmiştir.
- Karışımların su/çimento oranları incelendiğinde sadece perlit agregası kullanılan karışımlarda su/çimento oranı 0,46 iken, ağırlıkça aynı oranda perlit agregası ve poliüretan agregası içeren karışımlarda su/çimento oranı 0,60 ve tamamen poliüretan agregası kullanılan karışımda ise 0,93 oranındadır. Sadece poliüretan agregası kullanılan karışımlarda betonun işlenebilirliğini sağlamak için karışımlara çok yüksek miktarda su ilavesi gerekmektedir. Poliüretan atık malzemenin perlit agregası ile ikamesi durumunda beton karışımının akışkanlığının azaldığı ve beton karışımının çok daha fazla su ihtiyacı olduğu tespit edilmiştir. Bu duruma bağlı olarak poliüretan atık malzemenin kullanıldığı beton karışımların dayanımları daha düşük çıkmaktadır. Yalnızca perlit agregası kullanılan ve lif içermeyen yalın K1 karışımı numunelerinin yalnızca poliüretan agregası kullanılan ve lif içermeyen yalın K10 karışımı numunelerine kıyasla basınç dayanımları 7,73 kat daha yüksek olarak belirlenmiştir. Betonda dayanımın temel parametrelerinden olan su/çimento oranının artmasıyla toz halde poliüretan agregası içeren karışımların beton mekanik özellikleri belirgin olarak perlit agregalı karışımlara göre daha düşük olarak gerçekleşmektedir.
- Tüm bu deneysel çalışmalardan sonuç olarak perlit agregalara çelik lif takviyesi ile TS 2511 standardına göre 28 günlük dayanımı 16 MPa üzeri olan taşıyıcı hafif betonların üretilebileceği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, toz halde poliüretan atık kullanılan numunelerde agregası boyutunun küçülmesi ile beton karışımlarının belirgin olarak artan su ihtiyacı nedeniyle bu agregaların kullanılması ile yapısal hafif betonların üretilebilmesinin mümkün olmadığı tespit edilmiştir.

5. İleri Çalışmalar İçin Öneriler

Toz haldeki poliüretan atıklar kullanılarak üretilen numunelere lif takviyesi yapılsa dahi mekanik özellikler açısından taşıyıcı hafif beton olarak kullanılabilmesi mümkün gözükmemektedir. Pudra boyutundaki poliüretan malzemenin çok hafif olması nedeniyle bu atıklar kullanılarak üretilen hafif

betonların yapısal değerlendirilmesi yerine yalıtım amaçlı olarak kullanılabilirliği incelenmelidir. Bu kapsamda toz halde poliüretan agrega kullanılarak üretilen hafif betonların ısı ve ses yalıtım özelliklerinin incelenmesi faydalı olacaktır. Ayrıca bu çalışmada kullanılan poliüretan atık agreganın maksimum tane boyutunun 1 mm olduğu ve yüksek oranda filler malzeme boyutunda tanecikler içerdiği dikkate alınmalıdır. Poliüretan atık malzemenin tane boyutunun küçük olması, bu agrega ile üretilen hafif betonların su ihtiyacının artmasında oldukça etkili olmaktadır. Poliüretan atık agreganın 4 mm ve üzeri iri agrega tane boyutunda kullanılması halinde taşıyıcı hafif beton olarak kullanılabilmesi ayrıca incelenmelidir. Çalışma kapsamındaki perlit agrega ve toz haldeki poliüretan atık agreganın tane boyutları oldukça farklıdır. Poliüretan agrega içeren betonların artan su ihtiyacında bu husus dikkate alınmalıdır. Bu çalışma ile perlit ve poliüretan agregaların hafif betonda kullanılabilmesi ile ilgili yalnızca genel davranış incelenmektedir. Beton karışımları arasında doğrudan bir karşılaştırma yapabilmek için benzer tane büyüklüğüne sahip perlit ve poliüretan agregalar arasında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmelidir.

Teşekkür

Çalışmada yer alan hafif beton numuneleri ilk yazarın danışmanı olduğu lisans bitirme projeleri kapsamında İstanbul Medeniyet Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarlarında üretilmiştir. Ayrıca, bu çalışma ikinci yazarın proje yürütücüsü olduğu Doğu Üniversitesi 2021-22-D1- B04 numaralı BAP projesi kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, katkılarından dolayı İstanbul Medeniyet Üniversitesi ve Doğu Üniversitesi'ne teşekkür eder.

Etik Standartlar Beyanı

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, bu makalede bildirilen çalışmayı etkilemiş gibi görünebilecek, bilinen rakip mali çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkı Beyanı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

Kaynaklar

- [1] U. Özcan, S. Güngör, (2019). Sürdürülebilir bir yöntem/betonda puzolan kullanımı, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi. 15, 176-182.
- [2] A.V. Korkmaz, (2020). Perlit ve traverten atıkları ile üretilen puzolanik çimentoların mühendislik özelliklerinin incelenmesi, MT Bilimsel. 17, 32-50.
- [3] N. Kabay, (2009). Hafif agregalı betonun boşluk yapısının mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi (Doktora Tezi). YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [4] S. Azizi, (2007). Perlit katkılı hafif betonların mekanik özellikleri ve ısı yalıtımı (Yüksek Lisans Tezi). İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [5] O. Sengul, S. Azizi, F. Karaosmanoglu, M.A. Tasdemir, (2011). Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete, Energy and Buildings. 43(2-3), 671-676, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.008>.

- [6] H. Konuk, (2003). Hafif agregalı betonların mekanik özellikleri ve ısı yalıtımı (Yüksek Lisans Tezi). İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [7] A.B. Fraj, M. Kismi, P. Mounanga, (2010). Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*. 24(6), 1069-1077, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.010>.
- [8] S.I. Haruna, H. Zhu, W. Jiang, J. Shao, (2021). Evaluation of impact resistance properties of polyurethane-based polymer concrete for the repair of runway subjected to repeated drop-weight impact test, *Construction and Building Materials*. 309, 125152, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125152>.
- [9] O. Gencil, O.Y. Bayraktar, G. Kaplan, O. Arslan, M. Nodehi, A. Benli, A. Gholampour, T. Ozbakkaloglu, (2022). Lightweight foam concrete containing expanded perlite and glass sand: physico-mechanical, durability, and insulation properties, *Construction and Building Materials*. 320, 126187, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126187>.
- [10] M.A. Yahye, L. Liu, W.U. Honglin, Y. Sun, H. Sun, J. Ma, L. Zhang, (2022). Experimental research on mechanical properties of fiber-reinforced polyurethane elastic concrete (FRPEC), *Construction and Building Materials*. 328, 126929, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126929>.
- [11] P. Mounanga, W. Gbongbon, P. Poullain, P. Turcry, (2008). Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes, *Cement and Concrete Composites*. 30(9), 806-814, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.007>.
- [12] X. Qiu, W. Chen, L. Li, H. Li, H. Liu, (2023). The effects of particle sizes of expanded perlite on the mechanical properties and chloride penetration resistance of ECCs, *Journal of Building Engineering*. 78, 107706, <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107706>.
- [13] H. Eren, S. İlkentapar, U. Durak, (2022). Eps ve atık poliüretan ile üretilmiş hafif harçların mekanik özelliklerinin, ısı geçirimsizlik özelliklerinin ve yüksek sıcaklığa karşı dirençlerinin karşılaştırılması, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*. 10(2), 360-370, <https://doi.org/10.21923/jesd.935865>.
- [14] A.N. Kaplan, C. Özel, (2023). Polimer bağlayıcılı hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*. 11(4), 1475-1485, <https://doi.org/10.21923/jesd.1313056>.
- [15] O. Benjeddou, G. Ravindran, M.A. Abdelzaher, (2023). Thermal and acoustic features of lightweight concrete based on marble wastes and expanded perlite aggregate, *Buildings*. 13, 992, <https://doi.org/10.3390/buildings13040992>.
- [16] H.İ. Fedakar, (2022). Poliüretan ile güçlendirilmiş balastın hareket eden tekerlek yükü altındaki deformasyon davranışının nümerik olarak modellenmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*. 37(1), 79-91, <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1094976>.
- [17] M.A. Peker, O. Ataş, M. Aksel, (2022). Plastik atıkların betonda değerlendirmesindeki güncel durum, *Alaaddin Keykubat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 4(3), 159-178.
- [18] R. Yurtseven, A.R. Tarakçılar, M. Topçu, (2013). Dolgu malzemesi olarak kullanılan farklı uçucu küllerin sert poliüretan köpük malzemelerin mekanik özellikleri ile ısı ve yanma davranışları üzerine etkileri, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 28(4), 841-853.
- [19] S. Çelikten, B. Baran, Z. Bayer Oztürk, (2024). Uçucu kül ve perlit esaslı geopolimer harçlarda çömlük sır atığı ikamesinin yüksek sıcaklık dayanıklılığı üzerindeki etkisi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 32(2), 1326-1334, <https://doi.org/10.31796/ogummf.1430527>.
- [20] S. Çelikten, B. Işıkdag, (2021). Properties of geopolimer mortars derived from ground calcined perlite and NaOH solution, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 27(9), 2907-2921, <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1879939>.

- [21] S. Çelikten, G. Erdoğan, (2022). Effects of perlite/fly ash ratio and the curing conditions on the mechanical and microstructural properties of geopolymers subjected to elevated temperatures. *Ceramics International*. 48(19), 27870-27877, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.089>.
- [22] S. Çelikten, (2021). The influence of blast furnace slag content on the mechanical and durability properties of raw perlite-based geopolymer mortars, *Journal of Engineering Research*. 10(2B), 112-123, <https://doi.org/10.36909/jer.11225>.
- [23] RILEM 50-FMC, (1985). Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, *Materials and Structures*. 18, 285-290.
- [24] EN 12390-6, (2009). Testing Hardened Concrete Tensile Splitting Strength of Test Specimens.
- [25] EN 12390-3, (2019). Testing Hardened Concrete Compressive Strength of Test Specimens.
- [26] J. Gao, W. Sun, K. Morino, (1997). Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete, *Cement and Concrete Composites*. 19(4), 307-313.
- [27] V. Guerini, A. Conforti, G. Plizzari, S. Kawashima, (2018). Influence of steel and macro-synthetic fibers on concrete properties, *Fibers*. 6(3), 47.
- [28] J. Newman, P. Owens, (2003). Properties of lightweight concrete, *Advanced Concrete Technology*. 3, 1-29.
- [29] TS 2511, (2017). Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları.
- [30] ACI 213-R, (2014). Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete.