

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MONOTONİK YÜK ETKİSİ ALTINDA PERLİTLİ BETONARME
KİRİŞLERİN YAPISAL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Melih Şakir POLAT

Danışman: Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU
İkinci Danışman: Doç. Dr. Yaşar AYAZ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN
2024
Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MONOTONİK YÜK ETKİSİ ALTINDA PERLİTLİ BETONARME KİRİŞLERİN YAPISAL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Melih Şakir POLAT

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU
İkinci Danışman: Doç. Dr. Yaşar AYZAZ

Mevcut yapı stoku incelendiğinde, betonarme taşıyıcı sisteme sahip yapıların çoğunlukta olduğu görülmektedir. Bu durum artan nüfusla birlikte kentleşme ve sanayileşmedeki artış ile birleşince betonarme yapı üretiminin hammaddesi konumunda bulunan betona olan ihtiyacı da gün geçtikçe artırmaktadır. Belirtilen ihtiyaç doğrultusunda, beton üretiminde betonun malzeme mekanik özelliklerinden (betonda basınç dayanımı, birim şekil değiştirme, süneklik vb.) ödün vermeden hem ekonomik hem de ekolojik olguları dikkate alarak beklenen ihtiyacın karşılanması gerekmektedir. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında hem geleneksel hem de doğal perlit agregası kullanılarak toplamda 4 adet betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Gerçekleştirilen yükleme deneyleri sonrasında, numunelerin yük-deplasman ilişkisi, enerji tüketme kapasitesi ve hasar dağılımları incelenmiştir.

2024, 40 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Betonarme kiriş, doğal perlit agregası, hafif beton.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAM WITH PERLITE UNDER THE EFFECT OF MONOTONIC LOAD

Melih Şakir POLAT

Erzincan Binali Yıldırım University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Atila KUMBASAROĞLU
Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yaşar AYAZ

When the existing structure stock is examined, it can be seen that the majority of buildings have reinforced concrete (RC) structural systems. This case, combined with the increasing population and the increase in urbanization and industrialization, to be increased the need for concrete, which is the raw material of RC building production, day by day. In line with the stated need, the expected need must be met by taking into account both economic and ecological facts in concrete production without compromising the material mechanical properties of concrete (compressive strength, strain, ductility, etc. in concrete). Within the scope of the study, a total of 4 RC beam samples were produced using both conventional and natural perlite aggregate. After the loading tests, the load-displacement relationship, energy consumption capacity and damage distributions of the specimens investigated.

2024, 40 Pages

Keywords: Reinforced concrete beam, natural perlite aggregate, lightweight concrete.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca desteklerini bir an olsun üzerimizden esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle yolumu aydınlatıp, ufkumu açan çok değerli bilim insanı danışman hocam Sn. Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU'na, çok değerli hocam Sn. Prof. Dr. Hakan YALÇINER'e, Arş. Gör. Dr. Ahmet İhsan TURAN'a, Arş. Gör. Alper ÇELİK'e, yüksek lisans öğrencisi Akif Berke ÖZTÜRK'e, Samet POLAT'a ve maddi manevi her zaman beni destekleyen aileme sonsuz teşekkürlerimi iletiyorum.

Melih Şakir POLAT

Temmuz, 2024



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
3. KURAMSAL TEMELLER	10
3.1. Süneklik	10
3.2. Rijitlik	12
3.3. Moment-Eğrilik İlişkisi	13
4. MATERYAL ve YÖNTEM	14
4.1. Materyal	14
4.1.1. Donatı Mekanik Özellikleri.....	16
4.1.2. Numunelerin Hazırlanması	18
4.2. Yöntem	20
4.2.1. Yükleme Düzenegi	20
4.2.2. Ölçüm Düzenegi	21
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	26
5.1. Yük-Deplasman İlişkisi	26
5.2. Enerji Kapasiteleri	27
5.3. Moment – Eğrilik İlişkileri	28
5.4. Donatı Birim Deformasyon İlişkileri.....	30
5.5. Betonarme Kirişlerin Hasar Durumları	32
6. SONUÇLAR	35
KAYNAKLAR	36

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Taş ocağı uydu görüntüsü (Google Earth Pro, 2024).....	1
Şekil 1.2. Türkiye hazır beton üretimi (THBB, 2023).....	2
Şekil 1.3. Hafif beton tanımlamaları (ACI 213R-03, 2003).	3
Şekil 1.4. Türkiye'deki perlit rezervleri (MTA, 2024).....	4
Şekil 3.1. Betonarme kiriş süneklik davranışı (Ersoy vd., 2019).....	11
Şekil 3.2. İkinci Mertebe Moment Etkisi: (a) deforme olmamış, (b) deforme olmuş (Burgos ve Silva, 2023).....	12
Şekil 3.3. Eğilme etkisi altında betonarme bir kesit (Celep, 2008).....	13
Şekil 4.1. Numunelerin isimlendirilmesi.	14
Şekil 4.2. Farklı boyutlarda doğal perlit agregaları.	15
Şekil 4.3. Donatı kafesi kesit özellikleri.....	16
Şekil 4.4. Donatı Çekme Deneyi.....	17
Şekil 4.5. Donatı Mekanik Özellikleri.....	18
Şekil 4.6. Betonarme Numunelerinin Yapım Aşamaları: (a) Betonarme kiriş kalıpları, (b) Donatı kafesleri.....	18
Şekil 4.7. Donatı taşlama işlemi.....	19
Şekil 4.8. Betonarme Donatısına Gerinim Pulu Uygulama Aşamaları: (a) Gerinim pulu yapıştırma aşaması, (b) Döküme hazır donatı kafesi.....	20
Şekil 4.9. Deney Düzeneği.....	21
Şekil 4.10. Potansiyometre (50 mm ölçüm kapasitesi).....	22
Şekil 4.11. Deney Düzeneği Şematik Gösterimi.....	22
Şekil 4.12. Gerinim Pulu Yerleşimi Şematik Gösterimi.....	23
Şekil 4.13. Eğrilik değerlerinin ölçümü.....	24
Şekil 4.14. Veri toplama cihazı.	24
Şekil 5.1. P40 ve C40 Numuneleri Yük-Deplasman Eğrisi.....	26
Şekil 5.2. P25 ve C25 Numuneleri Yük-Deplasman Eğrisi.....	27
Şekil 5.3. P40 ve C40 Numunelerinin Enerji Kapasiteleri.	27
Şekil 5.4. P40 ve C40 Numunelerinin Enerji Kapasiteleri.	28
Şekil 5.5. P40 ve C40 Numunesi Moment-Eğrilik İlişkisi.	29

Şekil 5.6. P25 ve C25 Numunesi Moment-Eğrilik İlişkisi.	29
Şekil 5.7. C40 Numunesi Çekme Donatısı Birim Şekil Değişirme-Zaman Grafiği.....	30
Şekil 5.8. P40 Numunesi Çekme Donatısı Birim Şekil Değişirme-Zaman Grafiği.	31
Şekil 5.9. C25 Numunesi Çekme Donatısı Birim Şekil Değişirme-Zaman Grafiği.....	31
Şekil 5.10. P25 Numunesi Çekme Donatısı Birim Şekil Değişirme-Zaman Grafiği.	32
Şekil 5.11. C25 Kirişi	33
Şekil 5.12. C40 Kirişi	33
Şekil 5.13. P25 kirişi.....	34
Şekil 5.14. P40 Kirişi.....	34



TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Literatür özeti (Alternatif/Atık malzemeler ile üretilen betonun performansının incelenmesi)	8
Tablo 3.1. Süneklik tipleri (Gioncu, 2000).....	11
Tablo 4.1. Deney Düzenegi Materyalleri	22
Tablo 4.2. Ölçüm, yükleme ve veri toplama sisteminde kullanılan cihazlar.....	25
Tablo 5.1. Numunelere ait çatlak değerleri	32



SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

F_y	Akma yükü
μ_ε	Deformasyon Sünekliği
δ	Deplesman
μ_δ	Deplesman Sünekliği
θ_i	Dönme Açısı
μ_θ	Dönme Sünekliği
ϕ_i	Eğrilik
μ_x	Enkesit Sünekliği
σ	Gerilme
M	Moment
F_u	Nihai yük
M_p	Plastik Moment
F	Yük

Kısaltmalar

ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
LVDT	Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatörler
GEP	Google Earth Pro
MTA	Maden Tetkik ve Arama
TBDY	Türk Bina Deprem Yönetmeliği
THBB	Türkiye Hazır Beton Birliği

1. GİRİŞ

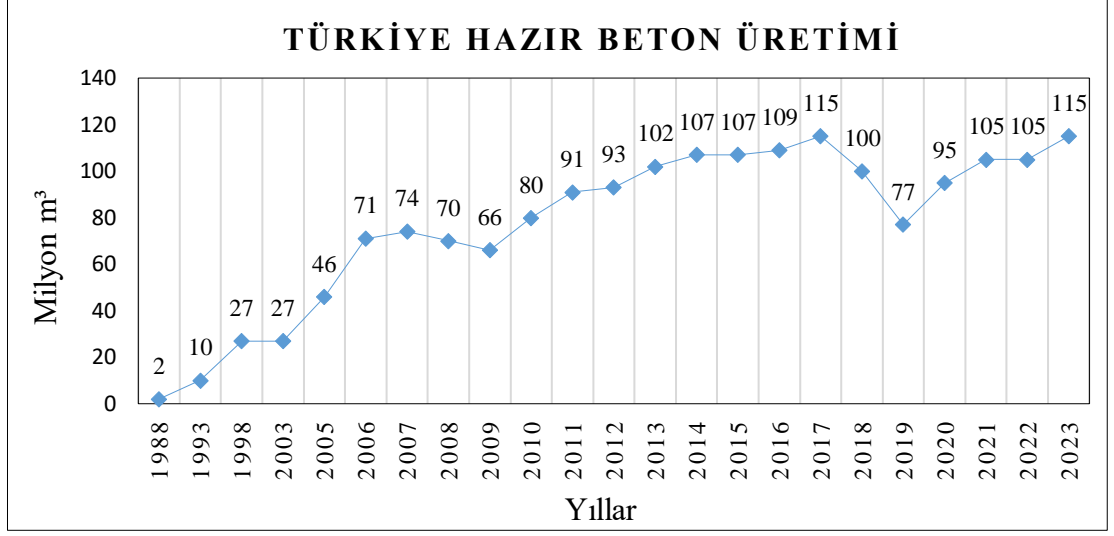
Beton, günümüzde en çok tercih edilen yapı malzemelerinden biridir. Yüksek basınç dayanımı, kolay uygulanabilirliği, bakım gerekmiyor oluşu ve diğer yapı malzemelerine göre ekonomik olması, betonun tercih edilmesindeki temel faktörlerdir.

Beton üretiminde kullanılan agreganın; nehir veya taş ocaklarından temin edilmesi, yapıların hizmet ömrünü tamamlayıp atık oluşturması, kullanılan agrega ve türevi malzemelerin üretim enerjisinin yüksek olması gibi sebeplerden dolayı çevresel sorunlara doğrudan yada dolaylı olarak zarar verdiği bilinmektedir. Şekil 1.1’de Erzincan İlinde bulunan taş ocağının bulunduğu çevrenin Google Earth Pro (GEP) programında 2006 ve 2023 yılları için elde edilen değişim görülmektedir.



Şekil 1.1. Taş ocağı uydu görüntüsü (Google Earth Pro, 2024).

Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından yapılan araştırmada artan nüfusla birlikte beton üretiminin artış gösterdiği belirtilmiştir (Şekil 1.2).



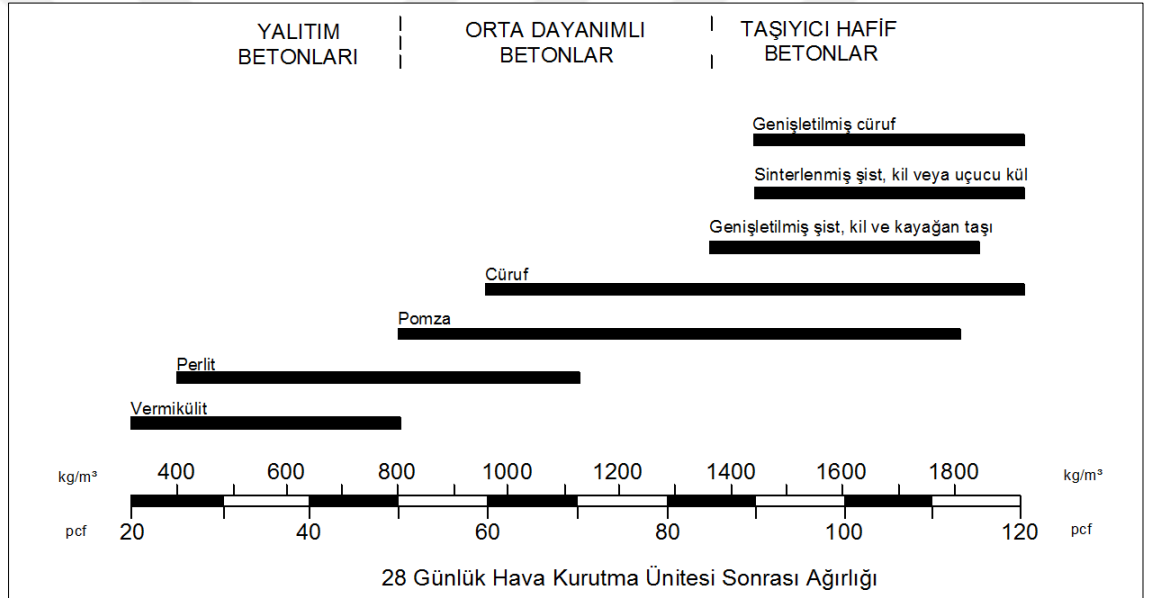
Şekil 1.2. Türkiye hazır beton üretimi (THBB, 2023).

Beton üretiminde sürdürülebilirlik göz önüne alındığında, atık (plastik, kauçuk, moloz vb.) ya da alternatif malzemelerin (perlit, pomza, uçucu kül vb.) kullanımı ekonomik ve ekolojik açıdan son derece önem arz etmektedir. Beton üretiminde kullanılan alternatif yapı malzemelerinden biri olan doğal perlit agregası mekanik özelliklerine bakıldığında; düşük birim ağırlık, yalıtım, yangına dayanıklılık ve yüksek dayanıklılık gibi avantajlar sağladığı için çok tercih edilen bir yapı malzemesi olmuştur. Belirtilen bu malzeme-mekanik özellikleri temel alındığında betonarme yapıların önemli bileşeni konumunda olan betonun üretiminde doğal perlit agregası kullanımının, ekolojik, ekonomik ve yapısal anlamda katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Ülkemizin deprem kuşağında yer alması ve son yıllarda yaşanan deprem felaketlerinden sonra, depreme dayanıklı bina tasarımı ve yapımı araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir. Beton, kimyasal ve mekanik avantajlarından dolayı en çok tercih edilen yapı malzemesi olmasına rağmen birim ağırlığı fazla olduğu için kullanıldığı yapının ölü(zati) yükünü fazlasıyla artırmaktadır. Deprem kuvvetinin, yapıların ölü(zati) yüküyle doğru orantılı bir şekilde arttığı bilinmekte ve taşıyıcı hafif betonların kullanımı gün geçtikçe artmaktadır (Hüsem, 1995; Akkaş, 2011).

Uluslararası literatür incelendiğinde, birçok yönetmelikte hafif betonlar ile ilgili tanımlamalar yer almaktadır (Durak vd., 2022).

Örnek olarak ACI 213R-03 (2003) yönetmeliğinde beton basınç dayanımı 0.7-7 MPa arasında tanımlanan düşük yoğunluklu hafif beton %0 nem içeriğine sahip birim hacim ağırlığı maksimum 800 kg/m³, beton basınç dayanımı 7-17 MPa arasında olan betonlar ise orta dayanımlı hafif beton olarak tanımlanmaktadır. İlgili yönetmelikte yapısal hafif beton ise minimum beton basınç dayanımı 17 MPa, yoğunluğu 1120-1960 kg/m³ değerleri arasında değişen ve hafif agregadan üretilmiş beton olarak tanımlanmaktadır. Malzeme mekanik özelliklerinin gelişmesiyle birlikte Yapısal hafif beton (LWC) taşıyıcı sistemlerde kullanılabilir (Hossain, 2004). ACI 211.2-81 (1981) yönetmeliğinde ise yapısal hafif beton yoğunluğu genel olarak 1400 ila 2000 kg/m³ değişen değerlere sahip olacağı vurgulanmaktadır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Hafif beton tanımlamaları (ACI 213R-03, 2003).

Ülkemizde bulunan perlit agregası da hafif agregalar sınıfına girmekte olup hafif beton üretiminde kullanılmaktadır (Azizi, 2007). Dünya üzerindeki perlit rezervinin %74' ünün Türkiye'de bulunduğu bilinmektedir. Türkiye'deki perlit rezervlerinin dağılımı ise Şekil 1.4'te görülmektedir.

Dünya perlit rezervinin büyük bir kısmının ülkemizde olduğu düşünüldüğünde, perlitin kullanımının yaygınlaştırılması ve kullanım alanlarının genişletilmesi ülkemiz açısından büyük önem arz etmektedir.



Şekil 1.4. Türkiye'deki perlit rezervleri (MTA, 2024).

Betonarme kirişlerde doğal perlit agregasının kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla gerçekleştirilecek çalışma kapsamında hem geleneksel hem de doğal perlit agregası kullanılarak toplamda 4 adet betonarme kiriş numunesinin üretilmesi planlanmıştır. Gerçekleştirilecek yükleme deneyleri sonrasında numunelerin yük-deplasman ilişkisi, enerji tüketme kapasitesi ve hasar dağılımları incelenecektir. Tüm deney verileri ışığında, doğal perlit agregasının betonarme kirişlerde kullanılabilirlik durumu ortaya çıkarılacaktır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Dünya genelinde betona olan ihtiyaç ekonomik ve ekolojik sorunları beraberinde getirmektedir. Araştırmacılar tarafından bu olumsuz durumların giderilmesine yönelik birçok deneysel ve teorik çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda betonun malzeme-mekanik özelliklerinden ödün vermeden çevreye verilen zararı ve üretim maliyetlerini azaltmak amaç edinmiştir.

Tez çalışması kapsamında incelemeye konu olan araştırmalar bu bölümünde açıklanmaktadır. Tablo 1 incelendiğinde beton bileşenine farklı oranlarda doğal kaynak agregası, alternatif ve atık malzemelerin (doğal/genleştirilmiş perlit agregası, çelik lif, atık demir tozu, kireç atığı, çelik cürufu, pet şişe, atık lastik, atık kauçuk, kil tuğla atığı, atık seramik, odun atığı, atık döküm kumları, uçucu kül, cam elyaf, geo-grid, polipropilen lif, kazınmış asfalt) beton içine farklı oranlarda (agrega ve çimentonun belirli oranına yerine veya ilave olarak eklenerek) ilave edilmesiyle gerçekleştirilen deneysel çalışmalar görülmektedir. Bu çalışmalarda genel olarak betonun malzeme ve mekanik özelliklerinin (ultra ses geçiş hızı, birim hacim ağırlıkları, su emme, ısı iletkenlik, beton basınç dayanımı, çekme, rijitlik ve eğilme dayanımı) incelendiği görülmektedir. Literatürde perlitin çok sayıda amaca yönelik kullanımı ile ilgili çalışmalar olmasına rağmen tam ölçekli betonarme elemanlarda kullanımının araştırıldığı çalışmalar oldukça sınırlıdır.

İbrahim vd. (2020) gerçekleştirilen deneysel çalışmada geleneksel agrega ve beton kütlelerinin farklı oranları (%10, %15 ve %20) için genleştirilmiş perlit agregası kullanarak hafif beton numuneleri üretilmiştir. Gerçekleştirmiş oldukları basınç deneyleri sonucunda %10 ve %15 oranında perlit agregası kullanımının yönetmeliklerde tanımlanan hafif beton özelliklerini sağladığını bildirmiştir. Ek olarak geleneksel numunenin klorür geçirgenliği dikkate alındığında %10 ve %15 perlit kullanımı ile elde edilen numune ile benzer özelliklere sahip olduğu vurgulanmıştır.

Perlit agregasının ince agrega olarak kullanıldığı çalışmalardan biri Ragul vd. (2022) tarafından yürütülen deneysel çalışmadır. İlgili çalışmada geleneksel betonda yer alan ince agreganın hacimce %5, %10, %15 ve %20'lik değeri yerine perlit agregası kullanılmıştır. Ragul vd. (2022) elde etmiş olduğu verilerden perlit içeriği %15 olan numunenin basınç dayanımı ve çekme dayanımının perlit eklenmeyen numune ile benzer

sonuçlar ortaya koyduğunu belirtmiştir. Bu duruma ek olarak işlenebilirlik ve beton malzeme mekanik özellikleri dikkate alındığında optimum kullanım oranının %15 olduğu bildirilmiştir.

Gökçe vd. (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da ham ve genleştirilmiş perlit agregaları kullanarak üretilen hafif betonların yönetmeliklerde yer alan hafif beton sınır değerleri içinde yer aldığı belirtilmiştir. Beton içeriğinde yer alan ince ve iri agrega yerine perlit ilavesi ile gerçekleştirilen deneylerde genel olarak katkısız imento kullanılmaktadır. Bu çalışmalardan farklı olarak Huang vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada kalsiyum sülfo alüminat esaslı imento kullanılmıştır. Deneysel numunelerinde ince agreganın yerine ise hacimce %30, %60 ve %100'lk oranlarında perlit agregası ilave edilmiştir. Huang vd. (2020) deney bulgularında perlit kullanımı ile beton basıncı dayanımlarının azaldığını fakat termal iletkenlik katsayısının azaldığını belirterek bu tip betonların soğuk iklime sahip bölgelerde kullanılmasını önermiştir.

Doğal katkı ve atık malzemelere göre daha yüksek malzeme mekanik performansı sergileyen fakat ekonomik olumsuzluklara sahip ürünler kullanarak üretilen betonun malzeme mekanik özelliklerinin iyileştiğini vurgulayan birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan biri de Cho ve Kim (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmadır. Cho ve Kim (2003) yürütmüş oldukları betonarme kiriş deneylerinde elik lif kullanımının geleneksel numunelere göre hem dayanım hem de rijitlik bakımından olumlu sonuçlar ortaya koyduğunu belirtmiştir. Betonarme elemanlarda elik lif katkısının taşıma gücüne etkisinin incelendiği bir diğer deneysel alışma Altun vd. (2002) tarafından yrtlmştir. İlgili deneysel çalışmada 3 adet lifli ve 3 adet de referans kiriş numunesi üretilmiş ve eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde etmişleri deney verilerinden elik lif katkısının betonarme kirişin hem taşıma gücü kapasitesini %20 oranında artırdığı hem de süneklik oranına katkı sağladığı belirtilmiştir. Aktaş (2007) elik lif katkısı kullanarak (0, 30, 60 kg/m³) retmiş oldukları betonarme kiriş numunelerinin (300×300×2000 mm) yapısal anlamda kullanılabilirliklerini tespit etmeye yönelik deneysel çalışma gerekleşirmiştir. elik lif katkısının optimum kullanımının 30 kg/m³ olduğunu ve bu oran için taşıma gücü kapasitesinin %33 oranında artış gösterdiğini belirtmiştir.

Demir çelik endüstrisindeki en büyük atık ürünü olan demir tozu farklı sektörlerde (boya, otomotiv, çelik vb.) kullanılarak tekrardan üretime kazandırılmaktadır (Frantsevich, 1965; Gaiduchenko ve Napara-Volgina, 1996). Binici vd. (2015) beton bileşenindeki kum yerine farklı oranlarda atık demir tozu kullanarak deney numuneleri üretmiştir. Numunelerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kılcal su emme kapasitesi ve aşınma dayanımlarını laboratuvar ortamında test etmişlerdir. Elde etmiş oldukları bulgulardan %20 demir tozu kullanım oranının incelenen parametreler dikkate alındığında optimum düzey olduğunu belirtmişlerdir. Beton üretiminde kullanımı araştırılan bir diğer atık malzeme ise kireçtir. Kireç kimya endüstrisi (organik tarım vb.), çevre iyileştirmesi (atıksu, çöp suyu arıtma vb.) yapı malzemesi (harç ve sıva üretimi vb.) gibi birçok kullanım alanına sahiptir (Özcan, 2011).

Bu amaçla Alwaeli, (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada beton bileşenindeki kum yerine farklı oranlarda kireç atığı kullanılmıştır. Kireç kullanımının beton basınç dayanımındaki etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen deneyler sonucunda ilave edilen kirecin betonun basınç dayanımını arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Beton üretiminde rol oynayan puzolanik malzemelerin yeterli etkiyi göstermesi için ince taneli olma, amorf yapı, yeterli silis oranı ve demir oksit içermesi gerektiği bilinmektedir. Beton üretiminde cam atıkların öğütülerek kullanılmasının ise yukarıda belirtilen özellikleri belirli ölçüde karşılayarak ek bağlayıcı malzeme olarak çimentonun belirli oranı yerine kullanılabilmesi düşünülebilir (Erdoğan, 2003).

Camın kullanım alanlarının geniş olması ortaya çıkan atığında bu denli büyük olmasına sebep olmaktadır. Camın geri dönüşümü için gereken enerji 42 kWh enerji, 315 kg karbondioksit emisyonu, 5 galon petrol kullanımı tasarrufu sağlıyor (Elektrikport.com, 2019).

Terro (2006) tarafından cam atıkların %0-%100 oranında ince, iri ve hem ince hem de iri agrega yerine kullanımının farklı sıcaklık (20; 60; 150; 300; 500 ve 700°C) etkisiyle değişimi incelenmiştir. Terro, 2006 tarafından sunulan sonuçlarda %10 oranda cam atık içeren tüm numunelerin 150°C ve daha yüksek sıcaklık değeri için kontrol numunesinden daha iyi malzeme performansı gösterdiği belirtilmiştir.

Kılıç vd., (2003) yaptıkları deneysel çalışmada yüksek dayanıma sahip hafif beton elde etmeye çalışmışlardır. Geleneksel agregaya yerine bazik pomza taşı kullanılmıştır. Çimento yerine ise %10 oranında silis dumanı ve %20 oranında uçucu kül kullanılmıştır. 150×300 mm boyutlarında silindirik ve 100×100×150 mm boyutlarında prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Deneysel çalışmanın sonucuna bakıldığında ise agregaya yerine cüruf kullanılarak hafif beton üretilebileceği anlaşılmıştır.

Tablo 2.1. Literatür özeti (Alternatif/Atık malzemeler ile üretilen betonun performansının incelenmesi)

Yazar	Kullanılan Agregası	Araştırma Konusu	Değişken Parametreler	Malzeme Tipi
Lydon (1982)	Doğal perlit agregası	Beton basınç dayanımı	Agrega kullanım oranı	
Gökçe vd. (2010)	Doğal perlit agregası	Beton basınç dayanımı, ultra ses geçiş hızları ve birim hacim ağırlıkları	S/Ç oranı, Granülometri dağılımı	
Topçu vd. (2007)	Genleştirilmiş perlit	Ultras ses geçiş hızı, eğilme deneyi, su emme ve ısı iletkenlik	Granülometri dağılımı, agregası yüzdesi (%0, %10, %20, %30 ve %40)	Doğal kaynak
Mansour (2020)	Doğal perlit agregası	Betonun işlenebilirliği ve mekanik özellikleri	Agrega kullanım oranı	
Chihaoui vd. (2022)	Doğal puzolan ve doğal perlit	Alkali silika reaksiyon direnci	Agrega kullanım oranı (%0, %10 ve %20)	
Ragül vd. (2022)	Doğal perlit agregası	Beton basınç dayanımı	Agrega kullanım oranı (%5, %10, %15 ve %20)	
Tayşi vd. (2017)	Cam elyaf	Betonun basınç, çekme dayanımı ve işlenebilirliği	Cam elyaf kullanım oranı (%0.5, %1 ve %1.5)	
Yalciner vd. (2018)	Geo-grid	Betonarme kırış eğilme ve kesme dayanımı	Korozyon seviyesi (2, 3, 5, 6, ve 9%)	Alternatif malzemeler
Bicer vd. (2018)	Polipropilen lif	Betonarme kırış eğilme dayanımı	Polipropilen lif kullanım oranı (%0.5, %1 ve %1.5)	
Akçaözöğlü (2008)	Pet şişe	Hafif beton üretimi	Pet şişe kullanım oranı	
Emiroğlü vd. (2009)	Atık lastik	Elastisite modülü	Atık lastik kullanım oranı	
Vadivel vd. (2011)	Atık kauçuk lastiği	Beton basınç dayanımı	Atık kauçuk lastiği (0%-6%)	Atık malzemeler
Gonzalez vd. (2014)	Atık seramik	Beton basınç ve çekme dayanımı	Atık seramik kullanım oranı (%5-10)	
Shafiqh vd. (2017)	Palm yağı kazan klinkeri	Beton numunelerin yoğunluk, basınç ve yarmada çekme dayanımı	Palm yağı kazan klinkeri kullanım oranı (0%-50)	

Tablo 2.1. (Devamı).

Çakır vd. (2018)	İnşaat molozu, silis dumanı	Beton çekme dayanımı	Silis dumanı içeriği (%0- 5-10), İnşaat molozu (0- 40%)
Abed vd. (2019)	Odun atığı	Beton basınç dayanımı	Odun atığı kullanım oranı (%25-%30)
Zhang vd. (2020)	Uçucu kül	Rötre çatlakları	Uçucu kül kullanım oranı (0% ve %20.80)
Şahan vd. (2021)	Kazınmış asfalt	Beton basınç dayanımı	Kazınmış asfalt kullanım oranı (%5, %10, %20 ve %30)
Durak vd. (2022)	Atık demir tozu	Betonun aşınma, eğilme ve basınç dayanımı	Atık demir tozu kullanım oranı (%10, %20 ve %30)

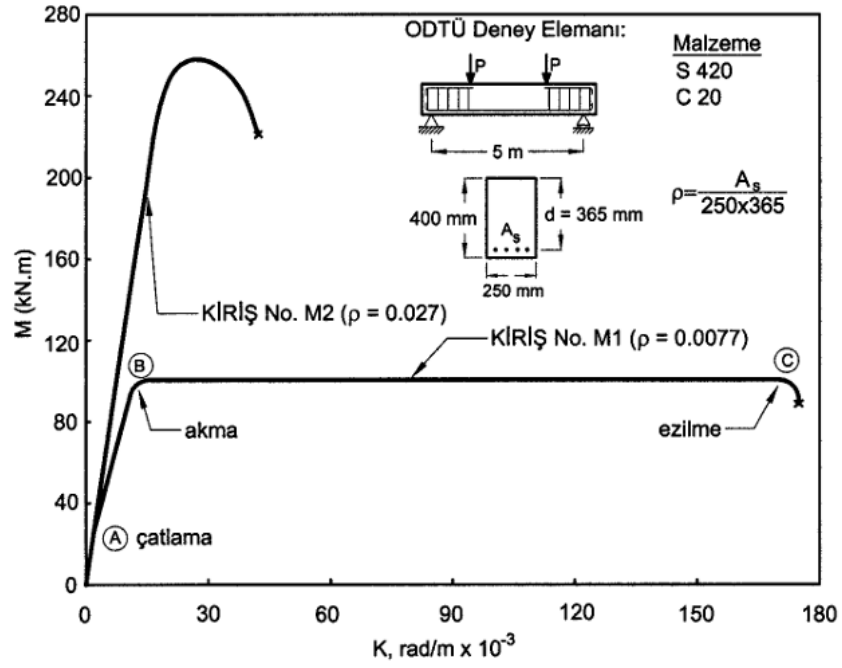
Sonuç olarak incelenen bu çalışmalar sonucunda atık malzemelerin beton içerisinde kullanımı çevresel kirliliği azaltırken aynı zamanda tükenmekte olan doğal kaynaklar üzerindeki baskıyı da azaltmaktadır (Alterra vd., 2019; Gencel vd., 2022).

3. KURAMSAL TEMELLER

Sismik yük etkilerine maruz kalan betonarme yapılardan talep edilen performans istemleri mevcuttur. Bu talepler Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY 2018) zayıf, orta ve şiddetli deprem sınıfları için tanımlanmıştır. Bu bağlamda betonarme yapının tasarım aşamasında yeterli süneklik, yeterli rijitlik ve yeterli dayanım gibi yapısal güvenliğin temel ilkelerine uyumlu olması beklenmektedir. Bu kavramlara ek olarak ekonomik yapılar inşa etmek, hem sürdürülebilirlik hem de ülke öz sermayesi için önem arz etmektedir.

3.1. Süneklik

Betonarme yapıların etkiyen yükler etkisi altında performans durumunu belirleyen parametrelerin başında süneklik gelmektedir. Temel olarak süneklik malzeme, kesit, eleman veya eleman bazında yapının taşıma gücü kapasitesinde büyük bir azalma olmadan deplasman yapabilme veya şekil değiştirme yeteneği olarak tanımlanabilmektedir (Celep ve Kumbasar, 2004). Bu kavramların şematik gösterimi ve tanımlamaları Tablo 3.1’de gösterilmektedir. Sünekliği azaltan temel yük parametreleri, yer ivmelerinin yüksek olması, eksenel yük düzeyi ve çevrimsel yük etkileri olabilir belirtilebilir. Süneklik oranının belirlenmesi için elemanların veya sistemlerin doğrusal ötesi davranışlarının belirlenmesi gerekmektedir (Meral, 2018). Bu kapsamda laboratuvar ortamında gerçekleştirilecek statik ve dinamik yükleme deneyleri büyük öneme sahiptir. Gerçekleştirilen çalışmalarda eleman bazında süneklik kapasitesini etkileyen parametreler genel olarak basınç-çekme donatısı oranı, sargılama etkisi ve eksenel yük oranı olarak belirtilmiştir. Örneğin Şekil 3.1’de çekme donatısı farklı A ve B numunelerine ait eğrilerden çekme donatısı oranının artmasıyla birlikte sünekliğin arttığı görülmektedir.

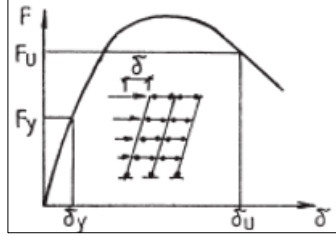


Şekil 3.1. Betonarme kiriş süneklik davranışı (Ersoy vd., 2019).

Tablo 3.1. Süneklik tipleri (Gioncu, 2000).

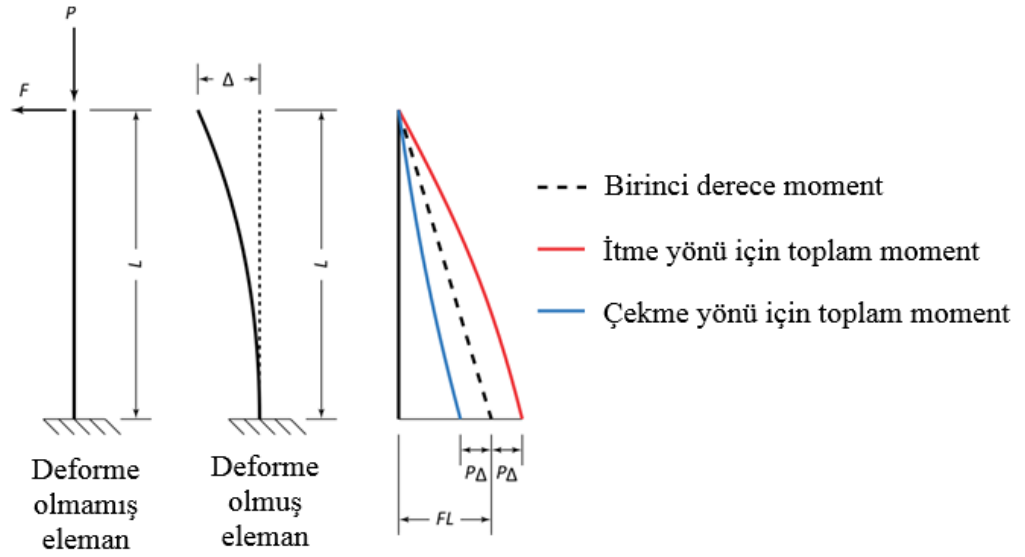
Süneklik tipi	Şematik görüntü	Tanımlama
Malzeme bazında süneklik (Deformasyon Sünekliği)		$\mu_{\epsilon} = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_y}$
Kesit bazında süneklik (Enkesit Sünekliği)		$\mu_x = \frac{x_u}{x_y}$
Eleman bazında süneklik (Dönme Sünekliği)		$\mu_{\theta} = \frac{\theta_u}{\theta_y}$

Tablo 3.1. (Devamı).

Sistem bazında süneklik (Deplasman Sünekliği)		$\mu_{\delta} = \frac{\delta_u}{\delta_y}$
--	--	--

3.2. Rijitlik

Betonarme yapıların sismik performans seviyesini belirleyen bir diğer önemli parametre ise rijitlik değeridir. Yapılarda yeterli rijitlik kavramının önemli olmasındaki amaç; elastik ötesi davranışının ve Şekil 3.2’de görülen ikinci mertbe momenti etkilerini sınırlama olarak belirtilebilir.



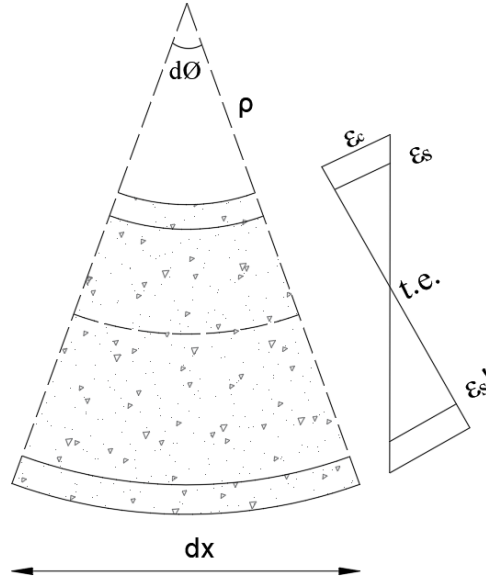
Şekil 3.2. İkinci Mertebe Moment Etkisi: (a) deforme olmamış, (b) deforme olmuş (Burgos ve Silva, 2023).

Bu duruma ek olarak rijitliğin TBDY 2018 yönetmeliği 3.6.2.1 maddesinde de belirtilen ve yapılarda tasarım aşamasında dikkate edilmesi gereken bir konu olan B2 – Komşu Katlar Arası Rijitlik Düzensizliği (Yumuşak Kat) üzerinde de doğrudan etkilidir.

3.3. Moment-Eğrilik İlişkisi

Moment-eğrilik ilişkisi göz önüne alındığında eğilme ve eksenel yükler etkisindeki kesitin davranışı belirlenebilir (Canbay vd.,2010). Betonarme taşıyıcı bir elemanı oluşturan bileşenlerin karakteristik davranışının bilinmesi, bu elemanın moment-eğrilik davranışının tahmin edilmesindeki en temel unsurdur (Srikanth vd., 2007). Betonarme elemanda pas payı çatlaklarının oluşmasının temel sebebi, o elemanın en dış tabakasına etki eden normal kuvvetin betonun çekme dayanımına eşit veya büyük olmasıdır. Betonarme elemanda pas payı çatlakları, pas payı tabakasında dökülmelere sebep olduğu bilinmektedir. Bu dökülme sonucunda betonarme elemanın kesitinde meydana gelen azalma, kesitin eğilme rijitliğini azaltmaktadır. Betonarme eleman, elastik sınırın ardından plastik şekil değiştirmelerle birlikte moment taşıma gücü kapasitesine ulaşır.

İlgili kesitteki birim şekil değiştirmeler veya iki kesit arasındaki dönme açısından, birim boyda meydana gelen dönme açısı olan eğrilik elde edilir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Eğilme etkisi altında betonarme bir kesit (Celep, 2008)

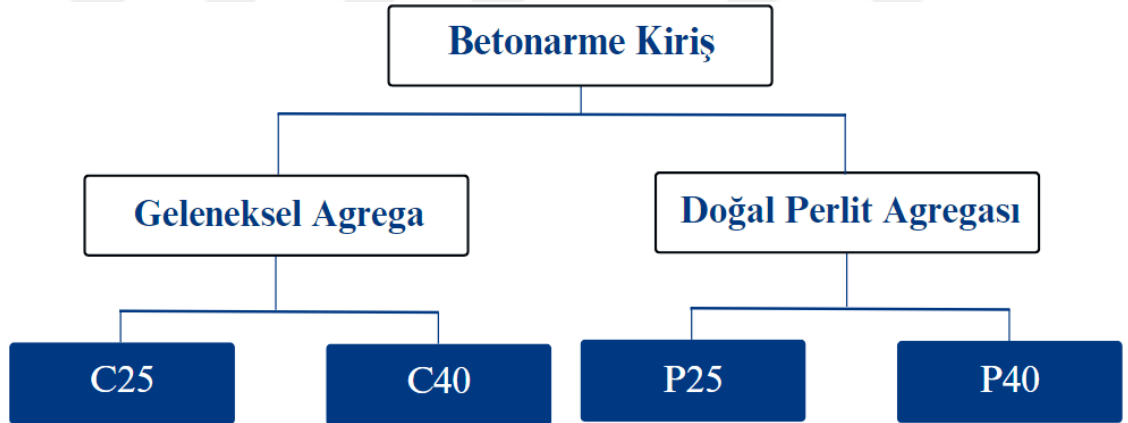
4. MATERYAL ve YÖNTEM

Tez çalışmasının bu bölümünde deneysel çalışma kapsamında üretilen betonarme kirişlerin malzeme-kesit özellikleri, deneysel yükleme ve ölçüm düzeneği detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

4.1. Materyal

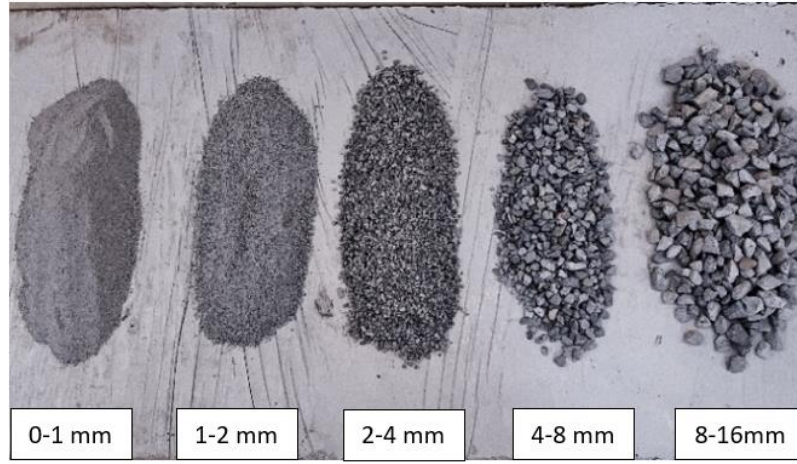
Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi 13 Mart Yapı Mekaniği Laboratuvarında yürütülen deneysel çalışmada doğal perlit agregası ve geleneksel agrega kullanılarak toplamda 4 kiriş numunesi üretilmiştir.

Numune kirişlerin karışmaması için; Basınç dayanımı 25 MPa olan perlitli betondan imal edilen kiriş P25, basınç dayanımı 25 MPa olan geleneksek betondan üretilen kiriş C25, basınç dayanımını 40 MPa olan perlitli betondan üretilen kiriş P40, basınç dayanımı 40 MPa olan geleneksel betondan üretilen kiriş için C40 isimlendirilmesi yapılmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Numunelerin isimlendirilmesi.

Doğal perlit agregasından üretilen beton için; 0-1mm, 1-2mm, 2-4mm, 4-8mm ve 8-16mm olmak üzere 5 farklı boyutta doğal perlit agregası kullanılmıştır. Şekil 4.2' de perlitli beton için kullanılan farklı boyutlardaki agregalar görülmektedir.

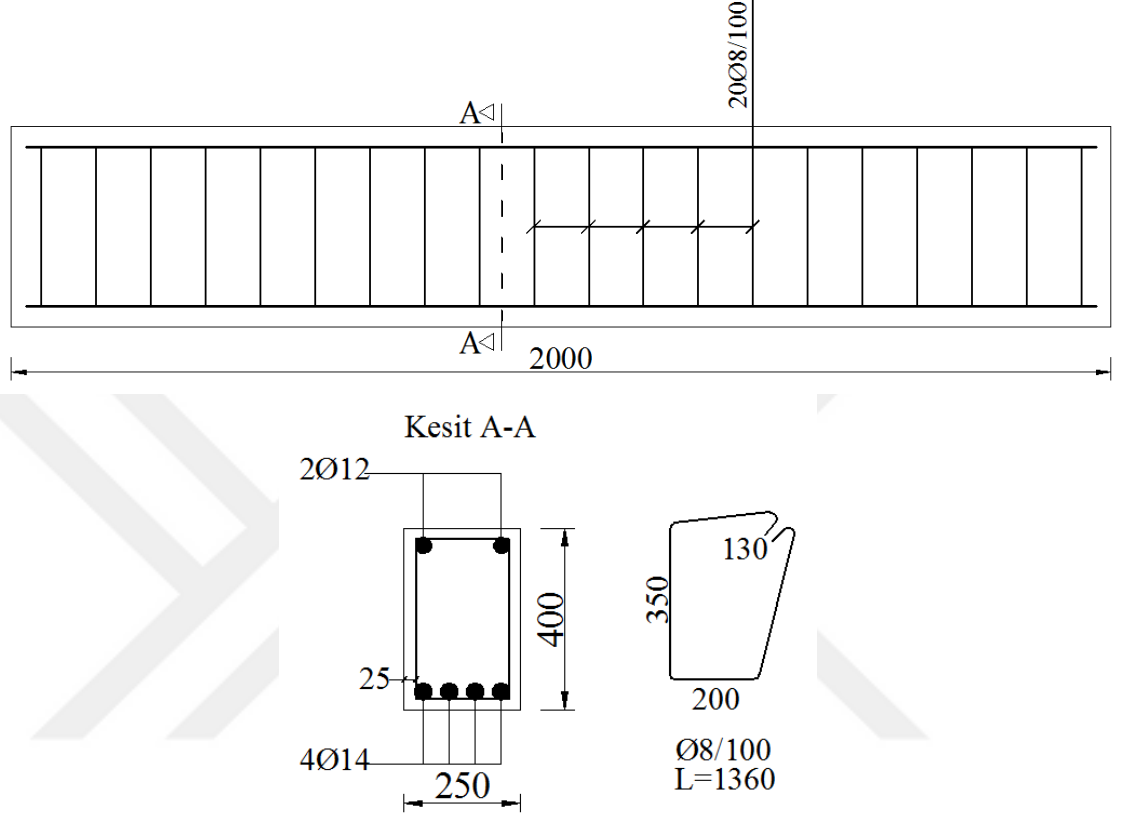


Şekil 4.2. Farklı boyutlarda doğal perlit agregaları.

Üretilen numuneler 25 ve 40 MPa hedef basınç dayanımına göre tasarlanmıştır. Betonarme kirişlerin Şekil 4.3' de gösterilen kesit özellikleri 250 mm genişliğine, 400 mm yüksekliğine ve 2000 mm açıklığından oluşmaktadır.

Betonarme kiriş için donatı düzeni (boyuna donatı ve etriye) hesaplamaları (moment ve kesme kuvvetleri) yönetmeliklerde (TBDY 2018, TS 500 ve TS498) belirtilen hesaplama tasarım esasları, yük kombinasyonları ve varsayımlar dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. İlgili yönetmelikler, betonarme yapı tasarımı için dayanım ve güvenlik esaslarını kapsamaktadır. Donatı düzeni, kirişin boyutları (yükseklik, genişlik), yük durumları (Düzgün yayılı düşey hareketli yük, sabit yük), malzeme özellikleri (beton ve donatı) ve dayanım kriterleri dikkate alınarak TS 500, TS 498 ve TBDY 2018'e uygun bir şekilde belirlenmiştir. Hesaplamalarda kiriş elemanına döşemeden etkiyecek yüklerin belirlenmesi aşamasında mesnet koşullarına göre yük aktarımı dikkate alınmıştır. Bu kapsamda tasarım aşamasında seçilen döşeme tipi $1 < m = \frac{L_l}{L_s} < 2$ koşulunun dikkate alındığı çift doğrultuda döşeme seçilmiştir. Hesaplarda dikkate alınan döşeme sabit yükü 3.50 kN/m^2 , basınç dayanımı dikkate alınarak elde edilen kiriş kendi ağırlığı 15 cm döşeme için 3.75 kN/m^2 ve hareketli yük değeri 5.00 kN/m^2 olarak seçilmiştir. Sabit ve hareketli yüklerin kombinasyonu için ise $P_d = 1.4 \times G + 1.6 \times Q$ şeklinde kabul edilerek hesaplara yansıtılmıştır.

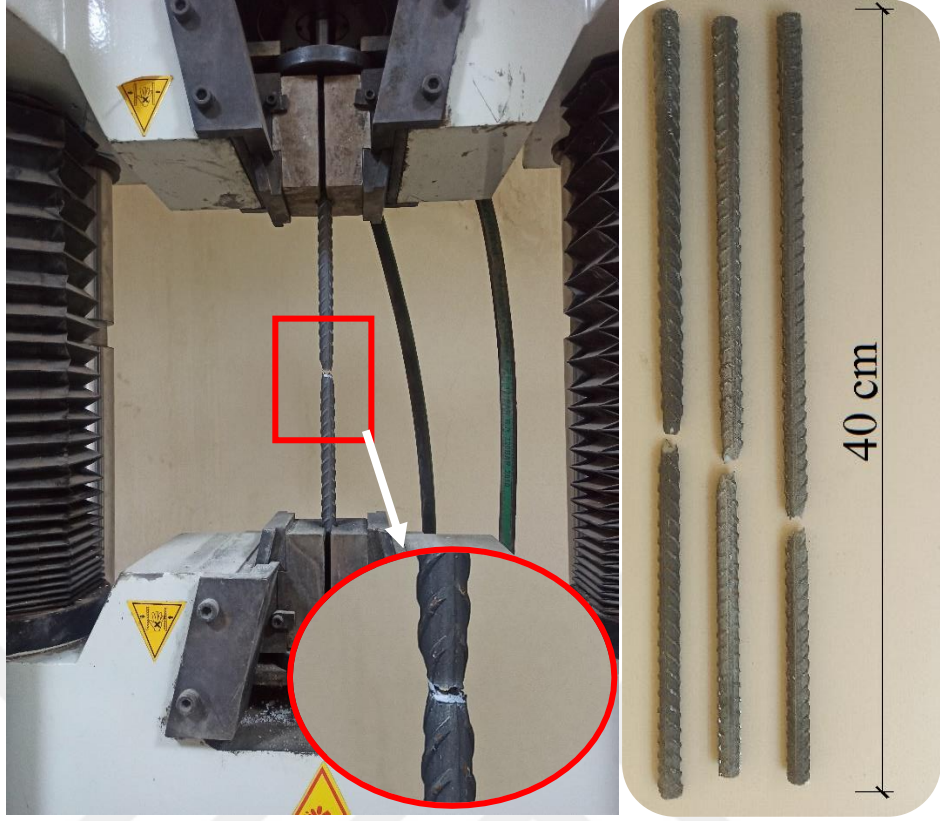
Bu çalışma kapsamında üretilen donatı kafesi TS500 (2018) standartlarına uygun olarak 4 adet 14 mm çapında çekme donatısı, 2 adet 12 mm çapında basınç donatısı ve 20 adet 8 mm çapında 10 cm ara ile etriye kullanılarak imal edilmiştir.



Şekil 4.3. Donatı kafesi kesit özellikleri

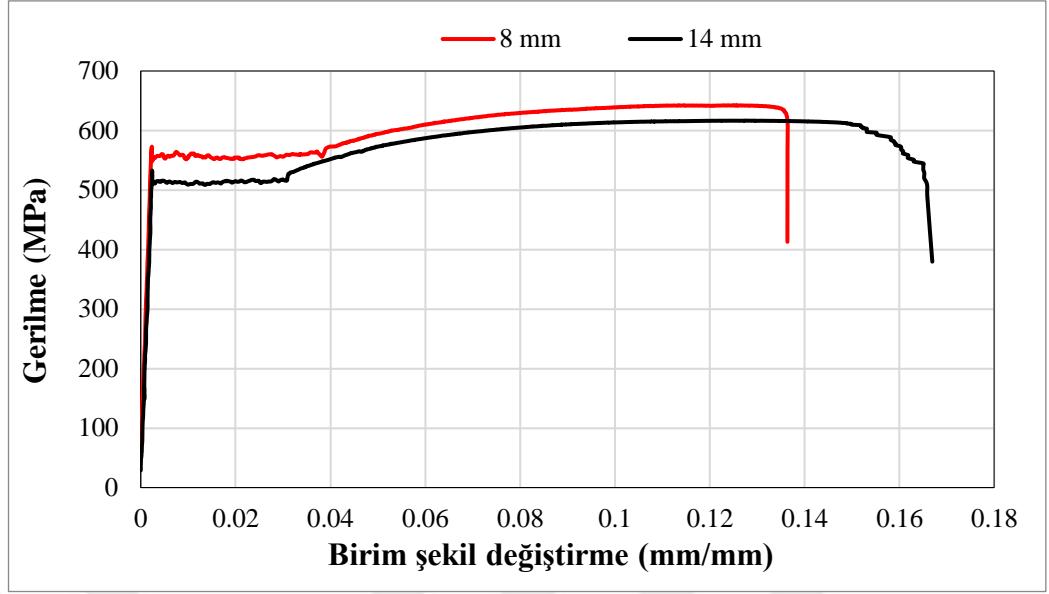
4.1.1. Donatı Mekanik Özellikleri

Deneysel çalışma kapsamında kullanılan çelik donatılar ASTM A370 (ASTM 2002) standartlarına uygun olarak, deneysel çalışma öncesinde 3 adet çekme deneyi yapılarak donatı mekanik özellikleri elde edilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Donatı Çekme Deneyi.

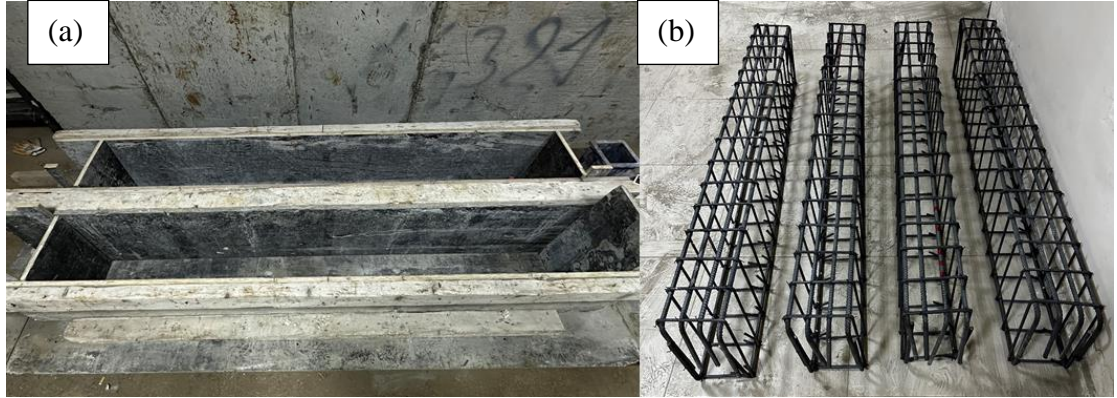
Yapılan çekme deneyi sonucuna göre 14 mm çapına sahip çelik donatının; kopma dayanımı 616 MPa, akma dayanımı 530 MPa, akma ve kopmadaki gerilme değeri 0.00225 ve 0.0137 olarak hesaplanmıştır. 8 mm çapındaki donatının mekanik özellikleri ise; kopma dayanımı 644 MPa, akma dayanımı 572 MPa, akma ve kopmadaki gerilme değeri 0.00245 ve 0.0137 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.5'te donatılara ait gerilme ve birim şekil değiştirme grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Donatı Mekanik Özellikleri.

4.1.2. Numunelerin Hazırlanması

Deneysel çalışma kapsamında 4 adet 14 mm çapında çekme donatısı, 2 adet 12 mm çapında basınç donatısı ve 20 adet 8 mm çapında 10 cm ara ile etriye kullanılarak donatı kafesleri hazırlanmıştır.



Şekil 4.6. Betonarme Numunelerinin Yapım Aşamaları: (a) Betonarme kiriş kalıpları, (b) Donatı kafesleri.

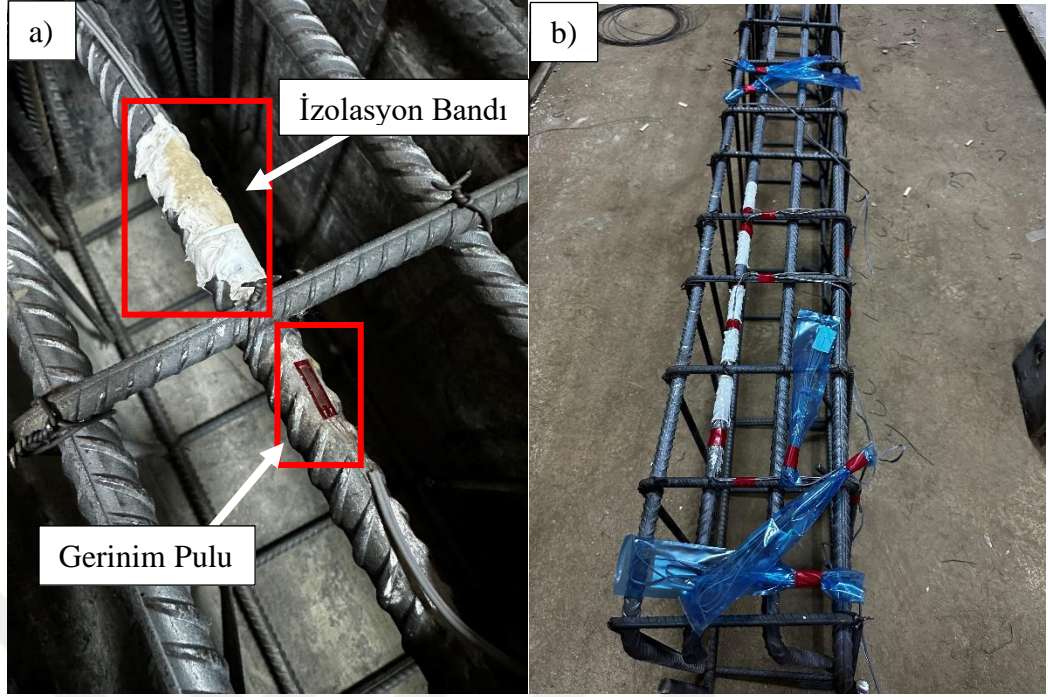
Donatı kafesleri hazırlandıktan sonra çekme donatılarındaki birim deformasyonları, gerçek aderans boyunu ve aderans gerilmesini hesaplayabilmek için 10mm'lik 5 adet gerinim pulu çekme bölgesindeki bir adet donatıya yerleştirilmiştir. Yerleştirme işlemi öncesi doğru veri alabilmek ve gerinim pulunu sağlıklı bir şekilde yapıştırmak için, donatı

üzerinde gerinim pullarının yapışması gereken kısımlar belirlenip o kısımda Şekil 4.7’de görüldüğü üzere donatının nervürlü yüzeyi taşlanıp düzgün bir yüzey oluşturulmuştur.



Şekil 4.7. Donatı taşlama işlemi.

Taşlanan ve düzgün bir yüzey elde edilen donatıya gerinim pulları dikkatli bir şekilde yapıştırıldıktan sonra, beton döküm işlemi sırasında gerinim pullarına zarar gelmemesi için özel izolasyon bantları gerinim pullarının üzerine yapıştırılmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Betonarme Donatısına Gerinim Pulu Uygulama Aşamaları: **(a)** Gerinim pulu yapıştırma aşaması, **(b)** Döküme hazır donatı kafesi.

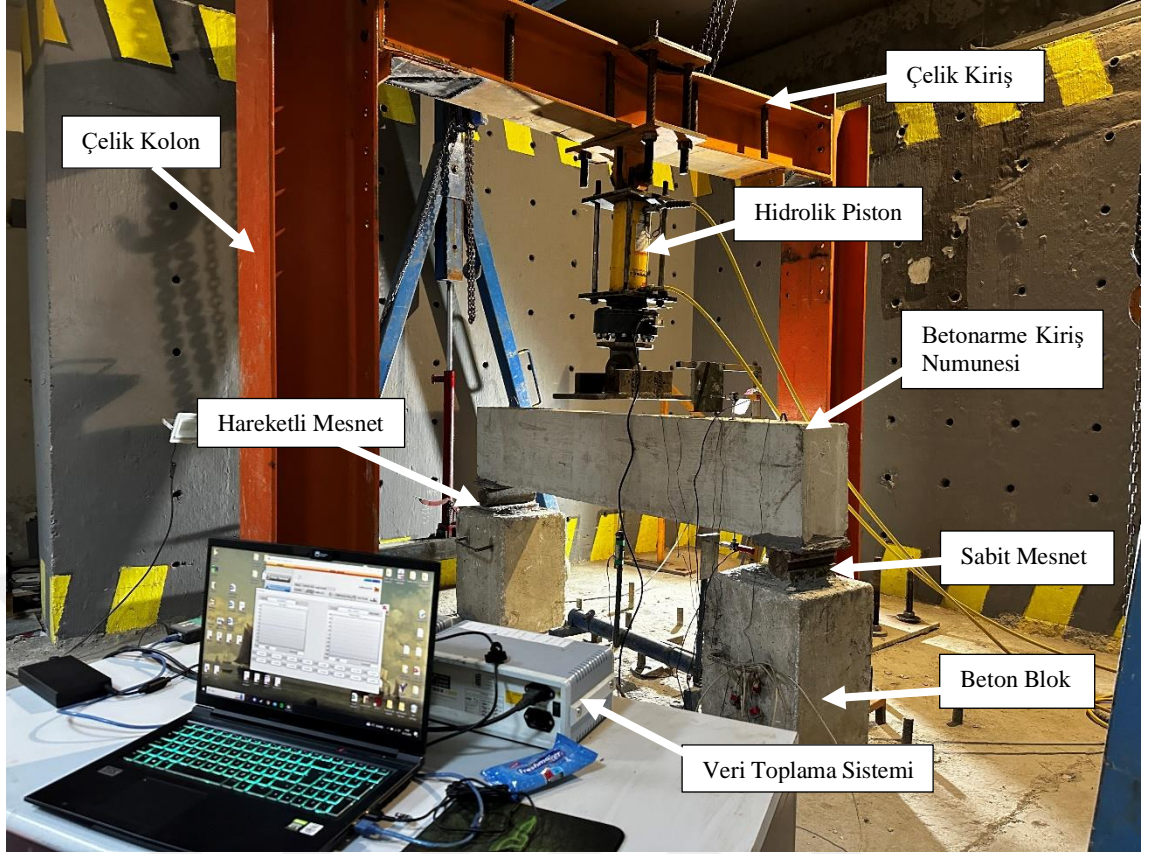
Çalışma kapsamında hazırlanan ply-wood malzemesinden yapılmış kalıplar kalıp yağı ile yağlandıktan sonra donatı kafesleri kalıplara yerleştirilmiş olup beton döküm işlemi gerçekleştirilmiştir.

4.2. Yöntem

4.2.1. Yükleme Düzeneği

Deneysel çalışma kapsamında P25, P40, C25, C40 şeklinde adlandırılan 4 adet betonarme kiriş numunesi imal edilmiştir. İmal edilen kirişler, Şekil 4.9’da gösterilen deney düzeneğinde eğilme testine tabii tutulmuştur.

Yükleme deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için Şekil 4.9’da gösterilen çelik çerçeve sistemi imal edilmiştir. Çelik çerçeve sistemi 2 kolon ve 1 kiriş den oluşmaktadır. Çelik çerçeve sisteminin kolonları güçlü zemine 8 adet bulonla sabitlenmiştir. Yükleme deneyleri sırasında çerçeve sisteminde yer alan x doğrultusundaki kirişteki deformasyonlar ise yükleme sırasında kaydedilmiştir ve herhangi bir deformasyonun olmadığı saptanmıştır.



Şekil 4.9. Deney Düzenegi.

Deneysel çalışma kapsamında yükleme deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle betonarme kirişleri 2 adet rijit beton blok üzerine yerleştirilmiştir. Rijit beton blokların üzerine 2 adet çelikten imal edilmiş levhalar yerleştirilmiş ve kirişlerin mesnet şartları sağlanmıştır. Tüm tez çalışması kapsamında betonarme kirişleri için bir sabit ve bir hareketli mesnet kullanılmıştır.

Yükleme deneyleri için 600 kN yük kapasiteli piston aracılığıyla yük aksenal yönde, kirişin orta açıklık bölgesinden yüklenilmiş ve yük hücresi yardımıyla da eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Yükleme sırasında betonarme kirişlerinde eksantrisite meydana gelmemesi için yükleme sisteminde bulunan piston ile yükleme plakası mafsallı olarak birleştirilmiştir.

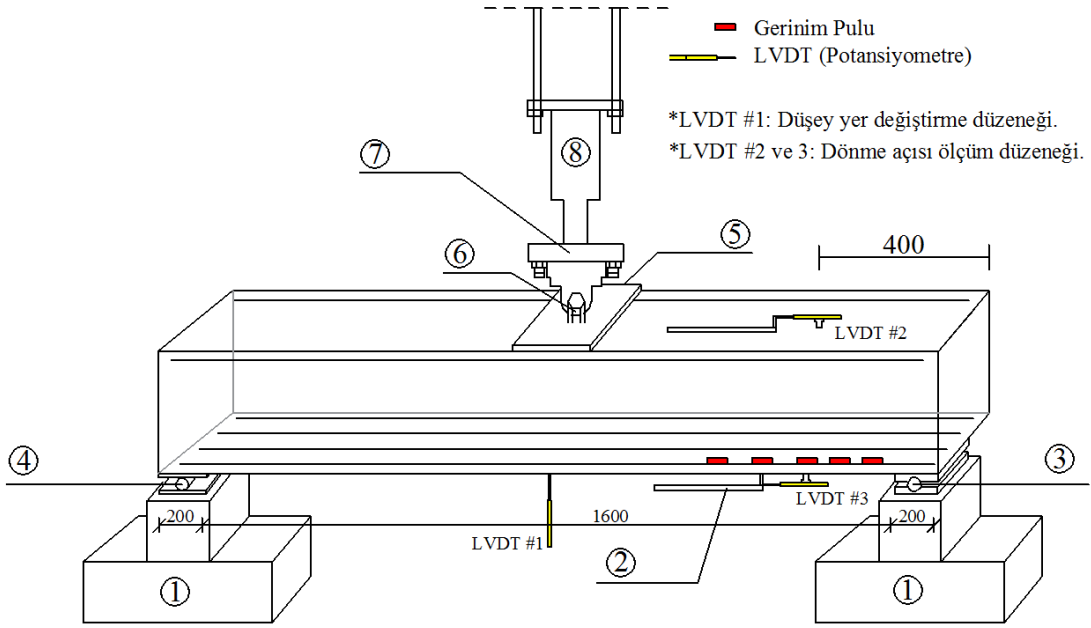
4.2.2. Ölçüm Düzenegi

Ölçüm düzenegi için beş adet LVDT (Linear variable differential transformer) kullanılmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Potansiyometre (50 mm ölçüm kapasitesi)

Şekil 4.11’de şematik olarak gösterilen deney düzeneğinde; betonarme kirişindeki maksimum yer değiştirmeyi ölçmek için kiriş açıklığının orta bölgesine LVDT#1, betonarme kirişlerindeki eğrilik ve dönmeyi hesaplamak için ise kiriş alt ve üst bölgesine, mesnet bölgesinden kiriş orta bölgesine doğru 400 mm açıklığa LVDT#2 ve 3 yerleştirilmiştir.



Şekil 4.11. Deney Düzeneği Şematik Gösterimi.

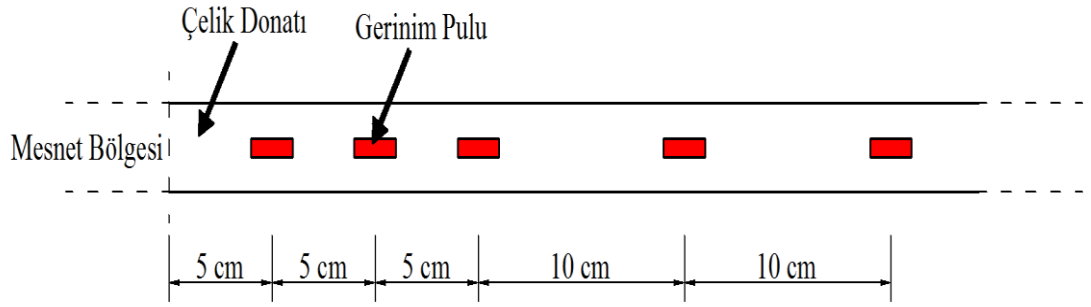
Tablo 4.1. Deney Düzeneği Materyalleri

Numara	Açıklama
1	Rijit Beton Mesnet
2	Çelik Plaka
3	Sabit Mesnet
4	Hareketli Mesnet

Tablo 4.1. (Devamı).

5	Yükleme Plakası
6	Mafsal
7	Yük Hücresi
8	Hidrolik Piston

Deneysel çalışma kapsamında imal edilen betonarme kirişlerin, çekme donatılarındaki birim deformasyonları, gerçek aderans boyunu ve aderans gerilmesini hesaplayabilmek için 5 adet gerinim pulu kullanılmıştır. Şekil 4.12’de gösterildiği üzere gerinim pulları, kirişin sağ mesnet bölgesinden 5cm açıklıkta başlayıp sırasıyla 5cm, 5cm, 10cm ve 10cm aralıklarla çekme bölgesindeki bir donatıya yerleştirilmiştir.

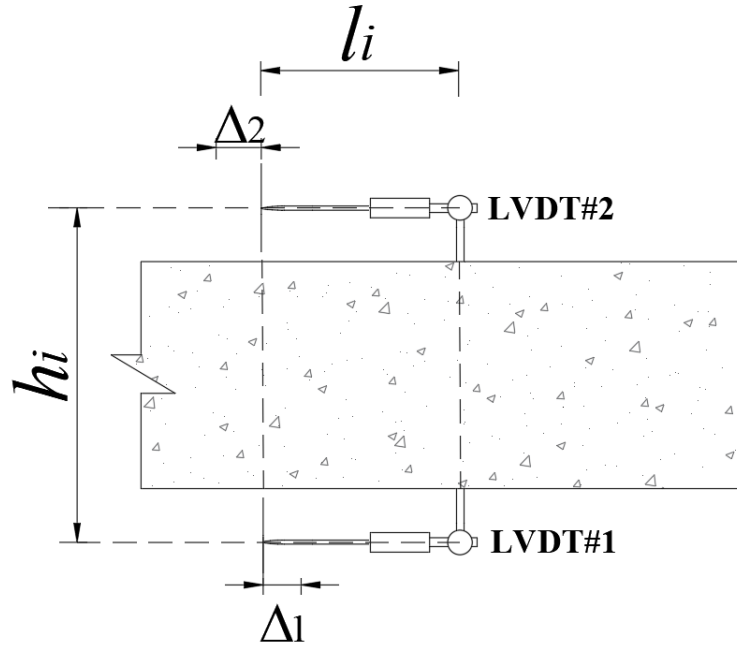


Şekil 4.12. Gerinim Pulu Yerleşimi Şematik Gösterimi.

Çalışma kapsamında deneysel eğrilik değerini hesaplamak için Şekil 4.13’te şematik olarak gösterildiği gibi kiriş numunesine düşey ekseninde paralel iki adet yer değiştirme ölçer monte edilmiş, l_i ve h_i değerleri kayıt altına alınmıştır. Elde edilen ölçüm değerlerinde düzlem kesitin, eğilmeden sonra düzlem kaldığı varsayılmıştır. Dönme ve eğrilik değerleri Denk. 4.1 ve 4.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem 4.1 ve 4.2’de sırasıyla θ_i dönme açısını ve ϕ_i ise eğrilik değerini temsil etmektedir.

$$\theta_i = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{h_i} \quad (4.1)$$

$$\phi_i = \frac{\theta_i}{l_i} \quad (4.2)$$



Şekil 4.13. Eğrilik değerlerinin ölçümü.

Yükleme deneylerinde yük hücresi, şekil değiştirme ölçer ve deplasman ölçerlerden alınan ham verilerin bilgisayar ortamında kaydedilmesi amacıyla her biri 8 kanala sahip TESTBOX1001 model toplamda 4 veri toplama cihazı kullanılmıştır. Şekil 4.14'te gösterilen veri toplama sistemi yazılımı ile kalibre edilen ölçüm aparatları için her 1 saniye için ham veriler elde edilmiştir.



Şekil 4.14. Veri toplama cihazı.

Tablo 4.2. Ölçüm, yükleme ve veri toplama sisteminde kullanılan cihazlar.

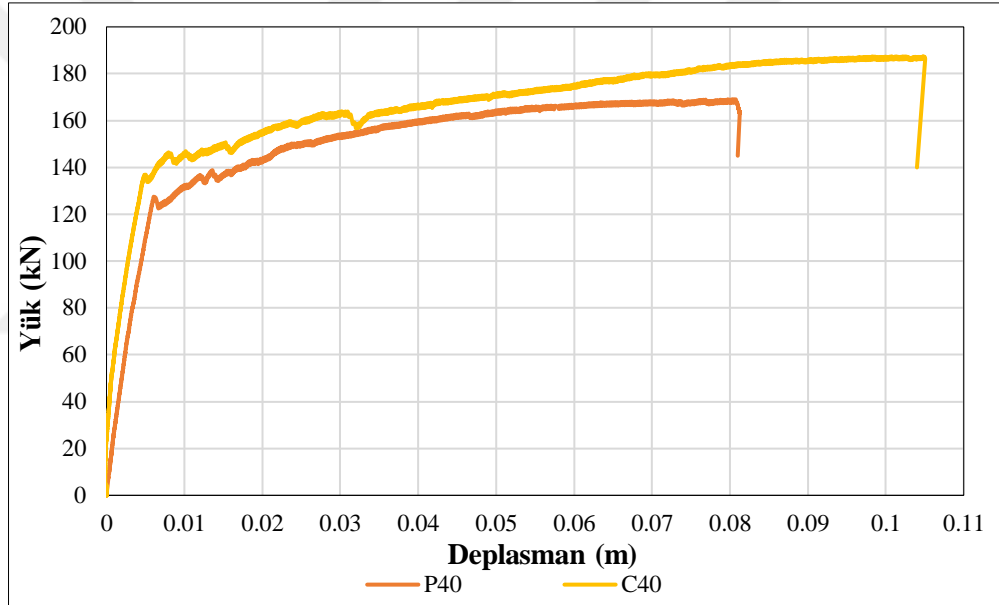
Malzeme Adı	Kullanım Amacı	Marka	Kapasite
Yer değiştirme ölçer	Toplam düşey yer değiştirmenin ölçümü	OPKON	200 mm
Yer değiştirme ölçer	Birim dönme açılarının elde edilmesi	OPKON	50 mm, 100 mm
Birim şekil değiştirme ölçer	Donatıda meydana gelen şekil değiştirmelerin ölçümü	TML	10 mm
Veri aktarma cihazı	Ölçüm aletlerinden elde edilen verilerin dijital ortama aktarılması	Testbox 1001	8 Kanallı
Yük hücresi	Uygulanan yanal yükün tespit edilmesi	CAS	100 Ton
Hidrolik piston	Yanal yükleme	Enerpac	60 Ton
Hidrolik piston	Eksenel yükleme	Enerpac	100 Ton
Çift etkili el pompası	Hidrolik pistonun yük aktarımını sağlama	Enerpac	700 Bar

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Betonarme kiriş numunelerinin yükleme deneylerinden elde edilen ölçüm verileri ışığında yük deplasman eğrileri oluşturulmuştur. Ek olarak elde edilen yük-deplasman eğrilerinin altında kalan alanların hesaplanmasıyla betonarme kirişlerin göçme moduna ulaşınca kadar tüketmiş oldukları enerji değerleri elde edilmiştir.

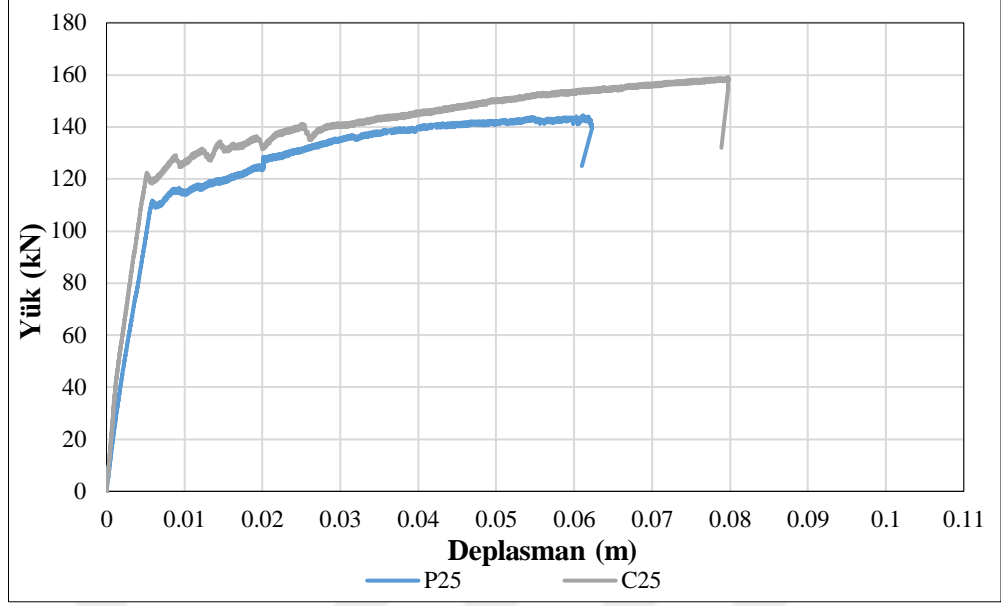
5.1. Yük-Deplasman İlişkisi

Betonarme kiriş deneylerinden elde edilen yük ve deplasman verileri ışığında Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'deki yük - deplasman eğrileri çizilmiştir.



Şekil 5.1. P40 ve C40 Numuneleri Yük-Deplasman Eğrisi.

Şekil 5.1 incelendiğinde P40 numunesinin taşıma gücü kapasitesi, C40 numunesine göre %9.4 oranında azaldığı görülmüştür.

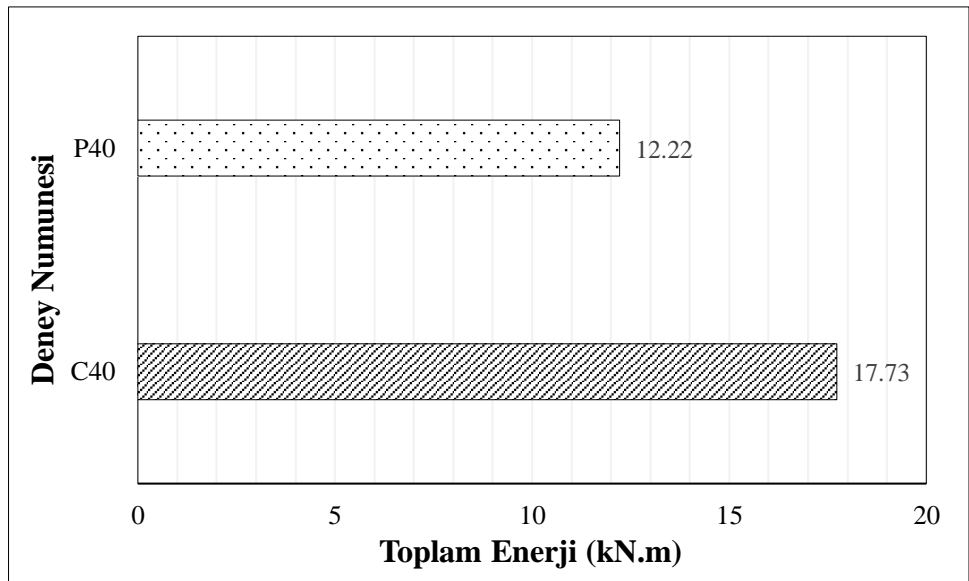


Şekil 5.2. P25 ve C25 Numuneleri Yük-Deplasman Eğrisi.

Şekil 5.2 incelendiğinde P25 numunesinin taşıma gücü kapasitesi, C25 numunesine göre %9.8 oranında azaldığı görülmüştür.

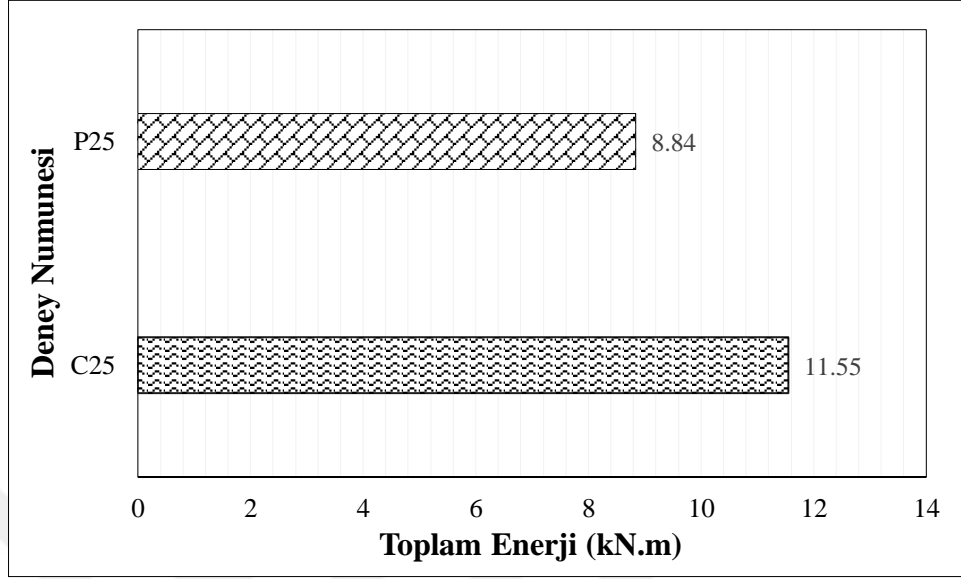
5.2. Enerji Kapasiteleri

Dış yükler etkisi altında hasara uğrayan betonarme kirişlerin yük-deplasman eğrilerinin sınırladığı bölgelerin altında kalan alanların hesaplanmasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de verilen enerji kapasiteleri hesaplanmıştır.



Şekil 5.3. P40 ve C40 Numunelerinin Enerji Kapasiteleri.

Şekil 5.3’deki enerji kapasiteleri incelendiğinde P40 numunesinin enerji kapasitesi, C40 numunesine göre %31.08 oranında azaldığı görülmektedir.



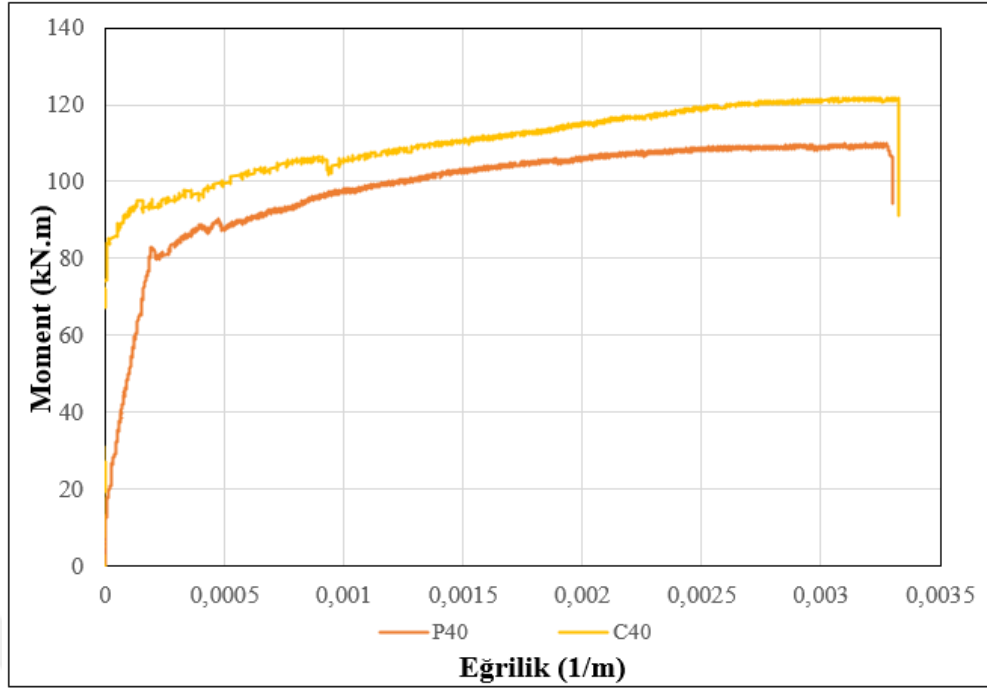
Şekil 5.4. P40 ve C40 Numunelerinin Enerji Kapasiteleri.

Şekil 5.4’deki enerji kapasiteleri incelendiğinde P25 numunesinin enerji kapasitesi, C25 numunesine göre %23.5 oranında azaldığı görülmektedir.

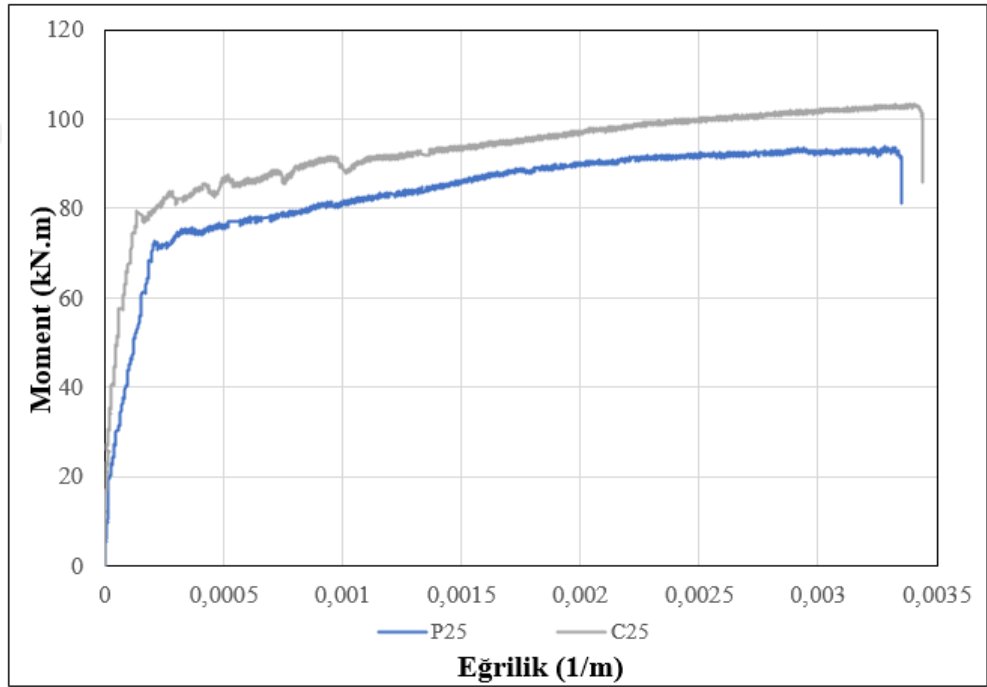
Geleneksel beton ve perlit agregası ile üretilen betonlardan imal edilmiş 25 MPa beton basınç dayanımına sahip özdeş kirişlerin enerji yutma kapasiteleri Şekil 5.3’de, 40 MPa beton basınç dayanımına sahip özdeş kirişlerin enerji yutma kapasiteleri ise Şekil 5.4’de gösterilmiştir. Toplam enerji yutma kapasiteleri incelendiğinde geleneksel betondan imal edilen kirişlerin, perlitli betondan imal edilen kirişlere göre enerji yutma kapasitesinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

5.3. Moment – Eğrilik İlişkileri

Deneş numunelerine yerleştirilen potansiyometrelerden alınan veriler ve konumları kullanılarak elde edilen moment - eğrilik ilişkileri Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da görülmektedir. Elde edilen moment - eğrilik ilişkileri dikkate alındığında numunelerin moment-eğrilik değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir.



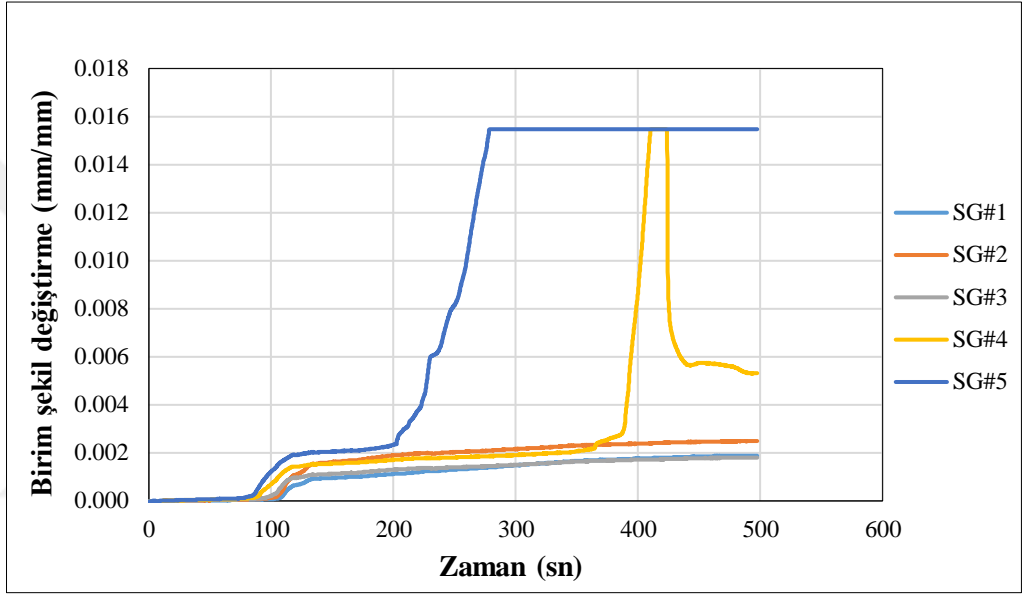
Şekil 5.5. P40 ve C40 Numunesi Moment-Eğrilik İlişkisi.



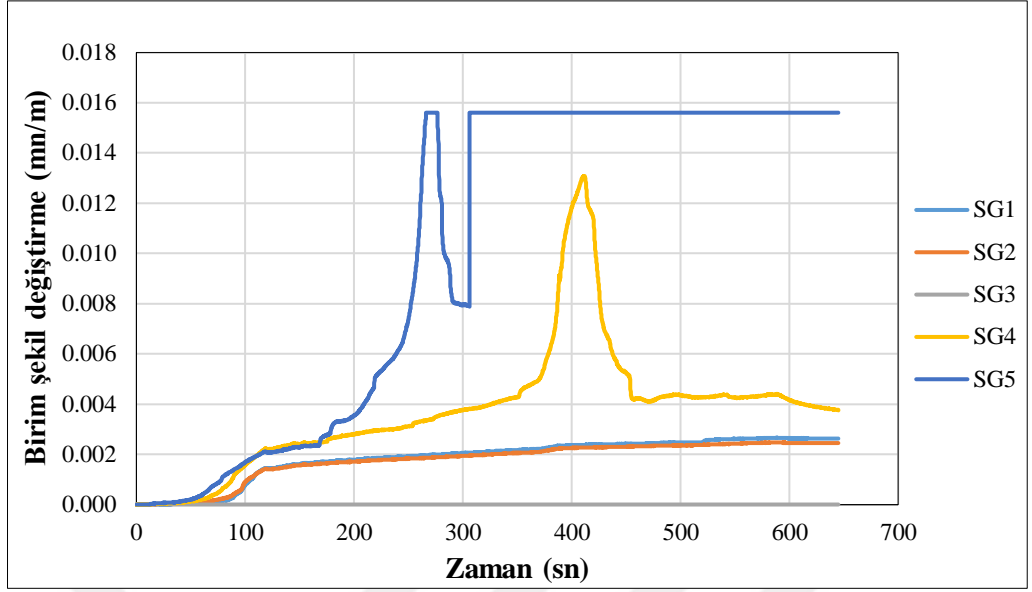
Şekil 5.6. P25 ve C25 Numunesi Moment-Eğrilik İlişkisi.

5.4. Donatı Birim Deformasyon İlişkileri

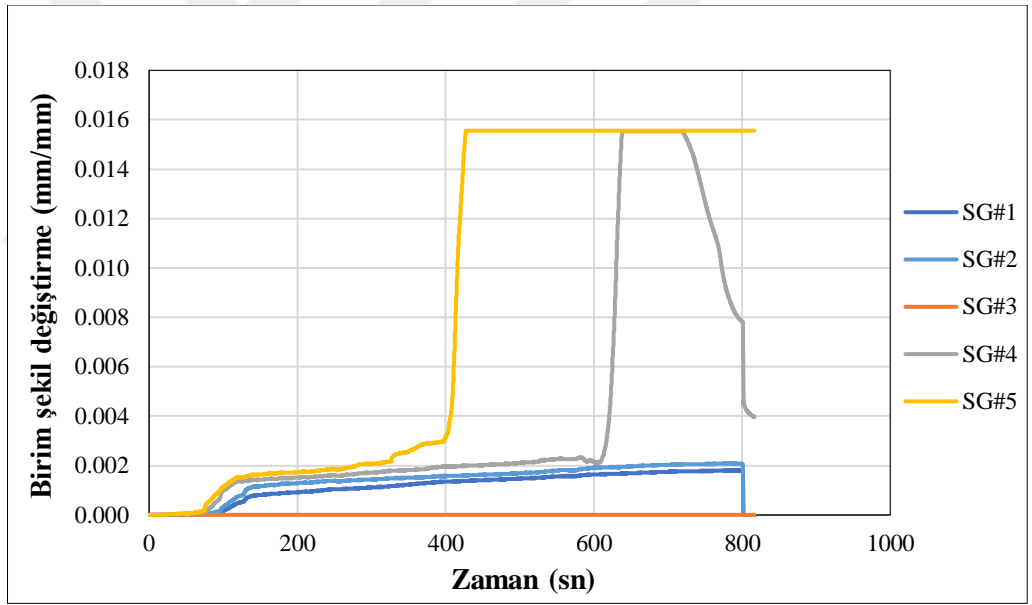
Çekme bölgesindeki donatılara yerleştirilen birim şekil değiştirme ölçerlerden elde edilen şekil değiştirme verilerinin zamana bağlı değişimi şekilde gösterilmektedir. Grafikler incelendiğinde perlitli betonarme kirişlerin daha erken akma konumuna ulaştığı görülmektedir. Bu durum perlitli kirişlerin taşıma gücü kapasitelerinin daha erken tükenme sebeplerinden biridir. Artan yükte birlikte betonarme kirişlerin tüm donatılarının akma konumuna ulaştığı tespit edilmiştir.



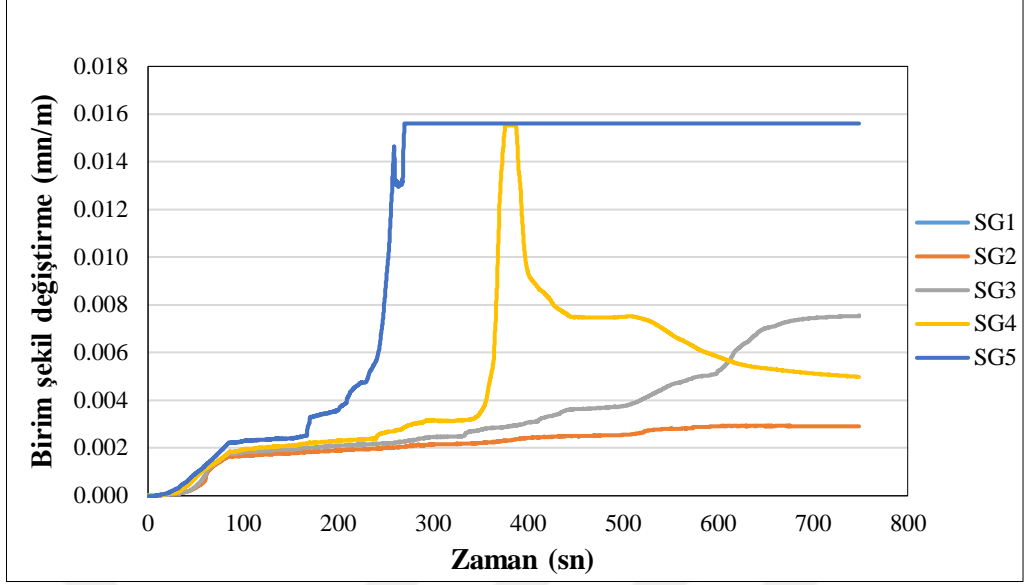
Şekil 5.7. C40 Numunesi Çekme Donatısı Birim Şekil Değiştirme-Zaman Grafiği.



Şekil 5.8. P40 Numunesi Çekme Donatısı Birim Şekil Değişirme-Zaman Grafiği.



Şekil 5.9. C25 Numunesi Çekme Donatısı Birim Şekil Değişirme-Zaman Grafiği.



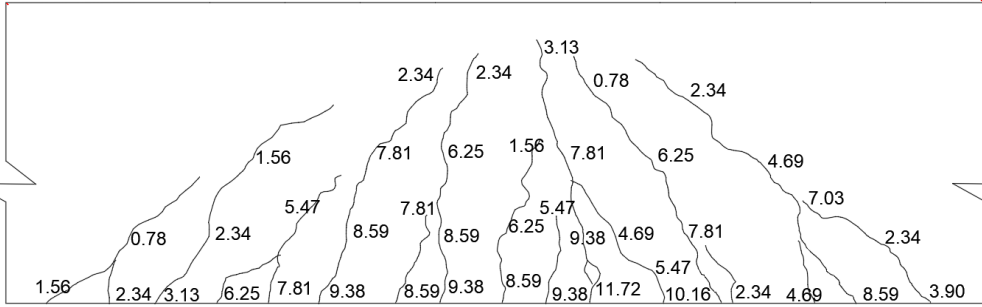
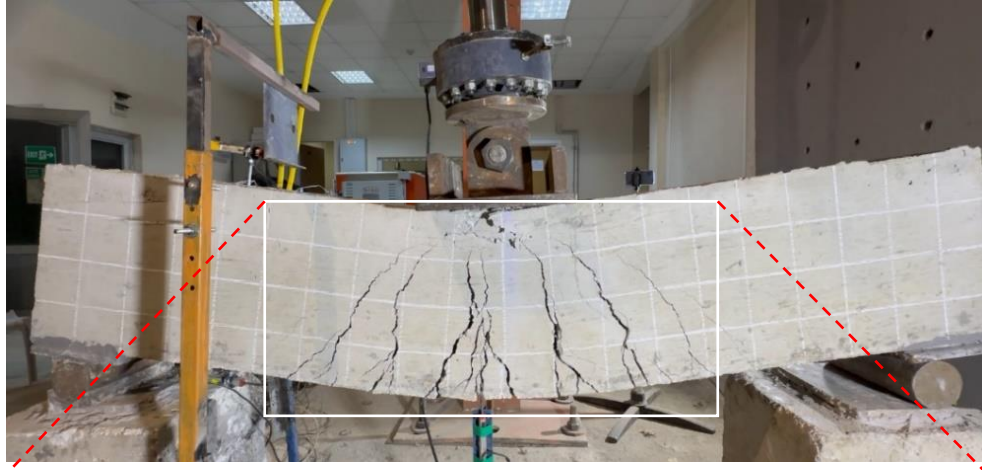
Şekil 5.10. P25 Numunesi Çekme Donatısı Birim Şekil Değişirme-Zaman Grafiği.

5.5. Betonarme Kirişlerin Hasar Durumları

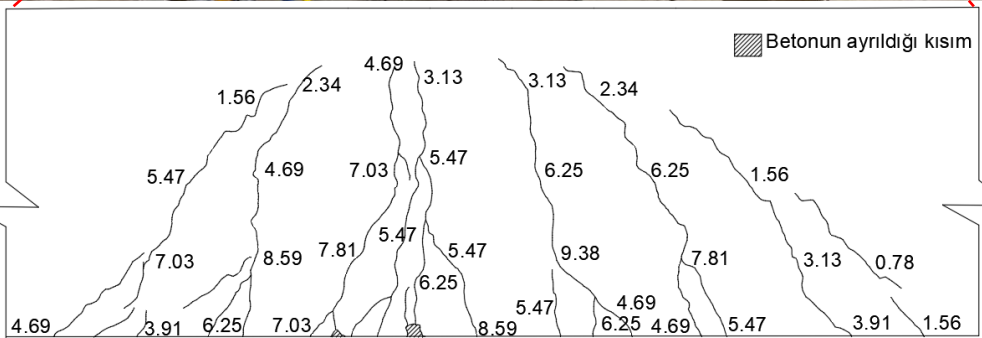
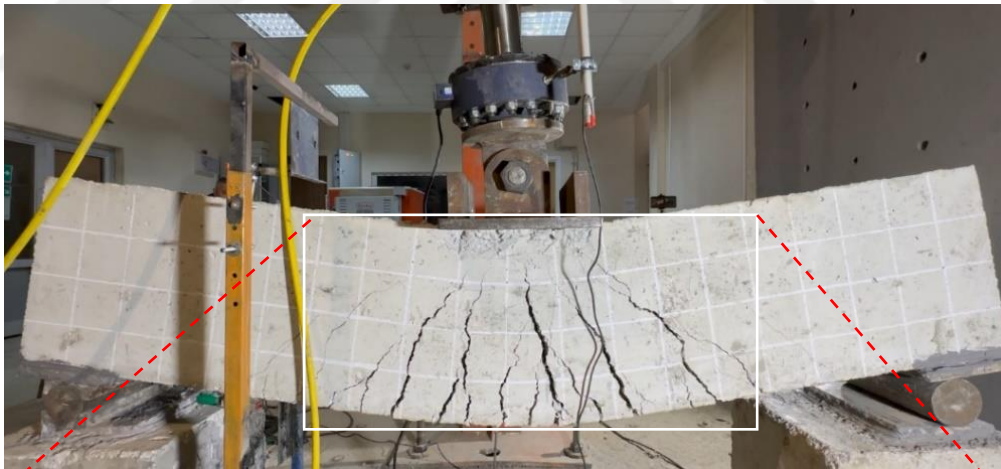
Betonarme kirişlerin yükleme deneyi sonrası hasar durumları ve çatlak genişliği haritaları Şekil 5.11-5.14'de görülmektedir. Numunelerin çatlak dağılımları incelendiğinde tüm numuneler için özdeş bir şekilde kiriş orta açıklık bölgesinde çatlak genişliklerinin maksimum değere ulaştığı, açıklık bölgesinden mesnet bölgesine doğru çatlak genişliklerinin daraldığı ve en uç noktalarda ise çatlakların kılcal hale geldiği görülmektedir. Tablo 5.1'de sunulan özet çatlak genişliği değerlerinden geleneksel beton kiriş numunelerinin ortalama çatlak genişliklerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 5.1. Numunelere ait çatlak değerleri

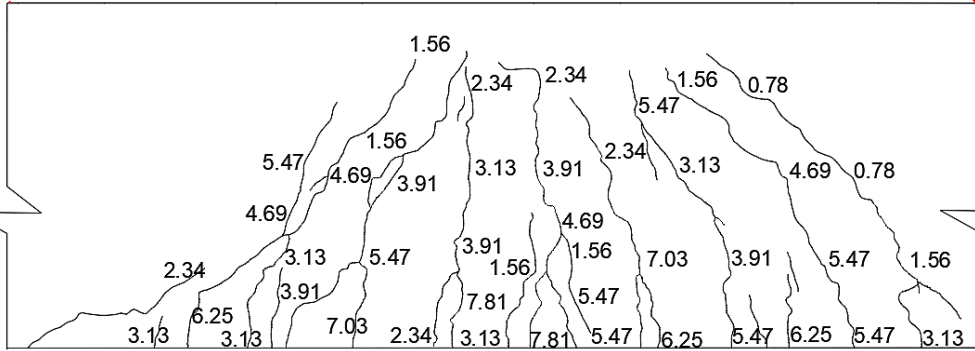
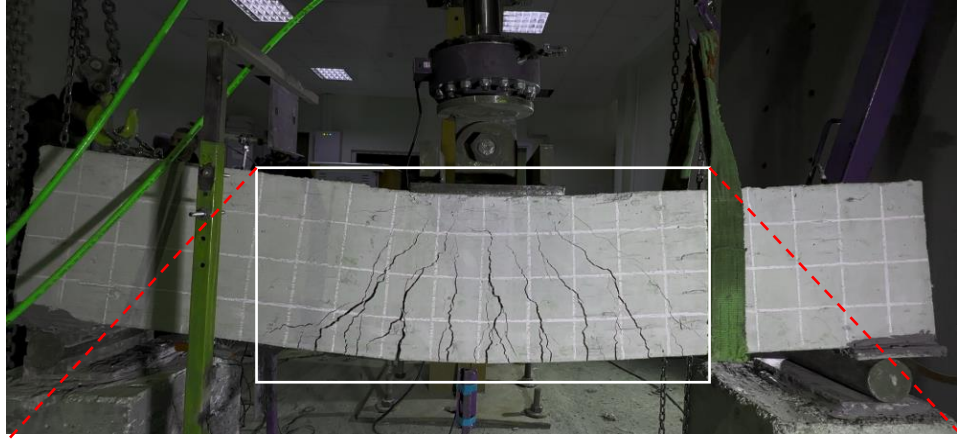
Numune	Min. Çatlak Genişliği	Max. Çatlak Genişliği	Ortalama Çatlak Genişliği
C25	0,78	11,72	5,64
C40	0,78	9,38	5,09
P25	0,78	7,81	3,96
P40	0,78	7,81	3,79



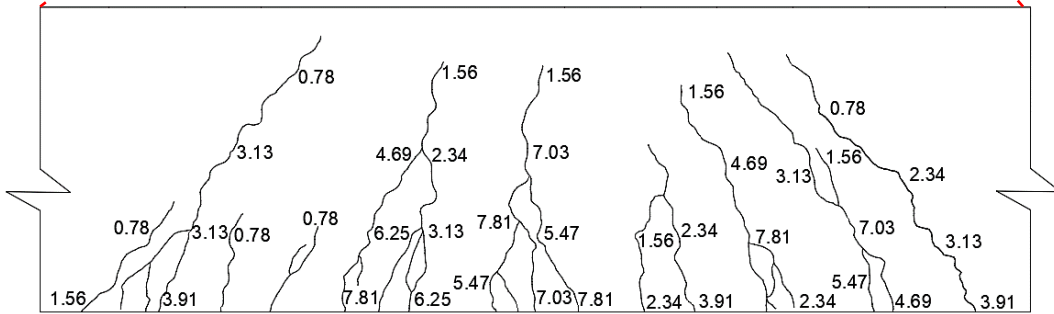
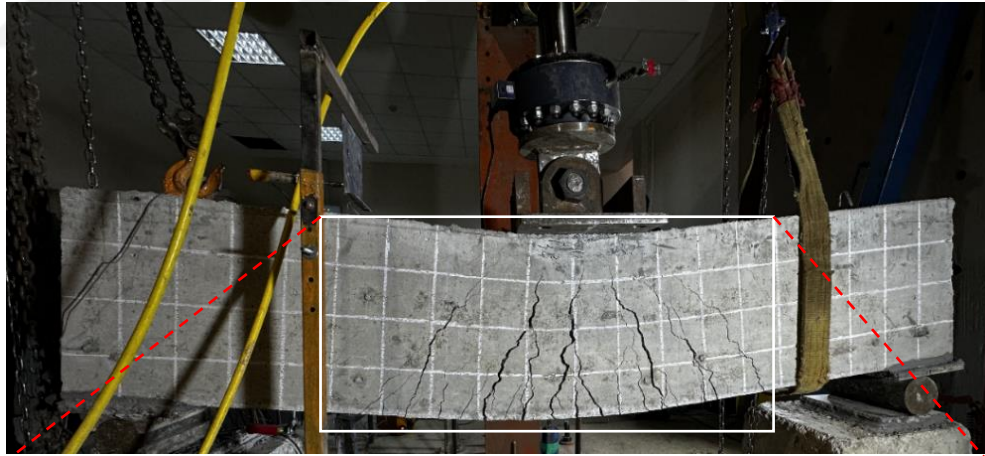
Şekil 5.11. C25 Kirişi



Şekil 5.12. C40 Kirişi



Şekil 5.13. P25 kirişi



Şekil 5.14. P40 Kirişi

6. SONUÇLAR

Doğal perlit agregası ve geleneksel agregası kullanılarak üretilen iki farklı beton basınç dayanımına sahip özdeş kirişler monotonik yük etkisi altında salt eğilme deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda betonarme kiriş numunelerin yük-deplasman ilişkisi, moment-eğrilik ilişkisi ve kümülatif enerji kapasiteleri bakımından değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Aynı basınç dayanımı dikkate alındığında doğal perlit agregası ile üretilen numunelere ait yük-deplasman eğrisinin altında kalan alan geleneksel agregası ile üretilen betonarme kirişlerin yük deplasman eğrisinin altında kalan alana göre daha sınırlıdır. Bu durum perlitli betonun kesit bazındaki şekil değiştirmelerinin geleneksel betona göre oldukça sınırlı olmasından kaynaklanmaktadır.

- Deney numunelerinin başlangıç rijitlikleri dikkate alındığı zaman 100 kN'a kadar benzer davranış sergilediği, fakat artan yük etkisine bağlı bozulmalarla birlikte doğal perlit agregasından üretilen numunelerin rijitlik bozulmalarının daha hızlı olduğu gözlenmiştir.

- Yükleme deneylerinin tamamlanmasının ardından ölçümsel olarak oluşturulan çatlak dağılımı haritalarından geleneksel betonarme kiriş numunelerinin daha büyük çatlak genişliği değerine sahip olduğu görülmüştür. Perlitli numunelerde oluşan kılcal çatlaklar sınırlı düzeyde kalmıştır.

KAYNAKLAR

- Akkaş, A. (2011) “Pomza agregalı taşıyıcı hafif betonun taşıyıcılık özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Hossain, K. M. A. (2004) “Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete”, *Cement and concrete research*, 34(2), 283-291.
- Hüsem, M. (1995) “Doğu karadeniz bölgesi hafif agregalarından biriyle yapılan hafif betonun geleneksel bir betonla karşılaştırmalı olarak incelenmesi” Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Ersoy, U., Özcebe, G., Canbay, E. (2019) Betonarme davranış ve hesap ilkeleri, *Evrım Yayınevi*, Ankara.
- ASTM A370-02 (2002) “Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products”, *American Society for Testing Materials*.
- TBDY (2018) “Türkiye bina deprem yönetmeliği”, *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*, Ankara.
- TS500 (2018) “Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları”, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS498 (1997) “Yapı elemanlarının boyutlandırmasında alınacak yüklerin hesap değerleri”, *Türk Standartlar Enstitüsü*, Ankara.
- ACI 213R-03 (2003) “Guide for structural lightweight-aggregate concrete”, ACI Committee 213 Report, *American Concrete Institute*, USA, 38.
- ACI 211.2-81 (1981) “Standard practice for selecting proportions of structural lightweight concrete” *American Concrete Institute*, USA.
- Eren, H., İlkentapar, S., Durak, U. (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.
- Azizi, S. (2007) “Perlit katkılı hafif betonların mekanik özellikleri ve ısı yalıtımı”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Celep, Z., Kumbasar, N. (2004) Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı, *Beta Dağıtım*, İstanbul.
- Meral, E. (2018) “Yapısal parametrelerin betonarme kolonların eğrilik sünekliğine etkileri”, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1(1), 28-43.

- Gioncu, V. (2000) “Framed structures. Ductility and seismic response: General report”, *Journal of Constructional Steel Research*, 55(1-3), 125-154.
- Burgos, R. B., Silva, L. E. (2023) “Evaluation of the PD (P-Delta) effect in columns and frames using the two-cycle method based on the solution of the beam-column differential equation”, *MethodsX*, 102248.
- Ozcan, O., Binici, B., Canbay, E., Ozcebe, G. (2010) “Repair and strengthening of reinforced concrete columns with cfrps” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(22), 3411-3424.
- Celep, Z. (2008) Betonarme taşıyıcı sistemlerde doğrusal olmayan davranış ve çözümleme, *Beta Dağıtım*, İstanbul.
- THBB. “Türkiye Hazır Beton Sektörü İstatistikleri 2023”, <https://www.thbb.org/sector/istatistikler>, Son erişim tarihi: 25.05.2024
- MTA. “Perlit – Pomza Yatakları Haritası”, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/maden-yataklari>, Son erişim tarihi: 26.05.2024
- Lydon, F. D. (1982) “Concrete mix design”, *Applied Science Publishers*, 2nd ed, London.
- Gökçe, H. S., Durmuş, G., Şimşek, O. (2010) “Alternatif karışım oranlarında üretilen doğal perlit agregalı hafif betonların su/çimento üzerindeki etkileri”, *Politeknik Dergisi*, 13(1), 55-63.
- Topçu, İ. B., Uygunoğlu, T. (2007) “Properties of autoclaved lightweight aggregate concrete”, *Building and Environment*, 42(12), 4108-4116.
- Mansour, S. M. (2020) “Physical-mechanical properties of steel fibre-reinforced self compacting concrete containing natural perlite addition”, *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 15(2), 122-140.
- Chihaoui, R., Siad, H., Senhadji, Y., Mouli, M., Nefoussi, A. M., Lachemi, M. (2022) “Efficiency of natural pozzolan and natural perlite in controlling the alkali-silica reaction of cementitious materials”, *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01246
- Ragul, P., Hari, M. N. T., Arunachalam, N., Chellapandian, M. (2022) “An experimental study on the partial replacement of fine aggregate with perlite in cement concrete”, *Materials Today: Proceedings*, 68, 1219-1224.
- Tayşi, N., Mohammed, A. A. (2017) “Cam elyaf içeren betonarme kirişin eğilme davranışı için deneysel çalışma”, *20. Ulusal Mekanik Kongresi*, Bursa.
- Yalciner, H., Kumbasaroglu, A., Ergun, U. (2018) “Effects of geo-grid and conventional stirrups on reinforced concrete beams with polypropylene fibers”, *In Structures*, (Vol. 13, pp. 230-242), Elsevier.

- Bicer, K., Yalciner, H., Balkıs, A. P., Kumbasaroglu, A. (2018) "Effect of corrosion on flexural strength of reinforced concrete beams with polypropylene fibers", *Construction and Building Materials*, 185, 574-588.
- Akçaözoğlu, S., (2008) "Atık pet şişe kırıklarının hafif beton agregası olarak kullanılabilirliği", Doktora tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 283.
- Emiroğlu, M., Yıldız, S., Özgan, E. (2009) "Lastik agregali betonlarda elastisite modülünün deneysel ve teorik olarak incelenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(3).
- Vadivel, T. S., Thenmozhi, R. (2011) "Experimental behaviour of concrete with waste tyre rubber as coarse aggregate", *Nature, Environment and Pollution Technology*, 10(2), 173-178.
- Gonzalez-Corominas, A., Etxeberria, M. (2014) "Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates", *Construction and Building Materials*, 68, 618-626.
- Aslam, M., Shafiqh, P., Jumaat, M. Z. (2017) "High strength lightweight aggregate concrete using blended coarse lightweight aggregate origin from palm oil industry", *Sains Malaysiana*, 46(4), 667-675.
- DURAK, U., ŞİMŞEK, A. A. (2022) "Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu temelli geopolimer sistemlerde atık demir tozunun agrega yerine kullanımının araştırılması", *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(2), 812-828.
- Çakır, Ö., Dilbas, H. (2018) "A comparative analysis of elasticity modulus of recycled aggregate concrete with silica fume", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1069-1078.
- Abed, J. M., Khaleel, B. A. (2019) "Effect of wood waste as a partial replacement of cement, fine and coarse aggregate on physical and mechanical properties of concrete blocks units", *International Journal of Integrated Engineering*, 11(8), 229-239.
- Zhang, Y., Hubler, M. (2020) "Role of early drying cracks in the shrinkage size effect of cement paste", *Journal of Engineering Mechanics*, 146(11), 04020128.
- Şahan, M. F., Polat, A. D., Günaydın, O. (2021) "Kazınmış asfalt malzemelerin iri agrega yerine kısmen ikame edilmesinin farklı ısı altındaki betonların basınç dayanımlarına etkisi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(3), 660-667.
- İbrahim, M., Ahmad, A., Barry, M.S., Alhems, L.M., Suhoothi, A.C.M. (2020) "Durability of structural lightweight concrete containing expanded perlite aggregate", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14, 1, 1-15.

- Gökçe, H. S. (2010) “Hafif beton üretiminde ham ve geliştirilmiş perlitin kullanılabilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 43s.
- Huang, G., Pudasainee, D., Gupta R., Liu W.V. (2020) “Thermal properties of calcium sulfoaluminate cement-based mortar incorporated with expanded perlite cured at cold temperatures”, *Construction and Building Materials*, Vol. 274, p. 122082.
- Kılıç, A., Atış, C.D. (2003) “High strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixture”, *Cement and Concrete Research*, 33(10), 1595-1599.
- Cho, S. H., Kim, Y. I. (2003) “Effects of steel fibers on short beams loaded in shear”, *Structural Journal*, 100(6), 765-774.
- Altun, F., Özcan, D. M., Vekli, M., Haktanır, T. (2002) “Çelik lif katkılı betonarme kirişlerin taşıma gücünün deneysel incelenmesi”, *ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 205-212.
- Aktaş, B. (2007) “Çelik lifli hafif beton ile imal edilmiş betonarme kirişlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri.
- Frantsevich, I. I. (1965) “Questions of powder metallurgy and the strength of materials”, *Akad. Nauk Ukr. SSR, Kiev, pp. 3-13*.
- Gaiduchenko, A. K., Napara-Volgina, S. G. (1996) “Development of iron powder metallurgy”, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 34(7), 424-428.
- Binici, H., Sevinç, A. H., Geçkil, H. (2015) “Atık demir tozu katkılı harç ve betonların durabilite özellikleri”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(1), 1-16.
- Özcan, S. (2011) “Endüstriyel atıksulardan biyokatalitik olarak kalsiyum giderimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Aksaray.
- Alwaeli, M. (2016) “The implementation of scale and steel chips waste as a replacement for raw sand in concrete manufacturing”, *Journal of Cleaner Production*, 137, 1038-1044.
- Erdoğan, T. Y. (2003) Beton, İnşaat Mühendisliği Bölümü, *O. D. T. Ü. Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim AŞ.*, Ankara, 741.
- Terro, M. (2006) “Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures”, *Building and Environment*, 633-639.

Alterra, A. Z. A., Bayraktar, O. Y., Soylemez, H. (2019) “Investigation of the effects of modified bitumen on asphalt concrete performance by industrial waste”, *Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences*, 5(2), 93-100.

Gencil, O., Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Arslan, O., Nodehi, M., Benli, A., Ozbakkaloglu, T. (2022) “Lightweight foam concrete containing expanded perlite and glass sand: Physico-mechanical, durability, and insulation properties”, *Construction and Building Materials*, 320, 126187.

Google Earth Pro v. 7.3.6.9796, 2024 [online]. Accessed April 2024. <https://google.com/earth/desktop/>

