

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DOĞAL PERLİT İLE ÜRETİLEN BETONARME KİRİŞLERİN BASİT BURULMA
ETKİSİ ALTINDAKİ YAPISAL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Abdulkadir TÜRKOĞLU

Danışman: Doç. Dr. Atilla KUMBASAROĞLU

TEZ JÜRİ ÜYELERİ
Prof. Dr. Hakan YALÇINER
Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU
Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ERZİNCAN, 2025

© 2025 [Abdulkadir TÜRKOĞLU]. Tüm hakları saklıdır.

ÖZET

DOĞAL PERLİT İLE ÜRETİLEN BETONARME KİRİŞLERİN BASİT BURULMA ETKİSİ ALTINDAKİ YAPISAL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Abdulkadir TÜRKOĞLU

Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Atilla KUMBASAROĞLU

2025, 53 sayfa

Betonarme yapıların üretiminde yaygın olarak kullanılan geleneksel agregalar, çevresel etkileri ve ekonomik maliyetleri nedeniyle sürdürülebilirlik açısından çeşitli sorunlar doğurmaktadır. Bu nedenle, yapı sektöründe çevre dostu ve sürdürülebilir malzeme arayışı giderek önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, doğal perlit agregasının betonarme kirişlerin basit burulma etkisi altındaki yapısal davranışına olan etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, C25 ve C40 dayanım sınıfındaki geleneksel betonlar ile doğal perlit agregası kullanılarak üretilen P25 ve P40 sınıfındaki betonarme kiriş numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler eksenel yükleme altında basit burulma etkisine maruz bırakılmış ve rijitlik, çatlak oluşumu ile nihai burulma kapasitesi gibi yapısal parametreler değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, doğal perlit agregasının kirişlerin burulma davranışını olumlu yönde etkilediğini ve sürdürülebilir beton üretimi için potansiyel bir alternatif oluşturabileceğini ortaya koymuştur.

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

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS PRODUCED WITH NATURAL PERLITE UNDER PURE TORSION

Abdulkadir TÜRKOĞLU

**Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and
Technology,**

Department of Civil Engineering

Advisor: Doç. Dr. Atilla KUMBASAROĞLU

2025, 53 pages

Traditional aggregates widely used in the production of reinforced concrete structures pose various challenges in terms of sustainability due to their environmental impact and economic cost. Consequently, the search for environmentally friendly and sustainable materials in the construction sector has become increasingly important. This study experimentally investigates the effects of natural perlite aggregate on the structural behavior of reinforced concrete beams under pure torsion. Within the scope of the study, reinforced concrete beam specimens of strength classes C25 and C40, as well as P25 and P40 produced using natural perlite aggregate, were prepared. The specimens were subjected to pure torsion under axial loading, and structural parameters such as stiffness, crack formation, and ultimate torsional capacity were evaluated. The findings revealed that the use of natural perlite aggregate positively influenced the torsional behavior of the beams and demonstrated its potential as a sustainable alternative in concrete production.

Keywords: Reinforced concrete beam, torsional behavior, natural perlite aggregate, sustainable lightweight concrete.

TEŞEKKÜR

Lisansüstü çalışmamın tüm aşamalarında akademik bilgi ve tecrübeleriyle, çözüm odaklı yaklaşımları ve özgün katkılarıyla bana rehberlik eden çok değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU'na; değerli katkılarından dolayı Sayın Prof. Dr. Hakan YALÇINER'e, Dr. Öğr. Üyesi Ahmet İhsan TURAN'a ve Arş. Gör. Dr. Alper ÇELİK'e içten teşekkür ederim.

Bu çalışma, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından desteklenen “Doğal Perlit İle Üretilen Betonarme Kirişlerin Basit Burulma Etkisi Altındaki Yapısal Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı ve FYL-2025-1040 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Rektörlüğü'ne ve BAP Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Araştırma sürecinde özellikle deneysel çalışmalarda yanımda olan ve desteğini her zaman hissettiren değerli büyüğümüz Erkal EREM'e teşekkür ederim.

Varlıklarıyla en büyük desteğim olan, sevgileriyle her daim güç bulduğum canım anneme ve inancını hiçbir zaman eksik etmeyen kıymetli aileme sonsuz teşekkür ederim.

Abdulkadir TÜRKOĞLU
Haziran, 2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
TABLolar DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Türkiye'nin Depremselliği ve Yapı Hasarları	1
1.2. Betonarme Kirişlerde Burulma Etkisi	2
1.4 Doğal Perlitin Özellikleri ve Literatür Durumu	5
1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı	6
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	7
2.1. Doğal Perlit İle Üretilen Betonlar.....	7
2.2. Betonarme Kirişlerin Basit Burulma Etkisi Altındaki Yapısal Davranışları.....	11
3.MATERYAL VE YÖNTEM.....	19
3.1. Ön Deney Çalışmaları	19
3.1.1. Beton basınç dayanımları	20
3.2 Kesit Özellikleri.....	24
3.3 Betonarme Kirişlerin Donatı Kafeslerinin Hazırlanması	25
3.4. Betonarme Kirişlerin Kalıplarının Hazırlanması.....	30
3.5 Beton Döküm İşlemleri	30
3.6 Numune Kırım İşlemleri.....	34
3.7 Basit burulma deneyi	35
3.8 Yükleme ve Ölçüm Düzeneği.....	35
4. BULGULAR	38
4.1. Burulma Moment – Dönme Açısı İlişkisi	38
4.2. Çatlak Gözlemleri ve Hasar Dağılımları	39
4.3. Burulma Rijitliği ve Nihai Performans.....	42
4.4. Enerji Tüketimi ve Yutma Kapasitesi	43
4.5. Genel Yorum ve Performans İlişkileri	45
5. TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER	46
KAYNAKÇA	48

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. 1. Son 40 Yılda Yaşanan Bazı Yıkıcı Depremler.....	2
Tablo 1. 2. Avrupa Hazır Beton Birliği Verileri (ERMCO 2024).....	4
Tablo 3. 1. C25 Geleneksel Beton Reçetesi	22
Tablo 3. 2. C40 Geleneksel Beton Reçetesi.	23
Tablo 3. 3. P25 Doğal Perlitli Beton Reçetesi.	23
Tablo 3. 4. P40 Doğal Perlitli Beton Reçetesi.	23
Tablo 3. 5. Beton Basınç Dayanım Ortalamaları.....	34
Tablo 3. 6. Yükleme ve Ölçüm Ekipmanları.....	36
Tablo 4. 1. Betonarme Kirişlerde Burulma Momentine İlişkin Deney Sonuçları.....	39
Tablo 4. 2. Enerji Tüketimi ve Yapısal Performans Değerleri.....	44

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1. Türkiye’deki Başlıca Faylar ve Etrafındaki Plakalar.	1
Şekil 1. 2. a)Burulma Düzensizliği Nedeniyle Çöken İki Bina, b) Burulma Sebepli Ağır Hasar Alan Bina, c) Betonarme Kiriş Elemanda Burulma Çatlakları, d) Burulma Etkisi İle Yıkılan Okul Binası.....	3
Şekil 1.3. Bir Taş Ocağının Doğaya Verdiği Zararın Uydu Görüntüsü	5
Şekil 1.4. a) E-Atık, b) Geri Dönüştürülmüş Agregası, c) Kauçuk, d) Palmiye Kabuğu, e)Doğal Perlit.....	6
Şekil 2. 1. a) Perlit (Topuz ve diğ, 2022), b)Pomza (Geldim ve diğ, 2024), c) Genleştirilmiş Kil Agregası (Subaşı ve diğ, 2009), d) Uçucu kül (Aker Kimya) e) Piriç Kabuğu (Gülyaprak ve diğ, 2019), f) Genleştirilmiş Polistiren Köpük (Canbaz ve diğ, 2022), g) palmiye çekirdeği kabuğu, h) Volkanik Tüf (Aydınlar Madencilik).....	8
Şekil 2. 2. a) Doğal Perlit, b) Genleştirilmiş Perlit (Perlit Market).....	9
Şekil 2. 3. Türkiye Perlit Haritası (Coğrafya Harita)	10
Şekil 2. 4. a) Perlitli sıva yalıtımı (Perlitsa), b)Perlitli Tarım (Dumlu ve diğ, 2025), c) Perlitli Arıtma Sistemleri (Özper Perlit), d) Genleştirilmiş Perlit İle Çift Taraflı Kaplanmış Kumaştan Mikroskop Altında İplik Görüntüsü (Tiber ve diğ, 2011)	10
Şekil 2. 5. a) Kolonlarda Kesme ve Eğilme Etkisi (Bayülke ve diğ), a1) Kolonlarda Oluşan Kesme ve Eğilme Kuvvetlerinin Şematik Gösterimi (Kaya ve diğ, 2023), b) Dolgu Duvarlardaki Çatlamalar, b1) Dolgu Duvarlardaki Çatlamaların Şematik Gösterimi, c) Kirişlerde Oluşan Burulma Çatlakları (Turan ve diğ, 2019), c1) Kirişlerde Oluşan Burulma Çatlaklarının Şematik Gösterimi (Betonarme Yapıların Tasarımı Kitabı), d) Bağlantı Noktalarında Oluşan Kırılmalar (Sezen ve diğ, 2000), d1) Bağlantı Noktalarında Oluşan Kırılmaların Şematik gösterimi e) L tipi yapıda burulma etkisi hasarı (Topçu ve diğ, 2012), e1) L tipi yapıda oluşan hasarın şematik gösterimi (Yorulmaz ve diğ, 2018).....	13
Şekil 2.6. Basit Burulma Tesirindeki Donatısız Bir Kirişin Kırılması (Ersoy, 1975).....	14
Şekil 2.7. Basit Burulma Tesirindeki Donatılı Bir Kirişin Kırılması (Celep ve Kumbasar, 1996).....	14
Şekil 2.8. a)Uygunluk Burulması, b) Denge Burulması Durumları (Celep ve Kumbasar, 1996).....	15
Şekil 2.9. Bazı Uygunluk Burulması Çeşitleri (Celep ve Kumbasar, 1996)	15

Şekil 2.10. Betonarme Kirişlerde Burulma Etkisi Altındaki Kafes Analogisinin Üç Boyutlu Temsili.	17
Şekil 2.11. a) Karbon Elyaf Lif, b) Uçucu Kül, c) yüksek Fırın Cürufu, d) Atık Mermer Tozu, e) Kuvarz Tozu, f) Çelik Lif, g) Polipropilen Lif, h) Atık Kauçuk.....	18
Şekil 3. 1. Doğal Perlit Dane Sınıfları	19
Şekil 3. 2. Geleneksel Agrega	20
Şekil 3. 3. a) Mikser, b) Üretilen Betonların Kalıplara Yerleştirilme İşlemi, c) Küp Numunelerin Kürleme İşlemi.	21
Şekil 3. 4. a) C-40 Beton Küp Numunesinin Kırılması, b) C-40 Küp Numunesinin Basınç Dayanımı.	22
Şekil 3. 5. Deneyde Kullanılan Kiriş Detay Gösterimi	24
Şekil 3. 6. Kiriş Donatı Gösterimi	24
Şekil 3. 7. Donatı Çekme Cihazı	25
Şekil 3. 8. Çelik Donatıya Ait Gerilme-Birim Deformasyon Grafiği	26
Şekil 3. 9. Gönye Verilen Donatılar	27
Şekil 3. 10. Etriye Aralıklarının İşaretlenmesi İşlemi	27
Şekil 3. 11. Donatı Bağlama İşlemleri.....	28
Şekil 3. 12. Birim Şekil Değiştirme Ölçerlerin Uygulanması: a) Donatı Yüzeyinin Düzlenmesi, b) Birim Şekil Değiştirme Ölçerlerin Donatı Yüzeyine Uygun Yapıştırıcı ile Sabitlenmesi	29
Şekil 3. 13. Strain-Gauge Yapıştırılma İşlemleri	30
Şekil 3. 14. Kalıp İmalatı.....	30
Şekil 3. 15. a) Kalıp içlerinin temizlenip Yağlanma işlemleri, a1) Kalıp Yağı, b) Donatı kafesine paspaylarının takılıp, kalıp içine koyulması işlemi, b1) Deneyde kullanılan 35mm lik paspayları	31
Şekil 3. 16. Beton Karıştırıcı- Betonyer	32
Şekil 3. 17. Omuz Vibratörü.....	32
Şekil 3. 18. Kalıpları Açılan Kiriş Numuneleri Kürleme İşlemleri.....	33
Şekil 3. 19. Döküm Sırasında Alınan Numunelerin Kür Havuzuna Koyulması İşlemi	33
Şekil 3. 20. Silindir Numuneler Ait Çatlak Dağılımları a-a1) C25 Silindir Numune, b-b1) P25 Silindir Numune, c-c1) C40 Silindir Numune, d-d1) P40 Silindir Numune.....	34
Şekil 3. 21. Karelaj İşlemleri Tamamlanıp Deneye Hazır Hale Getirilen Kiriş Numunesi	35
Şekil 3. 22. Basit Burulma Düzeneği	36
Şekil 3. 23. Potansiyometrik Cetvel ve Levha.....	37

Şekil 4. 1. Betonarme kiriş numunelere ait Burulma Moment – Dönme Açısı ilişkisi.	40
Şekil 4. 2. Burulma momentine maruz kalan betonarme kirişlerde çatlak dağılımları.	41



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Derneği
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
EPS	Genişletilmiş Polistiren
ERMCO	Avrupa Hazır Beton Birliği
LVDT	Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatör
TS	Türk Standardı
TS EN	Avrupa Standardı Esas Alınarak Türk Standardı Hâline Getirilmiş Standart
A_o	İç Boşluk Alanı
θ	Çatlak Açısı
ϕ_{max}	Maksimum Burulma Momenti Değerinde Dönme
ϕ_y	Akma Momentine Karşılık Gelen Dönme Değeri
f_c	Beton Basınç Dayanımı
T_{max}	Elde Edilen Maksimum Moment
T_y	Akma Burulma Momenti
u	Kesitin Çevresel Uzunluğu
V_u	Kesme Kuvveti
F_y	Akma Dayanımı
F_t	Çekme Dayanımı
ϵ_u	Kopma Uzaması

1. GİRİŞ

1.1. Türkiye'nin Depremselliği ve Yapı Hasarları

Türkiye, depremler bakımından dünyanın en aktif bölgelerinden biri olan Alp Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer almaktadır. “Türkiye’nin üzerinde bulunduğu Anadolu Plakası; kuzeyde Avrasya Plakası, güneyde Afrika ve Arap Plakası, doğuda Doğu Anadolu Bloğu ve batıda Ege Bloğu tarafından çevrilmiştir” (Bikçe ve diğ, 2015 s1). Şekil 1.1. (Özcan ve diğ, 2019).

Türkiye’yi etkisi altına alan faylar ve plakalar verilmiştir. Plakalar arası etkileşimler ülke genelinde birçok sismik harekete yol açmaktadır. Bu sismik hareketler ön görülemeyen zamanlarda yer altındaki enerji titreşimlerinin yer yüzeyine aktarılmasıyla oluşan sarsıntılardır. Söz konusu durum literatürde deprem olarak tanımlanmaktadır. (Akbaş ve diğ, 2023)



Şekil 1. 1. Türkiye’deki Başlıca Faylar ve Etrafındaki Plakalar (Özcan ve diğ, 2019)

Ülkemizde son 40 yıl içerisinde çok sayıda yıkıcı deprem meydana gelmiştir (Turan ve diğ, 2024). Bu depremler çok sayıda can ve mal kaybına sebep olmuştur. Tablo 1.1. de, Erzincan, İzmir, Kocaeli, Bolu, Çankırı, Afyon, Tunceli, Bingöl, Erzurum, Van, Denizli, Elazığ, Kahramanmaraş, Elazığ, Hatay depremlerinin büyüklük ve şiddetleri ile ilgili bilgileri yer almaktadır.

Tablo 1. 1. Son 40 yılda yaşanan bazı yıkıcı depremler

Tarih	Büyükölük	Şiddet	Etkisi	Konum	Can Kaybı	Hasarlı Bina
13.03.1992	6.6 Mw	VIII	Yıkıcı	Erzincan	653	8057
06.11.1992	6 Mw	VII	Çok Güçlü	Doğanbey (İzmir)	-	55
17.08.1999	7.6 Mw	XI	Aşırı	Gölcük (Kocaeli)	17480	73342
12.11.1999	7.1 Mw	IX	Çok Yıkıcı	Düzce (Bolu)	763	35519
06.06.2000	6 Mw	VII	Çok Güçlü	Orta (Çankırı)	1	1766
15.12.2000	6 Mw	VII	Çok Güçlü	Sultandağı (Afyon)	6	547
03.02.2022	6.5 Mw	VIII	Yıkıcı	Sultandağı (Afyon)	44	622
27.01.2003	6 Mw	VII	Çok Güçlü	Pülümür (Tunceli)	1	50
01.05.2003	6.3 Mw	IX	Çok Yıkıcı	Merkez (Bingöl)	176	6000
25.03.2004	5.6 Ms	VI	Güçlü	Aşkale (Erzurum)	9	1280
23.10.2011	7.2 Mw	VIII	Yıkıcı	Van	604	5739
08.08.2019	6 Mw	VII	Çok Güçlü	Bozkurt (Denizli)	-	976
24.01.2020	6.8 Mw	IX	Şiddetli	Sivrice (Elazığ)	41	6270
30.10.2020	6.6 Mw	VIII	Yıkıcı	Seferhisar (İzmir)	117	618
06.02.2023	7.6 Mw	XII	Afetsel	Elbistan (Kahramanmaraş)		
06.02.2023	6.6 Mw	XII	Afetsel	Nurdağı (Gaziantep)	50.000+	220.000+
06.02.2023	7.7 Mw	XII	Afetsel	Pazarcık (Kahramanmaraş)		
20.02.2023	6.4Mw	XII	Afetsel	Yayladağı (Hatay)		

1.2. Betonarme Kirişlerde Burulma Etkisi

Deprem sonrası, betonarme yapılar üzerinde yapılan saha incelemelerinde kalıcı hasara uğrayan yapıların büyük bir çoğunluğunun ilgili deprem yönetmeliklerine aykırı ve/veya imalat hataları bulunan betonarme yapılardan oluştuğu görülmektedir. İncelenen betonarme yapılarda taşıyıcı kolon, kiriş ve perde elemanlarda eğilme, kesme ve burulma hasar tipleri olduğu bildirilmiştir. Şekil 1.2. de burulma momentine maruz kalarak kalıcı hasar gören yapılar yer almaktadır.



Şekil 1. 2. a)Burulma Düzensizliği Nedeniyle Çöken İki Bina (Vuran ve diğ, 2025), b) Burulma Sebepli Ağır Hasar Alan Bina (Akbaş ve diğ, 2023), c) Betonarme Kiriş Elemanda Burulma Çatlakları (Canpolat ve diğ, 2023), d) Burulma Etkisi İle Yıkılan Okul Binası (Doğan ve diğ, 2013)

Burulma hasarları, betonarme yapılarda kütle ile rijitlik merkezinin çakışmadığı durumlarda, konsol elemanların düzensizlik dağılımda, merdiven kirişlerinde, farklı yük veya açıklığa sahip döşemelerin arasında kalan kirişlerde görülebilmektedir. Kısacası burulma momenti sistemin geometrisinden veya asimetrik yüklerden meydana gelebilir. Burulma momentinin diğer hasar türlerine oranla hesaba alınmayacak kadar küçük olduğu düşünülmektedir (Ersoy, 1975). Buna rağmen burulma momentinin, birçok yıkıcı ve kalıcı hasarlara sebebiyet verdiği görülmektedir. Betonarme yapılara olan ilgi, artan nüfus, kentleşme ve sanayileşme ile birlikte her geçen gün daha da artmaktadır. Tablo 1.2. de görüldüğü üzere, ERMCO 2024 verilerine göre Türkiye,

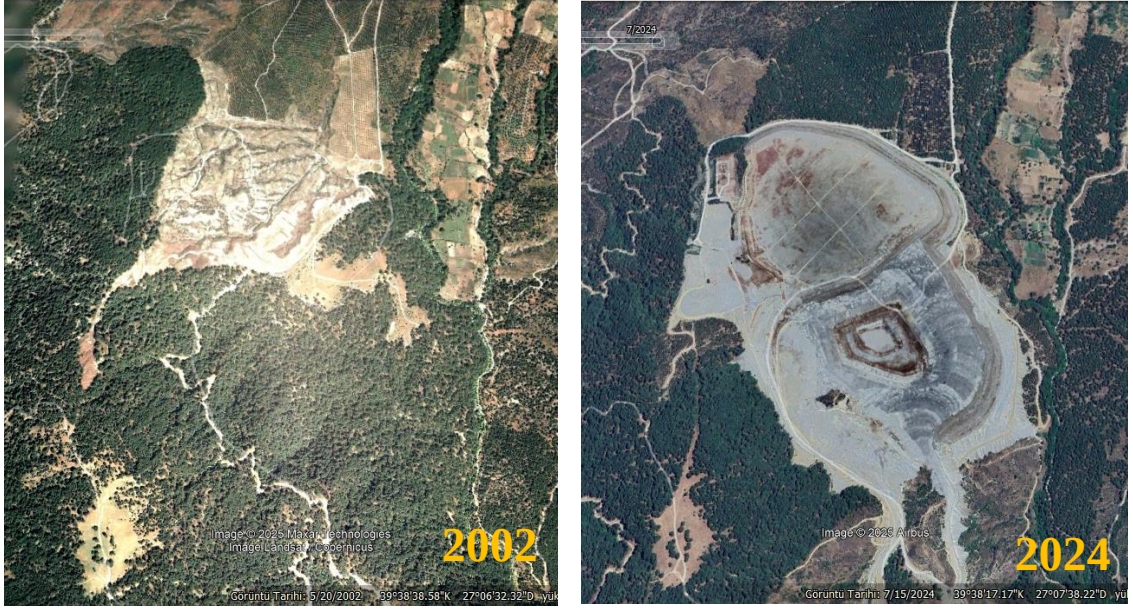
Avrupa'da en fazla hazır beton üreten ülke olarak birinci sırada yer almaktadır. Beton üretiminde agrega ve çimento gibi yenilenemeyen kaynakların kullanımı hem ekonomik hem de çevresel açıdan sorunları beraberinde getirmektedir.

Tablo 1. 2. Avrupa hazır beton birliği verileri (ERMCO 2024)

Ülkeler	Üretim (milyon m^3)			Tesis Sayısı	Tesis başı üretim (bin m^3)	Kişi başı üretim (m^3)
	2022	2023	Değişim		2023	
Türkiye	105	119	%13	1350	88	1,4
Almanya	52,2	42,3	-%19	1856	23	0,5
Fransa	39,2	37,5	-%4	1859	20	0,6
İtalya	33,1	30,8	-%7	1750	18	0,5
Polonya	26,2	23,1	-%12	1099	21	0,6

1.3. Sürdürülebilir Beton Üretimi ve Alternatif Agregalar

Betonun temel bileşenlerinden biri olan agrega; taş ocakları, nehir yatakları, ormanlar ve dağlar gibi doğal alanların tahrip edilmesiyle elde edilmektedir. Şekil 1.3'de, 2002 yılıyla karşılaştırıldığında 2024 yılında bir taş ocağının doğaya verdiği zarar açıkça görülmektedir. Bununla birlikte, agrega üretimi yüksek miktarda fosil yakıt kullanımına da neden olmaktadır. Taş ocaklarında gerçekleştirilen patlatmalar, ormanların tahrip edilmesi, su yolları ve nehir kenarlarından malzeme alınması; yeryüzündeki tüm canlılar için hayati düzeyde zarar oluşturmakta ve aynı zamanda ciddi ekonomik kayıplara yol açmaktadır. İnşaat sektörünün neden olduğu bu çevresel ve ekonomik sorunların önüne geçmek, maliyetleri azaltmak ve beton performansından ödün vermeden yenilikçi, çevre dostu beton üretimini teşvik etmek amacıyla çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir (Bulut ve diğ, 2024; Elemam ve diğ, 2023; Gaber ve diğ, 2024; Silva ve diğ, 2023).



Şekil 1.3. Bir Taş Ocağının Doğaya Verdiği Zararın Uydu Görüntüsü (Google Earth, 2025)

1.4 Doğal Perlitin Özellikleri ve Literatür Durumu

Araştırmacılar, bulundukları bölgenin kaynak çeşitliliğine bağlı olarak farklı atık, doğal veya madensel malzemeleri kullanarak, düşük maliyetli ve çevre dostu beton üretmeyi amaçlamış; bu doğrultuda farklı karışım oranlarında betonlar üretilip, bu betonların istenilen temel özellikleri karşılayıp karşılamadığını test etmişlerdir. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmalarda beton içeriğindeki agrega miktarlarını belirli oranlarda veya tamamını alternatif malzemeler ile (örneğin; dönüştürülmüş agrega (Akkaya ve diğ, 2024), E-atık (Bulut ve diğ, 2024), Perlit (Korkmaz ve diğ, 2024), Kauçuk (Muhaimin ve diğ, 2015) ve Palmiye Çekirdeği Kabuğu (Purwanti ve diğ, 2018)) yer değiştirerek çeşitli deneyler gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 1.4. a) E-Atık (Bulut ve diğ, 2024), b) Geri Dönüştürülmüş Agrega (Akkaya ve diğ, 2024), c) Kauçuk (Muhaimin ve diğ, 2015), d) Palmiye Kabuğu (Purwanti ve diğ, 2018), e) Doğal Perlit (Korkmaz ve diğ, 2024)

1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı

Doğal perlit üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde; prizmatik kiriş, küp ve silindir numuneler üzerine yapılan deneysel çalışmalara rastlanılmaktadır. Ancak basit burulma etkisinin geleneksel betonarme kirişlere kıyasla, kısmen perlitli veya tamamı perlit agregasından üretilen betonarme kirişler üzerindeki etkisinin yeterince araştırılmadığı anlaşılmaktadır. Bu tez kapsamında geleneksel agregaya yerine doğal perlit kullanılarak betonarme kiriş numuneleri üretilerek özdeş yükleme ve ölçüm düzeneğinde basit burulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Oluşan hasarlar incelenerek elde edilen veriler ışığında doğal perlit agregasının, burulma etkisi dikkate alındığında yapısal olarak kullanılabilirliği ortaya çıkmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. Doğal Perlit İle Üretilen Betonlar

Beton temel olarak çimento, su, agrega ve istenilen durumlarda mekanik özelliklerin geliştirilmesi adına çeşitli katkı malzemelerinden meydana gelmektedir. Betonun yoğunluğu veya birim hacim ağırlığı, içeriğinde kullanılan iri/ince agrega cinsine (dönüştürülmüş agrega, taş agregası vb.) ve yapısına (gözenekli, pürüzsüz vb.) bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterebilir. Bu bağlamda uluslararası yönetmeliklerde de beton birim hacim ağırlığı ile ilgili sınır değerler tanımlanmıştır (Amerika Beton Enstitüsü, 2016; EN 206 Standartları). Örneğin TS EN 206-1 standardında, geleneksel beton, etüv kurusu yoğunluğu 2000 kg/m^3 ile 2600 kg/m^3 arasında kalan beton olarak tanımlanırken, hafif beton 800 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 arasında kalan beton olarak tanımlanmaktadır.

Geleneksel beton (Portland çimentosu ve geleneksel taş agregasıyla üretilen saf beton), basınç dayanımı, birim deformasyonu ve çekme dayanımı gibi temel mekanik özellikler açısından yetersiz olabilir. Ayrıca, yüksek birim ağırlığı nedeniyle hafif yapı tasarımlarında kısıtlayıcıdır ve deprem gibi sismik etkiler altında performans kaybı gösterebilir. Mekanik özelliklere ek olarak, geleneksel beton üretiminde yüksek CO_2 emisyonlarının ortaya çıkması ve doğal kaynakların aşırı kullanımı sonucu kaynakların tahrip olması, alternatif/atık ürünlerin kullanımı ile daha sürdürülebilir, hafif ve mekanik açıdan yeterli dayanıma sahip betonu geliştirmeyi teşvik etmektedir (Şenol ve diğ., 2022; Turanlı ve diğ., 2021).

Genel olarak hafif beton, yüksek katlı binalar, prefabrike yapılar ile ısı yalıtım elemanlarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Uluer ve diğ., 2018). Beton içeriğinin yaklaşık %75 i agregadan oluşup, ağırlık açısından da önemli rol oynamaktadır (Turhan ve diğ., 2003). Bu yüzden beton birim ağırlığının düşürülmesindeki en yaygın yöntem, geleneksel agrega yerine hafif agreganın kullanılmasıdır (Gündüz ve diğ., 1998). Hafif agregalar, tane yoğunluğu 2000 kg/m^3 'ten küçük olan agrega çeşidi olarak tanımlanmaktadır (TS EN 206-1). Hafif agregaların boşluklu yapısı, mukavemet özelliklerinin düşük olmasına sebep olsa da, bu zayıf özellikleri geliştirmek için farklı karışım oranları hazırlanmakta, ihtiyaç halinde ise katkı malzemeleri ile desteklenmektedir.

Hafif betonların imalatında; perlit (Bulut ve diğ, 2024), genleştirilmiş polistiren köpük (EPS) granüller (Canbaz ve diğ, 2022), pomza (Geldim ve diğ, 2024), pirinç kabuğu (Gökhan ve diğ, 2011; Gülyaprak ve diğ, 2019), uçucu kül (Kılınçarslan ve diğ, 2018), palmiye çekirdeği kabuğu (Purwanti ve diğ, 2018), genleştirilmiş kil (Subaşı ve diğ, 2009). Agrega çeşitlerine ait görseller Şekil 2.1. de verilmiştir.



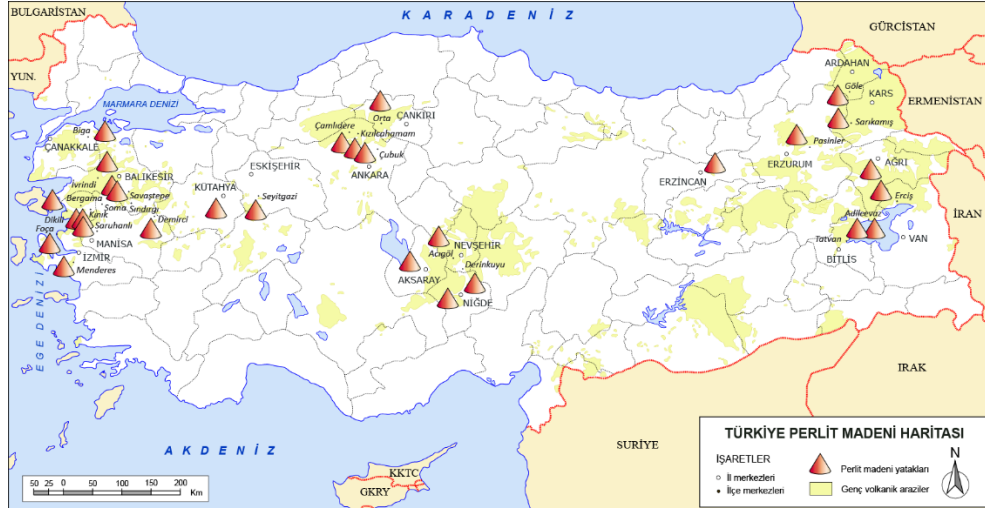
Şekil 2. 1. a) Perlit (Topuz ve diğ, 2022), b)Pomza (Geldim ve diğ, 2024), c) Genleştirilmiş Kil Agregası (Subaşı ve diğ, 2009), d) Uçucu kül (Aker Kimya) e) Pirinç Kabuğu (Gülyaprak ve diğ, 2019), f) Genleştirilmiş Polistiren Köpük (Canbaz ve diğ, 2022), g) palmiye çekirdeği kabuğu, h) Volkanik Tuf (Aydınlar Madencilik)

Perlit doğada, lavların hızlı bir şekilde soğuması ve suyla etkileşime girmesi sonucunda oluşmaktadır. İçeriği bakımından alümino-silisli (SiO_2 , Al_2O_3) bileşiklerden oluşan amorf yapıya sahiptir. Bu kayaç, genellikle %2 ile %5 arasında değişen yüksek su içeriğine sahiptir. Perlitin renkleri, şeffaf açık gri tonlarından parlak siyaha kadar farklılık gösterebilir. (Stefanidou ve diğ, 2023). Perlit, içeriğinde radyoaktif element, organik madde, nitrat, sülfat, fosfat ve ağır metal içermez (Kuzeydoğu Anadolu Kalkınma Ajansı, 2022). Kimyasal bileşimi oldukça saf ve temizdir (DPT 2001). Mikroskobik seviyede camsı yapıya bunun yanı sıra genişletilmiş haline kıyasla yüksek yoğunluğa sahiptir. Isıtıldığında hacminin 20 katına kadar genişlemesiyle bilinen perlit cevheri, özellikle inşaat, sanayi ve tarım sektörlerinde çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır (DPT, 2001). Bu genişleme özelliği, perlitin hafif ve yalıtım malzemesi olarak ideal hale gelmesini sağlar. Şekil 2.2. de doğal ve genişletilmiş perlit gösterilmiştir.



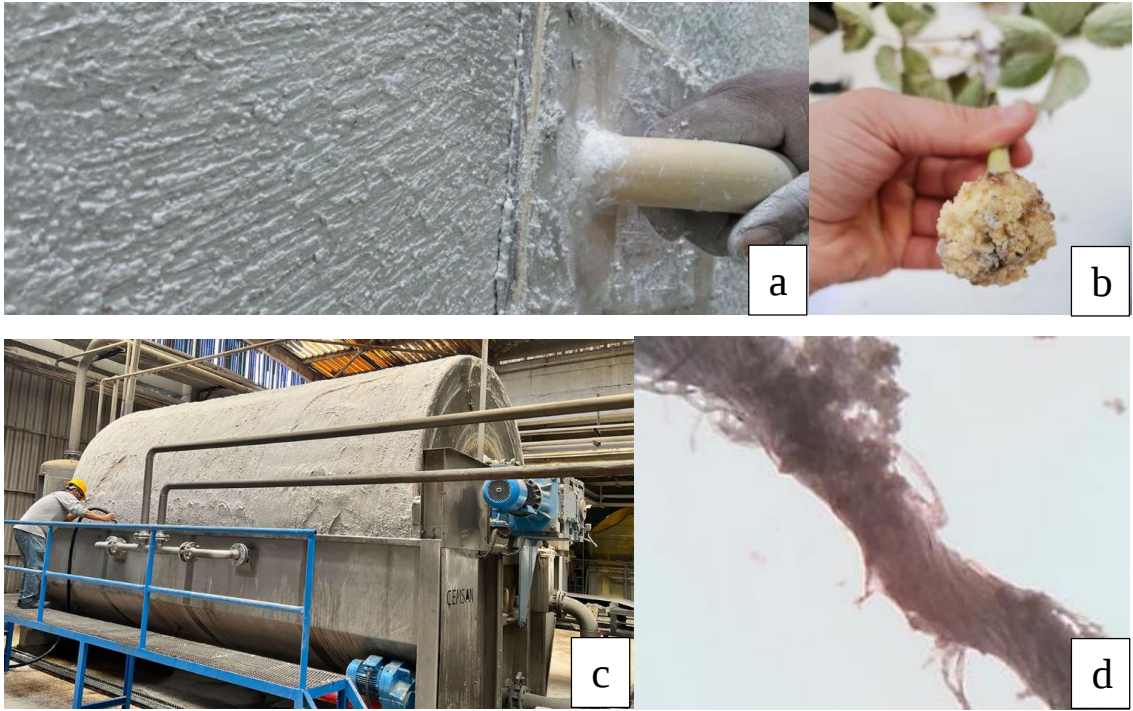
Şekil 2. 2. a) Doğal Perlit, b) Genleştirilmiş Perlit (Perlit Market)

Dünya perlit yatakları; Türkiye, Yunanistan, Japonya ve Macaristan başta olmak üzere birçok ülkede doğal olarak bulunmaktadır (El Mir ve diğ, 2017; Rashad ve diğ, 2016). Türkiye, dünya perlit rezervlerinin yaklaşık %40'ını barındırmaktadır. Özellikle Cumaovası, Manisa, Soma, İzmir-Bergama, Eskişehir-Üçsaray-Beşsaray, Kütahya, Konya, Nevşehir ve Erzincan gibi bölgelerde önemli perlit yatakları bulunmaktadır (Kuzeydoğu Anadolu Kalkınma Ajansı, 2022). Şekil 2.3. de Türkiye perlit maddeni haritası verilmiştir.



Şekil 2. 3. Türkiye Perlit Haritası (Coğrafya Harita)

Perlit madeni, birçok sektörde tercih edilen bir malzemedir. Şekil 2.4. de görüldüğü gibi inşaat, tarım, arıtma-filtrasyon, tekstil sektörlerinde kullanılmaktadır.



Şekil 2. 4. a) Perlitli sıva yalıtımı (Perlitsa), b) Perlitli Tarım (Dumlu ve diğ, 2025), c) Perlitli Arıtma Sistemleri (Özper Perlit), d) Genleştirilmiş Perlit İle Çift Taraflı Kaplanmış Kumaştan Mikroskop Altında İplik Görüntüsü (Tiber ve diğ, 2011)

Özellikle inşaat sektöründe önemli bir malzeme olan perlit, ısı-ses yalıtımı, hafif beton ve sıva harcı yapımında oldukça avantajlı bir malzemedir. Isı yalıtımı sağlayarak enerji verimliliğini artırırken, ses yalıtımında da gürültü kirliliğini azaltır ayrıca, beton içeriğinde agrega olarak kullanıldığında taşıyıcı sistemdeki gereksiz ölü yükleri azaltır. Bu özellikleriyle perlit; inşaat sektöründe önemli rol oynamaktadır.

Türkiye, hem doğal hem de işlenmiş perlit üretimi bakımından dünya genelinde lider ülkeler arasında yer almaktadır. Özellikle İzmir ve Nevşehir’de yoğunlaşan işleme tesisleri, ülkenin bu alandaki üretim kapasitesini daha da güçlendirmektedir. Türkiye, ürettiği perlit ürünlerini başta ABD, Avrupa ve Asya pazarları olmak üzere dünyanın birçok bölgesine ihraç ederek küresel ölçekte önemli bir tedarikçi konumunda yer almaktadır.

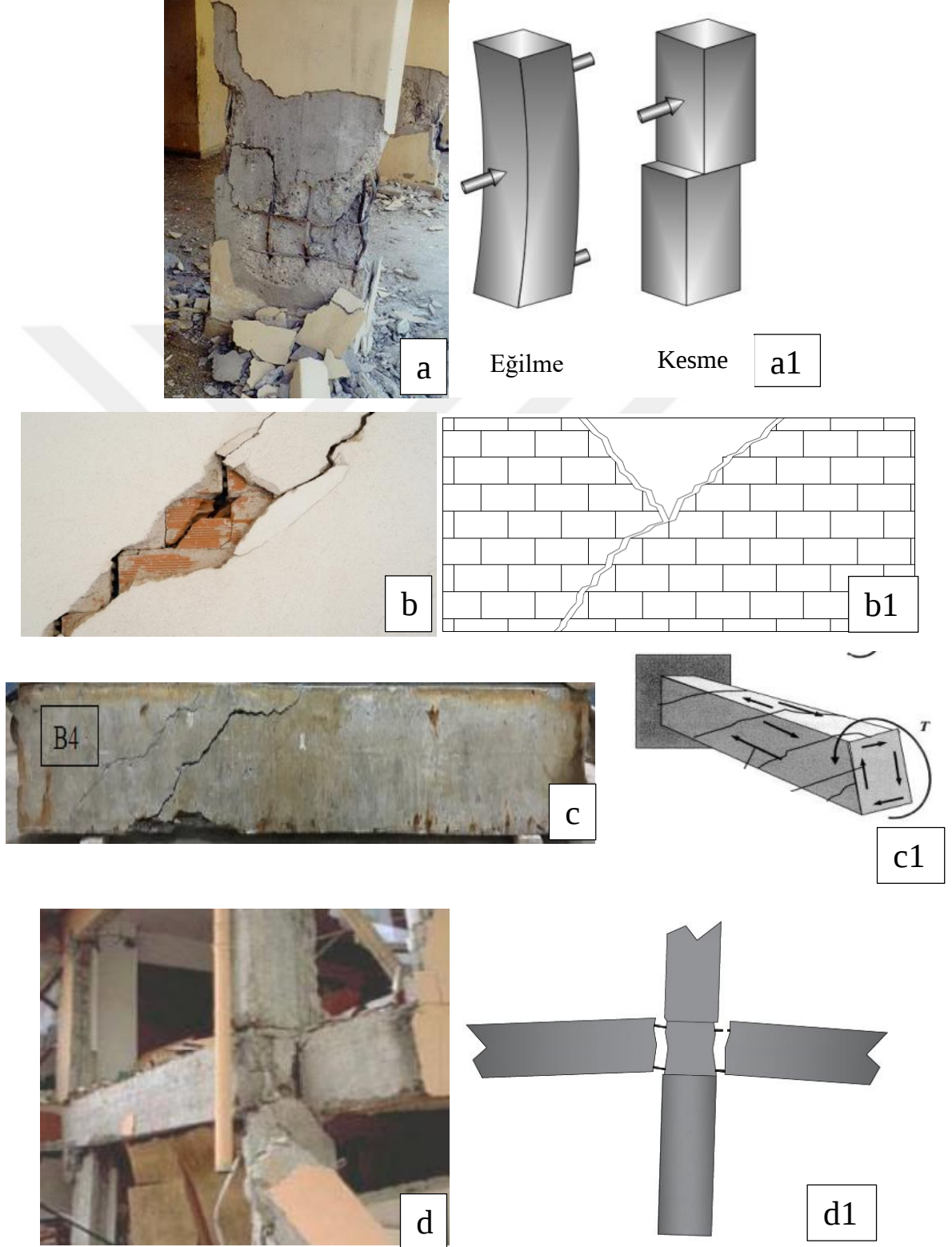
2.2. Betonarme Kirişlerin Basit Burulma Etkisi Altındaki Yapısal Davranışları

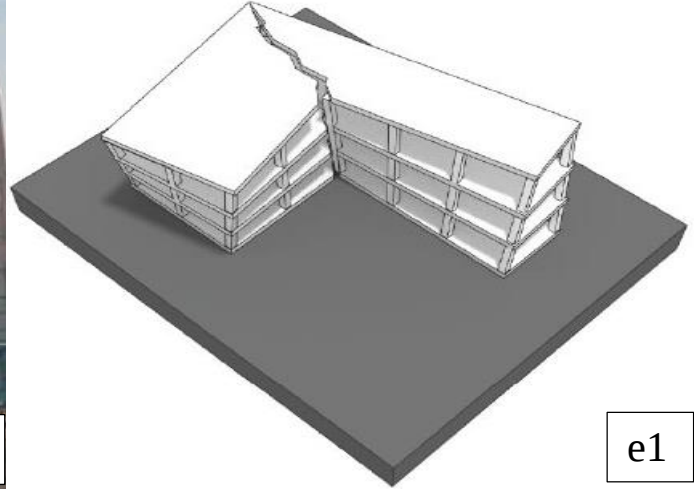
Tarihte burulma ile ilgili ilk çalışmalar Coulomb tarafından yapıldığı bilinmektedir (Aydoğuş ve diğ, 2014). Coulomb 1773 yılında, kirişlerde burulma ve elastik deformasyon üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalar, mühendislik yapılarında burulma momentleri ve dönme etkilerinin nasıl değerlendirileceğine ilişkin temel ilkelerin (örneğin; Burulma rijitliği, kesitlerin burulma altında davranışı, dönme deformasyonları) geliştirilmesine zemin hazırlamıştır. Burulma momenti etkisi, taşıyıcı yapı sistemlerinde genellikle simetrik olmayan yükler, düzensiz plan geometrileri, yetersiz rijitlik kaynaklı oluşabilmektedir.

Depremler veya yapıların zati ağırlıklarından dolayı oluşan kuvvetlerin, yapı elamanları tarafından karşılanırken kütle merkezine simetrik olarak aktarılmadığı veya sistemin rijitlik merkezi ile ağırlık merkezinin çakışmadığı durumlarda yapı elamanının kendi eksenine etrafında dönme eğilimine girmesi olarak tanımlanabilmektedir. Yapısal düzensizlikler, özellikle deprem kuvvetleri altında yapıların ciddi hasarlar almasına ve göçmesine sebep olmaktadır. Yapıdaki düzensizliklerin azaltılması, deprem performansını olumlu yönde etkileyen önemli bir faktördür (Tursun ve diğ, 2024).

Deprem anında oluşan yatay kuvvetler ideal durumlarda yapıların ağırlık merkezinden geçerek tüm sisteme simetrik olarak dağılmalıdır. Ancak yapılarda mimari ve statik uyumsuzluklar sonucu, kütle merkezi ile rijitlik merkezleri çakışmayabilir. Bu durumda yapı, rijitlik ve ağırlık merkezleri arasındaki mesafeye bağlı olarak, rijitlik merkezi etrafında dönmeye başlar. Bu

hareketler Şekil 2.5. de görüldüğü gibi, kolonlarda burulma, kesme ve eğilme hasarlarına, kirişlerde burulma hasarlarına, dolgu duvarlarda deplasman ve yıkımlara, bağlantı noktalarında gevşeme veya kırılmalara, yapının dönerek çökmesine sebep olabilmektedir.

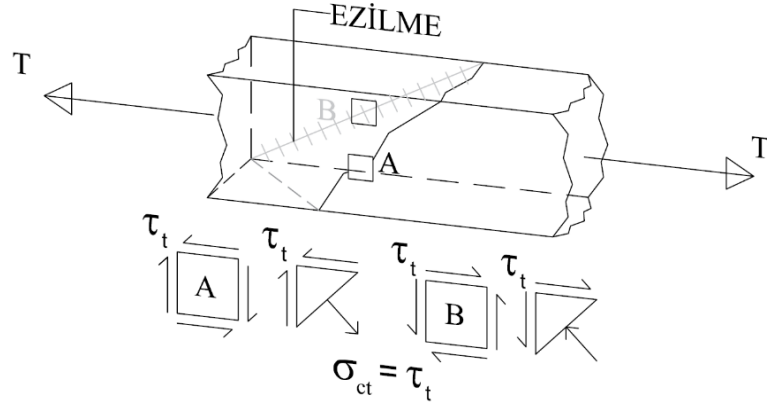




Şekil 2. 5. a) Kolonlarda Kesme ve Eğilme Etkisi (Bayülke ve diğ, a1) Kolonlarda Oluşan Kesme ve Eğilme Kuvvetlerinin Şematik Gösterimi (Kaya ve diğ, 2023), b) Dolgu Duvarlardaki Çatlamlar, b1) Dolgu Duvarlardaki Çatlamların Şematik Gösterimi, c) Kirişlerde Oluşan Burulma Çatlakları (Turan ve diğ, 2019), c1) Kirişlerde Oluşan Burulma Çatlaklarının Şematik Gösterimi (Betonarme Yapıların Tasarımı Kitabı), d) Bağlantı Noktalarında Oluşan Kırılmalar (Sezen ve diğ, 2000), d1) Bağlantı Noktalarında Oluşan Kırılmaların Şematik gösterimi e) L tipi yapıda burulma etkisi hasarı (Topçu ve diğ, 2012), e1) L tipi yapıda oluşan hasarın şematik gösterimi (Yorulmaz ve diğ, 2018)

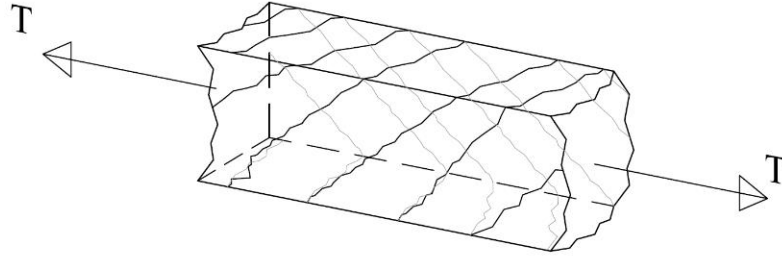
Taşıyıcı yapı sistemlerinde burulma; kenar kirişlerde, merdiven kirişlerinde ya da planda eğrisel eksenlere sahip kirişlerde meydana gelebilmektedir (Berktaş ve diğ, 1995). Betonarme kirişlerde burulma davranışı çeşitli değişkenlere bağlıdır örneğin beton basınç dayanımı, kiriş tipi, donatı oranı ve burulma tipleri bu durumu etkiler (Turan ve diğ, 2019).

Donatısız veya sadece boyuna ya da enine donatı içeren beton kiriş numunelerinde, kayma gerilmeleri nedeniyle oluşan asal çekme ve basınç gerilmeleri sonucu ani ve gevrek kırılmalar gözlemlenmektedir. Bu kırılmalar, betonun çekme dayanımının düşük olması ve yeterli donatının bulunmamasından kaynaklanmaktadır. ODTÜ laboratuvarlarında test edilen bu tür bir kirişin çatlak dağılımı Şekil 2.6. daki gibi yan yüzeylerin üçünde asal çekme gerilmelerine dik yönde oluşurken dördüncü yüzeyde ezilme gözlemlenmiştir. Ayrıca burulma tesirinin, kiriş üzerindeki etkisi kayma gerilmesidir. Yine Şekil 2.6. da görüldüğü gibi, söz konusu gerilme vektörleri A yüzeyinde (ön yüzey) ve B yüzeyinde (arka yüzey) birbirine ters yönde oluşmaktadır (Ataş ve diğ, 2023).



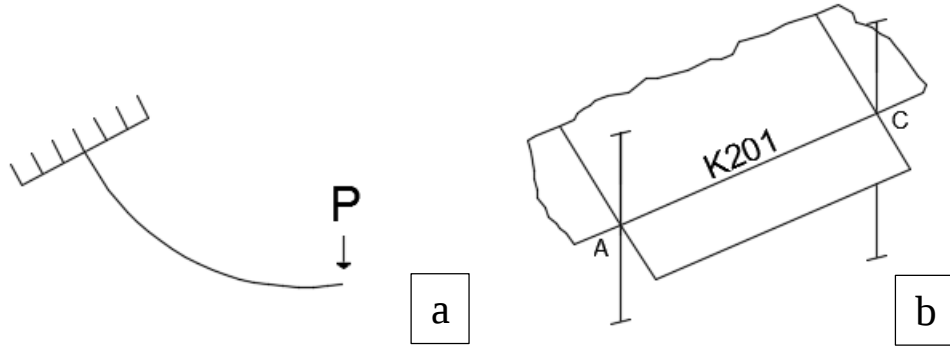
Şekil 2.6. Basit Burulma Tesirindeki Donatısız Bir Kirişin Kırılması (Ersoy, 1975)

İçerisinde çekme donatısı, basınç donatısı ve etriye bulunduran betonarme kiriş elemanlara burulma momenti etki etkiğinde, kesitte oluşan ilk çatlağın ardından eleman bazında gevrek bir kırılma oluşmamaktadır. Şekil 2.7. de de görüldüğü gibi asal çekme gerilmelerine dik yönde spiral formda çatlaklar oluşmaktadır. Etriye ve boyuna donatıların kiriş içinde bulunması, burulmadaki taşıma kapasitesini büyük miktarda arttırmaktadır (Ersoy ve diğ, 2012).



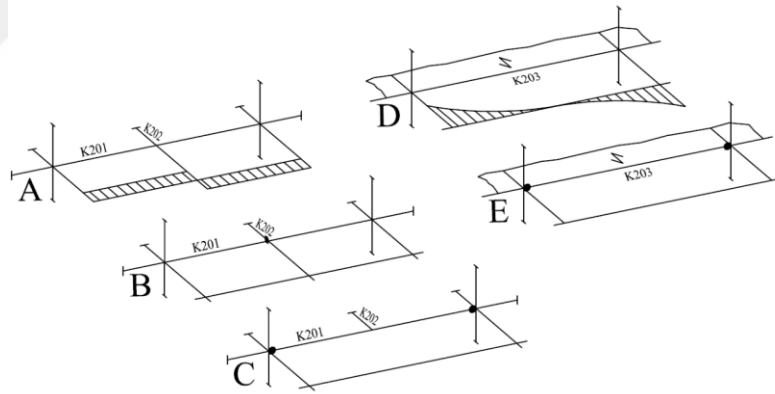
Şekil 2.7. Basit Burulma Tesirindeki Donatılı Bir Kirişin Kırılması (Celep ve Kumbasar, 1996)

Burulma momenti yapı sistemlerinde, denge burulması ve uygunluk burulması olarak iki temel başlık altında incelenebilmektedir. Şekil 2.8. de ki gibi denge burulması, statik bakımdan belirli burulma etkisi olarak da bilinen bu tarz burulma momentleri denge denklemleri ile hesaplanabilmektedir. Bu tarz burulma momentlerinin göz ardı edilmesi taşıyıcı yapı sistemlerinde dengenin sağlanamamasına neden olabilmektedir. (Celep ve Kumbasar, 1996)



Şekil 2.8. a) Uygunluk Burulması, b) Denge Burulması Durumları (Celep ve Kumbasar, 1996)

Uygunluk Burulması, Burulma momentinin varlığı denge için mecburi olmayan burulmaya denilmektedir. Burulma eğer uygunluk burulması ise yapılan tasarımlar sırasında hesaba katılmaz. Taşıyıcı sistemler elastik sınırlar içerisindeyken denge durumunda burulma momenti bulunuyor ise sistemin stabilitesine zarar vermeden belirli bazı noktalara atanacak plastik mafsallar ile burulmaya ihtiyacını yitirebilir. Yapı sistemlerinde denge burulmasından ziyade uygunluk burulmasına daha çok rastlanılmaktadır. Uygunluk burulmasına ait bazı gösterimler Şekil 2.9. da verilmiştir.



Şekil 2.9. Bazı Uygunluk Burulması Çeşitleri (Celep ve Kumbasar, 1996)

Celep ve Kumbasar'ın (1996) hazırlamış olduğu Şekil 2.9. daki örnekler incelendiğinde Şekil 2.9-A da bulunan K202 kirişinin saplama olarak K 201 kirişiyle birleşmesi sonucunda burulma momenti meydana gelmiştir. Şekil 2.9-A nın bir sonraki aşamaları, Şekil 2.9-B ve Şekil 2.9-C de verilmiştir. Şekil 2.9-B de verilen sistemde K202 kirişinin saplama noktasında oluşan plastik mafsal sonrasında K201 kirişinde burulma momentini aktaramaz. Fakat Sistem denge durumunda olduğundan burulma momenti vardır ve denge burulması durumundadır. Diğer yandan Şekil 2.9-C de görülen sistemde, K201 kirişinin her iki başında oluşan plastik mafsaldan

dolayı denge burulmasına ihtiyaç duyulmazken sistem uygunluk burulması halini alır. Böylelikle her iki uç kısmından mafsallı kiriş gibi davranan K201 kirişi açıklık momentinin artmasına neden olur. Sistemin dengesinin kurulabilmesi için yeterli burulma momenti olmasa da, sistem dengesi için dönme kapasitesinin yeterli miktarda olması gerekmektedir. Meydana gelen plastik mafsallaşmanın ardından K202 kirişi, serbest bir şekilde dönmesi mümkün olacaktır. Şekil 2.9-D görülen döşeme tarafından K203 kirişine burulma momenti aktarılmaktadır. Şekil 2.9-E de de görüldüğü gibi K203'ün her iki uç noktasında plastik mafsall oluşması ile sistem dengede kalabilmesi için burulma momentine ihtiyaç duymaz.

Burulma momentinin artmasıyla, kayma gerilmeleri ve buna bağlı asal çekme kuvvetleri ile basınç gerilmeleri de artış göstermektedir. Bununla beraber yapıda kullanılan betonun karakteristik özellikleri bakımından basınç dayanımı yüksek buna karşın çekme dayanımı yok sayılacak kadar küçüktür. Böylece kuvvet altındaki betonarme elemanlarda bir takım çatlaklar oluşmaktadır. Çatlakların herhangi bir konumda yoğunlaşması kesitin davranışını değiştirecek ve yüzeyden ayrılmaya neden olacaktır. Böylece davranış değişecektir.

Literatürde burulma etkisinin analizinde sıklıkla başvurulmuş yöntemlerden biri, yapı elemanının davranışını kafes (truss) model benzetimi ile açıklayan kafes analojisi (truss analogy) yaklaşımıdır. Bu model, ilk olarak Mörsch tarafından önerilmiş ve daha sonra Collins ve Mitchell gibi araştırmacıların katkılarıyla geliştirilmiştir (Collins ve Mitchell, 1991). Kafes analojisi, özellikle kesme ve burulma etkileri altında betonun çatlama davranışı ve iç kuvvet akışının modellenmesi amacıyla kullanılmaktadır.

Bu yaklaşımda betonarme kiriş veya yapı elemanı, basınç taşıyan beton bölgeleri ile çekme taşıyan donatı düzeni arasında kurulan idealize bir kafes sistemi gibi modellenir. Yatay elemanlar boyuna donatıyı, düşey ya da çapraz elemanlar ise etriye donatısını temsil eder. Betonun eğilme ve burulma kaynaklı basınç bölgesi ise çapraz basınç diyagonalleri ile simüle edilir. Özellikle burulma etkisi altında bu çapraz elemanlar, yapı içinde oluşan diyagonal çatlaklara karşılık gelmektedir.

Doğrusal olmayan kiriş modellerinde, bu kafes elemanları; eksenel rijitlik, çatlak açıları ve donatı düzenine bağlı olarak modellenir. Bu sayede rijitlik kaybı, çatlak ilerlemesi ve nihai burulma kapasitesi gibi önemli yapısal parametrelerin daha gerçekçi tahmini mümkün olur (ACI 318-19 Commentary, 2016; Bentz ve diğ, 2006).

Kafes model yaklaşımı kapsamında burulma taşıma kapasitesine ilişkin aşağıdaki ifade kullanılabilir:

$$T_u = 2 \cdot A_o \cdot \left(\frac{V_u}{u} \cdot \tan(\theta) \right) \quad (\text{Denklem 1})$$

Burada:

T_u : Burulma momenti taşıma kapasitesi (Nm)

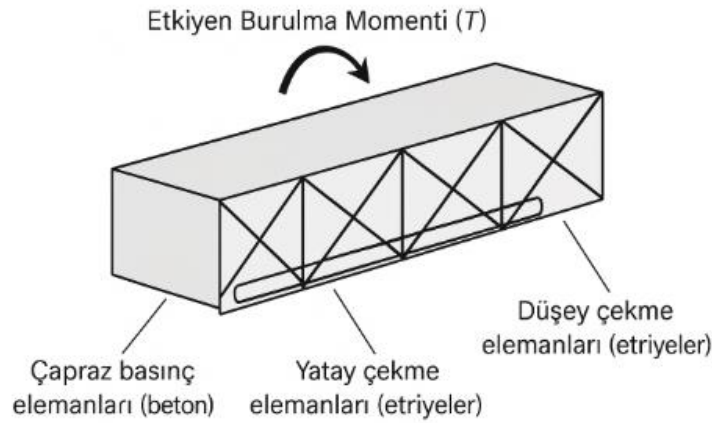
A_o : İç boşluk alanı (mm²)

V_u : Kesme kuvveti (N)

u : Kesitin çevresel uzunluğu (mm)

θ : Çatlak açısı (°)

Bu modelin mekânsal temsili ise aşağıdaki üç boyutlu çizimde sunulmuştur:



Şekil 2.10. Betonarme Kirişlerde Burulma Etkisi Altındaki Kafes Analojisinin Üç Boyutlu Temsili

Literatür incelendiğinde, yapılan birçok çalışmada beton içeriği değiştirilerek kirişler üretilmiştir. Örneğin beton içerisinde; karbon elyaf lifler (Bayrak ve diğ, 2021), uçucu kül, yüksek fırın cürufu, atık mermer tozu, kuvars tozu (Ağırman ve diğ, 2024), çelik lif, polipropilen lif (Çelikel ve diğ, 2019), atık kauçuk (Beiram ve diğ,2022), kullanılarak burulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda kullanılan malzemeler Şekil 2.10. da verilmiştir.



Şekil 2.11. a) Karbon Elyaf Lif (Bayrak ve diğ, 2021), b) Uçucu Kül (Ağırman ve diğ, 2024), c) yüksek Fırın Cürufu (Ağırman ve diğ, 2024), d) Atık Mermer Tozu (Ağırman ve diğ, 2024), e) Kuarz Tozu (Ağırman ve diğ, 2024), f) Çelik Lif (Çelikel ve diğ, 2019), g) Polipropilen Lif (Çelikel ve diğ, 2019), h) Atık Kauçuk (Beiram ve diğ, 2022)

3.MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması, 2 grup halinde doğal perlitli ve geleneksel betondan üretilen 25 ve 40 MPa basınç dayanımlarına sahip toplamda 4 kiriş numunesinden oluşmaktadır. Geleneksel taş agregası kullanılarak üretilen betonarme kirişler basınç dayanımlarına göre, sırasıyla C25, C40 ve doğal perlit agregası kullanılarak üretilen betonarme kirişler ise basınç dayanımlarına göre sırayla P25, P40 olarak isimlendirilmiştir. Deney numuneleri Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan Yapı Mekaniği Laboratuvarında üretilmiştir. Betonarme kirişlerin; malzeme ve kesit özellikleri, uygulanan basit burulma yükleme düzeneği ve ölçüm yöntemleri bu başlık altında incelenecektir.

3.1. Ön Deney Çalışmaları

Ön deney çalışmalar kapsamında perlit ocağından farklı dane boyutlarına sahip doğal perlit agregası temin edilmiştir. Agregalar laboratuvar ortamında kurumaya bırakılmıştır. Granülometri çalışmaları için yapılan literatür araştırmaları sonucunda ideal doğal perlit agregası boyutlarının; 0-1 mm, 1-2 mm, 2-4 mm, 4-8 mm ve 8-16 mm olmasına karar verilmiştir. Ardından doğal perlit agregaları eleme yöntemiyle 5 farklı dane boyutunda sınıflandırılmıştır. Doğal perlit agregaları dane sınıflarına göre şekil 3.1. de görüldüğü şekilde ayrılmıştır.



Şekil 3. 1. Doğal Perlit Dane Sınıfları

Geleneksel beton için hazırlanan C25 ve C40 beton karışım reçetelerinde şekil 3.2. de görüldüğü gibi ince ve kaba agrega kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Geleneksel Agrega

Ayrıca, oluşturulan beton karışımının mekanik özellikler açısından performansını doğrudan etkileyebilecek parametrelerin geleneksel agrega ile doğal perlit agregasının özellikleri dikkate alınarak karşılaştırılması önem arz etmektedir. Bu doğrultuda, hem geleneksel beton karışımı hem de doğal perlit agregalı beton için kullanılacak agregaların özgül ağırlıkları, suya batırma yöntemiyle belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, geleneksel betonda kullanılacak ince agreganın özgül ağırlığı $1,96 \text{ kg/dm}^3$, iri agreganın ise $2,07 \text{ kg/dm}^3$, doğal perlit agregasının özgül ağırlığı ise $1,26 \text{ kg/dm}^3$ olarak belirlenmiştir.

Laboratuvar ortamında elde edilen bu deneysel veriler, perlitin gözenekli doğal yapısı gereği daha hafif olduğunu ortaya koymakta olup, beton karışımının yoğunluk ve dayanım karakteristiklerini önemli ölçüde etkilemektedir.

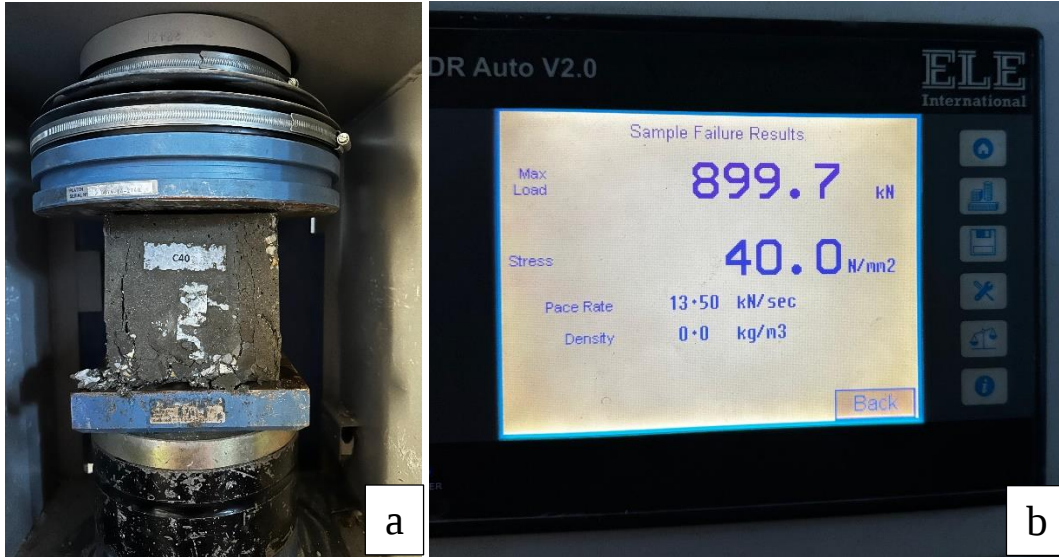
3.1.1. Beton basınç dayanımları

Basit burulma etkisi altında test edilmesi planlanan betonarme kirişlerin üretiminden önce, hedeflenen basınç dayanımına ulaşacak beton karışımlarını belirlemek amacıyla ön deney çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, farklı oranlarda tasarlanan beton karışımları mikser yardımıyla hazırlanmış ve her bir karışım için 7 ve 28 günlük kür sürelerine tabi tutulmak üzere Şekil 3.3. te gösterilen standart küp numuneler üretilmiştir.



Şekil 3.3. a) Mikser, b) Üretilen Betonların Kalıplara Yerleştirilme İşlemi, c) Küp Numunelerin Kürleme İşlemi

Numuneler, 28 günlük kür sürecinin ardından tek eksenli beton basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen basınç dayanımı değerlerinin ortalamaları esas alınarak, beton karışımları 25–40 MPa olacak şekilde sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma doğrultusunda, farklı dayanım sınıflarına sahip betonarme kirişlerin üretiminde kullanılacak uygun karışım reçeteleri oluşturulmuştur. Söz konusu uygulama süreci Şekil 3.4. te detaylı şekilde sunulmaktadır.



Şekil 3.4. a) C-40 Beton Küp Numunesinin Kırılması, b) C-40 Küp Numunesinin Basınç Dayanımı

Yapılan ön deneysel çalışmalar sonucunda, hedeflenen basınç dayanımı değerlerine ulaşan beton karışımları tespit edilmiştir. Bu doğrultuda belirlenen karışım reçeteleri, deneysel çalışma kapsamında üretilecek betonarme kiriş numunelerinin imalatında kullanılmıştır. Her bir dayanım sınıfına karşılık gelen karışım oranları ve içerik detayları, Tablo 3.1. ile Tablo 3.4. arasında ayrıntılı şekilde verilmiştir. Bu tablolar, kullanılan malzeme türleri, oranları ve karışım parametrelerini sistematik biçimde ortaya koyarak, üretim sürecinin tekrarlana bilirliliğini ve bilimsel geçerliliğini sağlamaktadır.

Tablo 3.1. C25 Geleneksel beton reçetesi

C25 Geleneksel Beton Küp Numune Döküm Tablosu		28 Günlük Basınç Dayanımı	
Bileşen Adı	Ağırlık (kg)		
Çimento(32,5)	12,00	Su/Çimento Oranı 0,54	$f_c = 27 \text{ MPa}$
Su	6,46		
Kum	11,76		
Agrega	23,52		
Genel Toplam	53,74		

Tablo 3.2. C40 Geleneksel beton re etesu

C40 Geleneksel Beton Küp Numune Döküm Tablosu		28 Günlük Basıncı Dayanımı	
Bileşen Adı	Ağırlık (kg)		
Çimento(42,5)	11,26	Su/�imento Oranı 0,47	$f_c = 40 \text{ MPa}$
Su	5,33		
Kum	11,76		
Agrega	23,52		
Genel Toplam	51,87		

Tablo 3.3. P25 Doğal perlitli beton re etesu

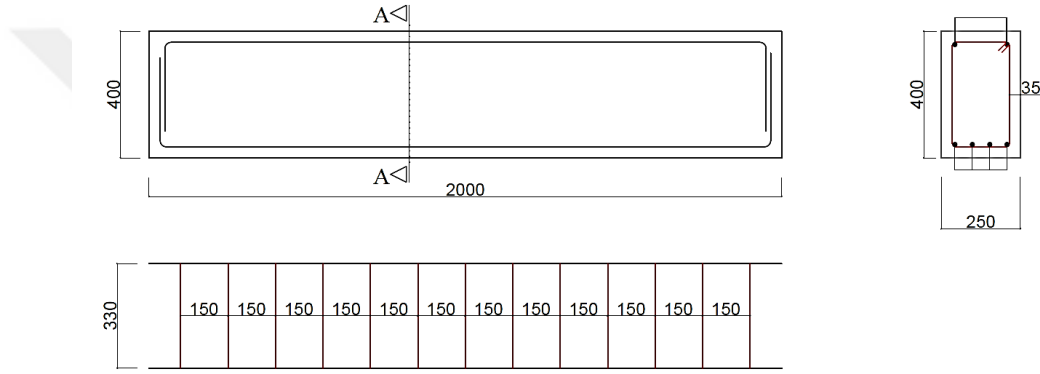
P25 Doğal Perlit Küp Numune Döküm Tablosu		28 Günlük Basıncı Dayanımı	
Bileşen Adı	Ağırlık (kg)		
Çimento(32,5)	12,00	Su/�imento Oranı 0,61	$f_c = 26 \text{ MPa}$
Su	7,36		
0/1 mm (%30)	5,91		
1/2 mm (%18)	3,55		
2/4 mm (%20)	3,92		
4/8 (%10)	2,08		
8/12,5 (%22)	4,58		
Genel Toplam	39,40		

Tablo 3.4. P40 Doğal perlitli beton re etesu

P40 Doğal Perlit Küp Numune Döküm Tablosu		28 Günlük Basıncı Dayanımı	
Bileşen Adı	Ağırlık (kg)		
Çimento(42,5)	11,55	Su/�imento Oranı 0,56	$f_c = 39 \text{ MPa}$
Su	6,47		
0/1 mm (%30)	7,35		
1/2 mm (%18)	4,41		
2/4 mm (%20)	4,87		
4/8 (%10)	2,59		
8/12,5 (%22)	5,69		
Genel Toplam	37,24		

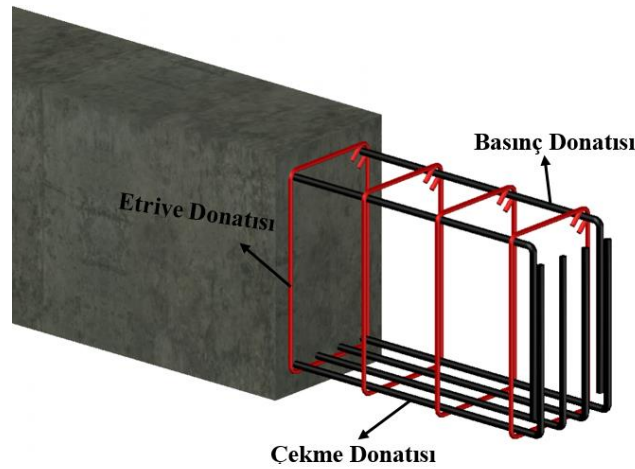
3.2 Kesit Özellikleri

Betonarme kirişler Şekil 3.5. de görüldüğü gibi 2500 mm açıklığa 400 mm yüksekliğe ve 250 mm genişliğe sahiptir. ACI 318 (2005) yönetmeliğine göre teorik olarak hesaplanan betonarme kirişlerinin burulma dayanımları 15 kN.m olacak şekilde tasarlanmıştır. TS500 (2000) standartlarına uygun 4 adet 12 mm çapında nervürlü burulma donatısı, minimum eğilme şartını sağlamak için 2 adet 12 mm çapında nervürlü eğilme donatısı ve 8 mm çapında iki kollu etriye kullanılmıştır. Betonarme kirişinde tüm etriye aralıkları 150 mm dir. Tasarımı yapılan betonarme kirişlerinde kullanılan pas paylarının beton yüzeyinden donatı merkezine olan mesafesi ise 35 mm’dir.



Şekil 3.5. Deneyde Kullanılan Kiriş Detay Gösterimi

Deneyde kullanılan kiriş elemanına ait çekme, basınç ve etriye donatılarının yerleşim detayları, Şekil 3.6. da verilmiştir. Söz konusu şekil, donatıların konumlarını göstermektedir.



Şekil 3.6. Kiriş Donatı Gösterimi

3.3 Betonarme Kirişlerin Donatı Kafeslerinin Hazırlanması

Betonarme kirişlerin üretiminde TS708 standardından belirtilen S420 (B420C) nervürlü çelik donatı kullanılmıştır. Kiriş donatı kafes sistemleri oluşturulmadan önce, kullanılacak donatıların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, Şekil 3.7. de gösterilen donatı çekme cihazında deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, kullanılacak donatılardan rastgele seçilen numunelere aksel çekme kuvveti uygulanarak malzemenin mekanik davranışı incelenmiş ve gerekli parametreler elde edilmiştir.



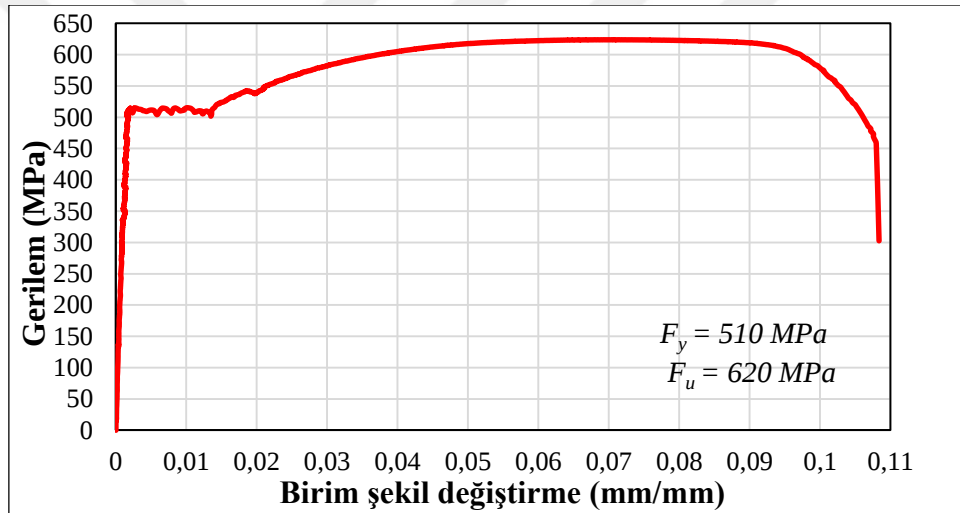
Şekil 3.7. Donatı Çekme Cihazı

Yapılan deneyler sonucunda, nervürlü donatıların akma dayanımı 530 MPa, çekme dayanımı ise 620 MPa olarak ölçülmüştür. Malzemenin deformasyon kapasitesine ilişkin olarak, akma gerilmesi karşılık gelen birim uzama değeri 0.00225 mm/mm, kopma gerilmesine karşılık gelen birim uzama değeri ise 0.0163 mm/mm olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, donatı çeliğinin elastisite modülü 2.1×10^5 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.8.).

TS 708:2010 standardına göre, nervürlü S420 sınıfı çelik donatılar için kopma uzamasının (ϵ_u) en az %10 olması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan donatılar üzerinde gerçekleştirilen çekme deneyleri sonucunda, söz konusu uzama değeri yaklaşık %10.8 olarak ölçülmüş ve standardın gerekliliklerini karşıladığı doğrulanmıştır.

Ayrıca, aynı standartta belirtilen çekme dayanımı (F_t) ile akma dayanımı (F_y) oranının en az 1.15 olması gerektiği ifade edilmektedir ($F_t / F_y \geq 1.15$). Deneysel olarak elde edilen değer ise 1.16 olup, bu kriterin de sağlandığı tespit edilmiştir.

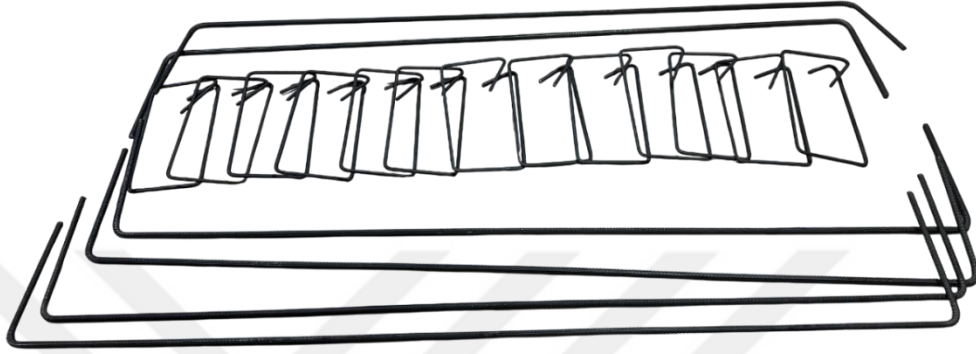
Sonuç olarak, deneysel çalışmalarda kullanılan çelik donatılar, TS 708:2010 standardında belirtilen hem uzama hem de mukavemet kriterlerini karşılamaktadır. Bu durum, kullanılan donatının yapısal performans açısından güvenli sınırlar içerisinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.8. Çelik Donatıya Ait Gerilme-Birim Deformasyon Grafiği

Kesit özellikleri, Bölüm 3.2’de tanımlanan tasarıma uygun olarak belirlenen kirişlerde, boyuna ve enine donatıların bağlanması işleminde standartlara uygun imalat yöntemleri uygulanmıştır. Boyuna donatı olarak, 2500 mm uzunluğunda ve 12 mm çapa sahip nervürlü çelik çubuklar (S420 sınıfı) kullanılmıştır. Bu çubuklara, her iki uçtan 285 mm uzunluğunda 90°’lik bükümler (gönye) verilerek, toplam 1930 mm düz uzunluk elde edilecek şekilde şekil verilmiştir. Ayrıca, 1200 mm uzunluğunda ve 8 mm çapındaki yardımcı boyuna donatılar da aynı yöntemle kesilmiş ve bükülerek ana boyuna donatılara destek olacak şekilde düzenlenmiştir. Bu donatılar, Şekil 3.9. da detaylandırıldığı gibi, enine donatılarla birleşecek konumda kiriş kesiti içerisine yerleştirilmiştir. Enine donatı elemanları ise, etriye formunda imal edilmiştir. Bu

etrierler, karşılıklı kenar uzunlukları 180 mm (yükseklik doğrultusunda) ve 330 mm (kiriş genişliği doğrultusunda) olacak şekilde şekillendirilmiş; dört köşeden 90°'lik bükümle oluşturulmuştur. Ayrıca, üst köşelerde, TS 500'e uygun olarak, donatı uçlarının betona aderansını artırmak amacıyla 135°'lik kulakçıklar (kanca) bırakılmıştır. Kulakçık uzunlukları, donatı çapının en az 10 katı (yaklaşık 80 mm) olarak belirlenmiş ve bu kulakçıklar, donatıların beton içerisinde kaymasını önleyecek biçimde içe dönük şekilde bükülmüştür.



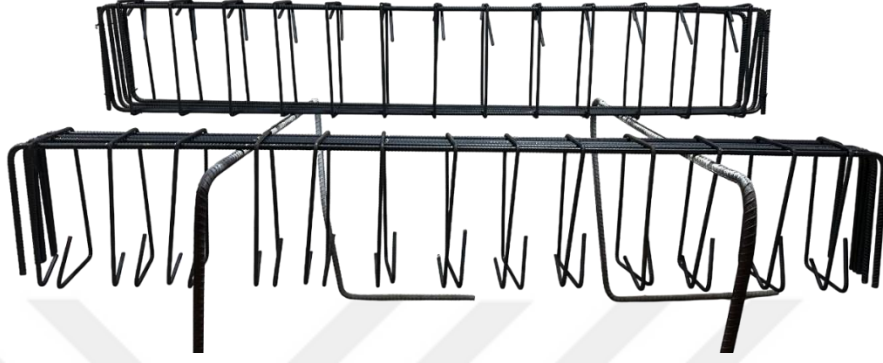
Şekil 3.9. Gönye Verilen Donatılar

Ardından, Şekil 3.10. da görüldüğü gibi, enine donatıların (etrierlerin) montaj esnasında konumlarını koruyabilmesi amacıyla, iki noktadan desteklenen bir sehpa üzerine 150 mm aralıklarla dikey hizalama çizgileri işaretlenmiştir. Etriyeler, bu işaretli bölgelere yerleştirilmiş ve bağ teli kullanılarak sabitlenmiştir.



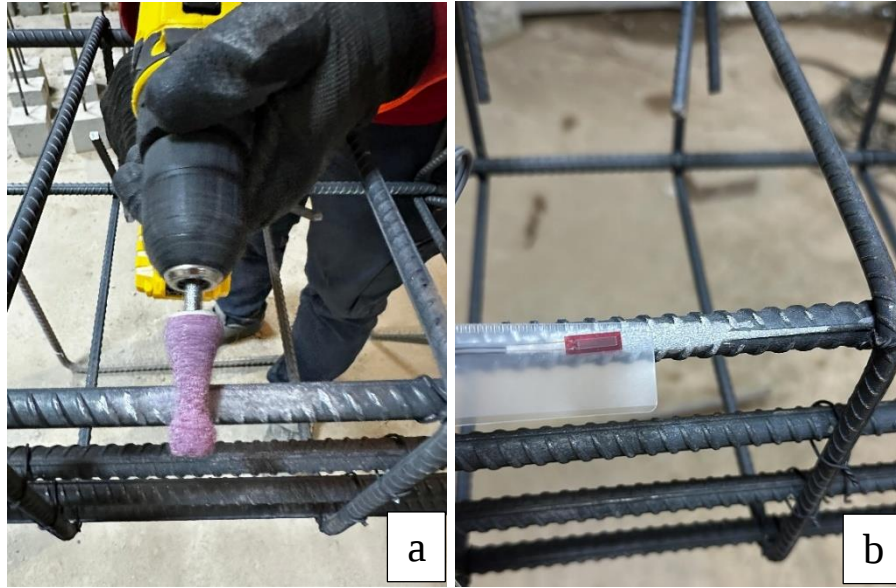
Şekil 3.10. Etriye Aralıklarının İşaretlenmesi İşlemi

Bu yöntem sayesinde, Şekil 3.11. de görüldüğü gibi, etriyelerin çekme ve basınç donatıları etrafında doğru konumda sabitlenmesi sağlanmıştır. Beton dökümü ve vibrasyon uygulamaları sırasında donatıların kaymasını veya yer değiştirmesini önlemek amacıyla, TS 500 ve Eurocode 2 (EN 1992-1-1) standartlarında belirtilen esaslara uygun şekilde her bir köşede bağ teli ile sıkı bağlantılar yapılmıştır.



Şekil 3.11. Donatı Bağlama İşlemleri

Bağlama işlemleri tamamlanan kiriş donatıları üzerinde, Şekil 3.12. de görüldüğü gibi, kirişin orta açıklığına denk gelen bölgede yer alan çekme donatısı, basınç donatısı ve etriyelerin orta kısımlarında gerinim ölçümleri yapılabilmesi amacıyla yüzey hazırlığı gerçekleştirilmiştir. Gerinim pullarının (strain gauges) doğru ve kalıcı şekilde yapıştırılabilmesi için ilgili donatı yüzeyleri zımpara oksit, kir ve demir tozu tabakaları giderilmiş; yüzeyler pürüzsüz ve kuru bir hale getirilmiştir. Donatı yüzeyine yerleştirilen birim şekil değiştirme ölçerlerin (strain gauge) doğru ve kararlı ölçüm yapabilmesi için, yüzey hazırlığı büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, yüzeydeki kir, yağ ve toz kalıntılarının yanı sıra, ölçüm sinyallerinde elektriksel parazit (gürültü) oluşumuna sebep olabilecek statik elektrik birikimi de dikkate alınmıştır. Bu olumsuzlukları gidermek amacıyla, donatı yüzeyi alkol bazlı bir temizleyici ile silinmiş ve ölçerlerin sağlıklı bir şekilde yüzeye yapışması ve sinyal iletiminin güvenilirliği sağlanmıştır. Bu yüzey hazırlığı işlemi, yapıştırıcı ile çelik yüzey arasında maksimum aderansın sağlanması ve ölçüm hatalarının minimize edilmesi açısından yüksek öneme sahiptir.



Şekil 3.12. Birim Şekil Değişirme Ölçerlerin Uygulanması: a) Donatı Yüzeyinin Düzlenmesi, b) Birim Şekil Değişirme Ölçerlerin Donatı Yüzeyine Uygun Yapıştırıcı ile Sabitlenmesi

Pürüzsüz hâle getirilen donatı yüzeylerine yapıştırılan 10 mm'lik gerinim pullarının (strain gauges), beton dökümü sırasında hasar görmemesi ve dış etkenlerden korunması amacıyla, Şekil 3.13. de gösterildiği şekilde üzerlerine koruyucu kaplama malzemesi uygulanmıştır. Bu koruyucu tabaka, hem mekanik darbelere karşı fiziksel bir bariyer oluşturmuş hem de nem, çimento şerbeti ve vibrasyon kaynaklı etkilerin sensörlere zarar vermesini engellemiştir.



Şekil 3.13. Strain-Gauge Yapıştırılma İşlemleri

3.4. Betonarme Kirişlerin Kalıplarının Hazırlanması

Donatı imalatının tamamlanmasının ardından, Şekil 3.14. de gösterildiği gibi, 2000 mm uzunluğunda, 250 mm genişliğinde ve 400 mm yüksekliğinde iç ölçülere sahip kalıplar hazırlanmıştır. Kalıp sisteminin imalatında, yüzey düzgünlüğü ve beton sızdırmazlığı sağlamak amacıyla suya dayanıklı ply-wood levhalar ile taşıyıcı ve kenetleme elemanları olarak 50 × 100 mm kesitli ahşap kalaslar kullanılmıştır. Kalıplar, beton dökümü sırasında şekil bozulmalarını ve açıklık değişimlerini engelleyecek biçimde rijit olarak monte edilmiştir.



Şekil 3.14. Kalıp İmalatı

3.5 Beton Döküm İşlemleri

Döküm öncesinde, hazırlanan kalıpların iç yüzeyleri, toz, talaş ve benzeri imalat atıklarından arındırılmıştır. Ardından, beton dökümünden sonra kalıpların kolaylıkla ayrılabilmesini sağlamak amacıyla, Şekil 3.15. de gösterildiği şekilde kalıp yağı uygulanmıştır. Bu işlemi takiben, donatı kafesine 35 mm kalınlığında pas payları yerleştirilmiş ve donatı kafesi kalıp içerisine uygun şekilde konumlandırılmıştır.



a



a1



b



b1

Şekil 3.15. a) Kalıp İçlerinin Temizlenip Yağlanma İşlemleri, a1) Kalıp Yağı, b) Donatı Kafesine Paspaylarının Takılıp, Kalıp İçine Koyulması İşlemi, b1) Deneyde Kullanılan 35mm’lik Paspayları

Kalıp ve donatı kafesinin hazırlanmasının ardından beton döküm sürecine geçilmiştir. Bu aşamada, Şekil 3.16. da görülen betonyer (mikser) kullanılarak beton hazırlanmıştır. Mikser içerisine, daha önce belirlenen oranlarda tartılmış olan agrega, çimento ve su malzemeleri eklenmiş ve karışım, homojen bir yapı elde edilinceye kadar karıştırılmıştır.



Şekil 3.16. Beton Karıştırıcı- Betonyer

Elde edilen taze beton, kalıplara dökülmüş ve şekil 3.17. de gösterilen vibratör cihazı kullanılarak betonun kalıp içerisinde boşluksuz ve düzgün bir şekilde yerleşmesi sağlanmıştır. Böylece, segregasyonun önüne geçilmiş ve betonun yapısal bütünlüğü korunmuştur.



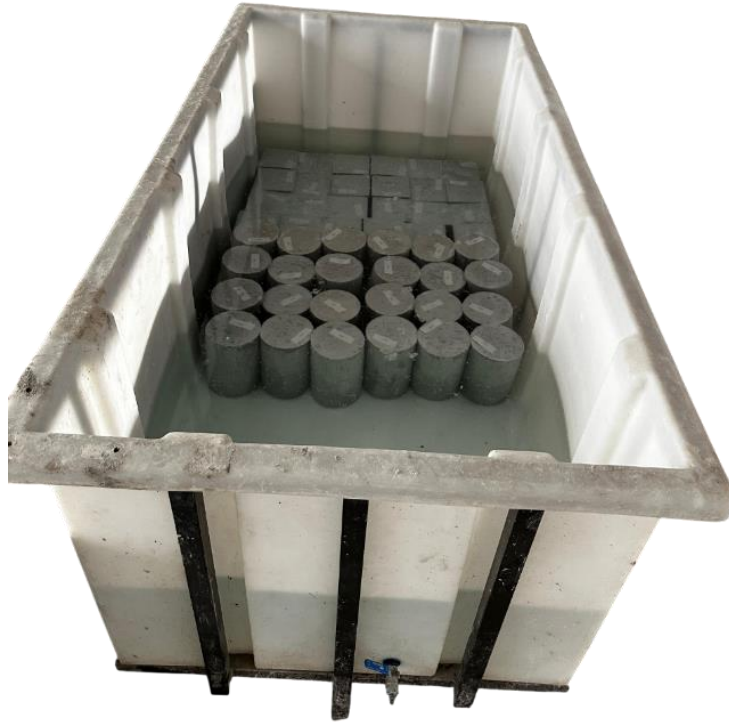
Şekil 3.17. Omuz Vibratörü

Üretilen betonarme kirişlerde (Şekil 3.18.) deney verilerinin doğruluğunu etkileyebilecek rötre kaynaklı çatlakların oluşumunu engellemek amacıyla, 28 günlük süre boyunca her 12 saatte bir düzenli olarak kütleme işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.18. Kalıpları Açılan Kiriş Numuneleri Kürleme İşlemleri

Beton dökümü sırasında üretilen betonların basınç dayanımını kontrol etmek için her bir beton sınıfından 6 şar adet küp numune, çekme dayanımlarını kontrol etmek içinde yine 6 şar adet silindir numune alınmıştır. Alınan numuneler deney gününe kadar şekil 3.19. da gösterildiği gibi kür havuzlarında bekletilmiştir.



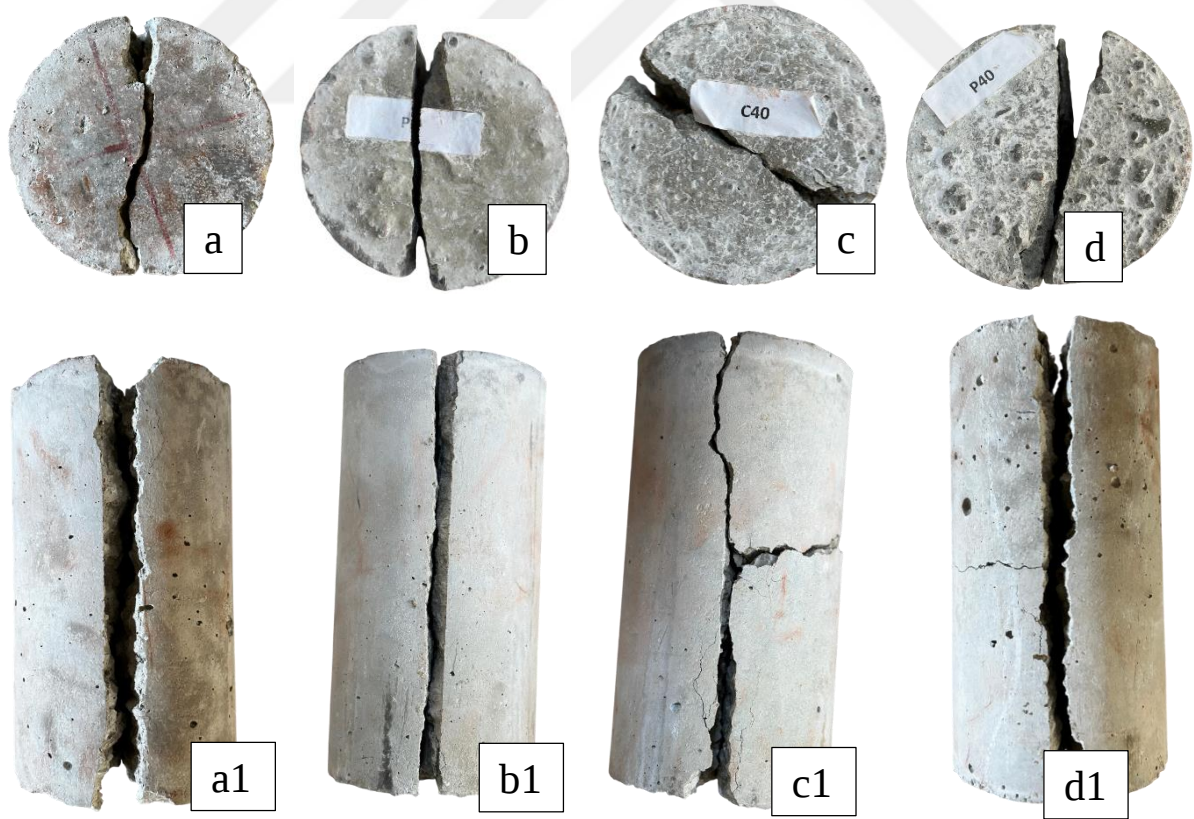
Şekil 3.19. Döküm Sırasında Alınan Numunelerin Kür Havuzuna Koyulması İşlemi

3.6 Numune Kırım İşlemleri

Betonun basınç ve yarmada çekme dayanımı, ASTM C39M standardına uygun olarak gerçekleştirilen deneylerle belirlenmiştir. Silindir ve küp şeklindeki beton numuneler, burulma deneylerinin gerçekleştiği gün kırılmış ve bu numunelerden elde edilen ortalama basınç dayanımları yarmada çekme dayanımları Tablo 3.5. de verilmiştir. Ayrıca, yarma çekme deneyi sonucunda kırılan silindir numunelerine ait çatlak dağılımları Şekil 3.20. de sunulmuştur.

Tablo 3.5. Beton basınç dayanım ortalamaları

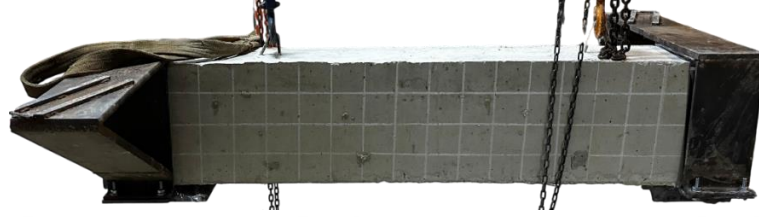
Beton İsmi	Basınç Dayanım (MPa)	Yarmada Çekme Dayanım (MPa)
C25	27.56	2.4
P25	25.82	2.46
C40	40.56	3.16
P40	39	2.73



Şekil 3.20. Silindir Numuneler Ait Çatlak Dağılımları a-a1) C25 Silindir Numune, b-b1) P25 Silindir Numune, c-c1) C40 Silindir Numune, d-d1) P40 Silindir Numune

3.7 Basit burulma deneyi

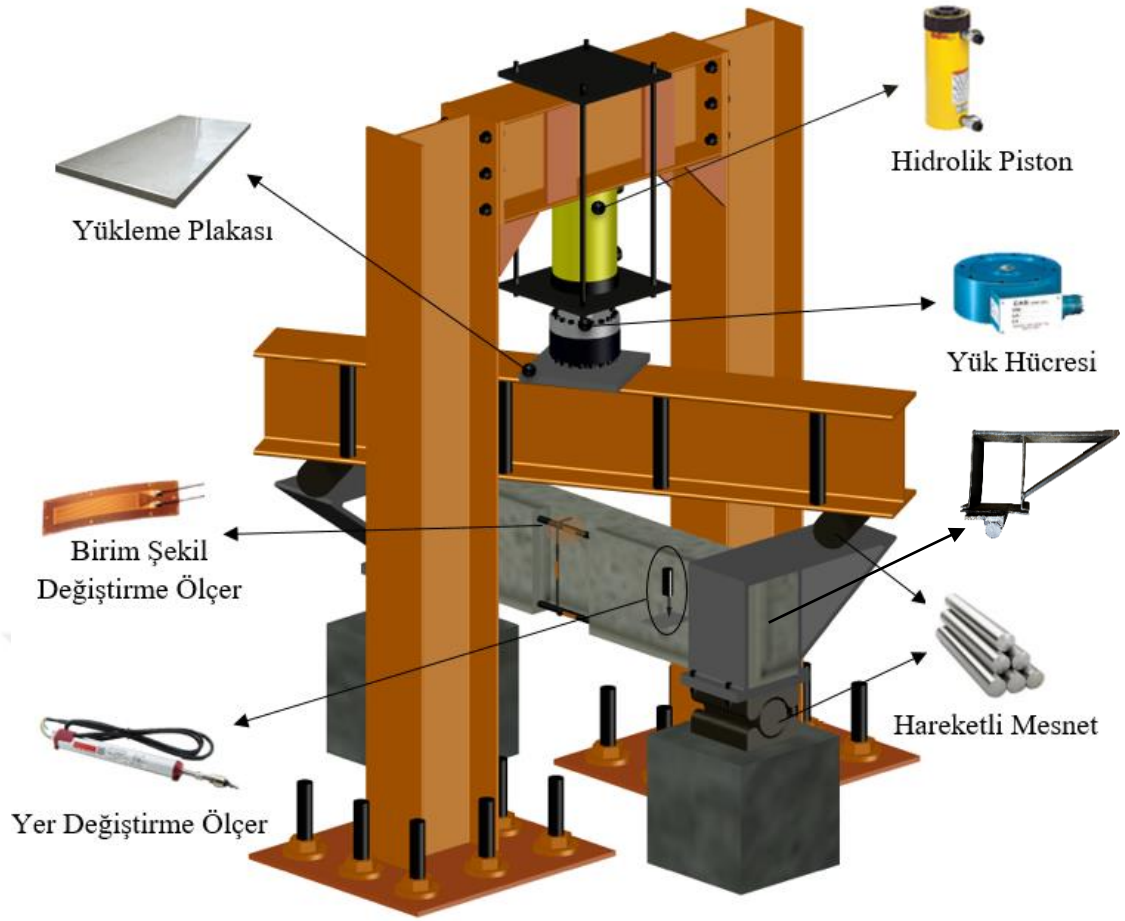
Kür sürecinin tamamlanmasının ardından, deney sırasında oluşacak çatlakların dağılımının daha net bir şekilde gözlemlenebilmesi için kiriş yüzeylerine Şekil 3.21. de görüldüğü gibi 100 × 100 mm boyutlarında karelaj uygulaması yapılmıştır. Bu işlemlerin ardından kirişler, çelikten imal edilmiş basit burulma düzeneği içerisine yerleştirilerek deney aşamasına hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.21. Karelaj İşlemleri Tamamlanıp Deneye Hazır Hale Getirilen Kiriş Numunesi

3.8 Yükleme ve Ölçüm Düzeneği

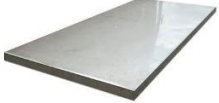
Şematik olarak gösterimi Şekil 3.22. de sunulan basit burulma yükleme düzeneği üzerine yerleştirilen betonarme kirişler, deneysel çalışmanın ana yükleme aşamasını oluşturmuştur. Deney düzeneğinde, çerçeve sistemine entegre edilmiş 600 kN kapasiteli hidrolik piston aracılığıyla eksenel yük uygulanmıştır. Bu yük, kirişin her iki ucunda yer alan mesnet kulaklarına iletilerek yapıda burulma momenti meydana getirilmiştir. Uygulanan kuvvetin hassas bir şekilde ölçülmesi amacıyla, hidrolik pistonun ucuna 1000 kN kapasiteli bir yük hücresi monte edilmiştir. Elde edilen yük verileri, 8 kanallı veri toplama sistemi aracılığıyla eş zamanlı olarak kaydedilmiş ve deney süresince izlenmiştir. Bu yöntem, yükleme koşullarının doğruluğunu sağlamak ve deneysel verilerin güvenilirliğini artırmak amacıyla tercih edilmiştir.

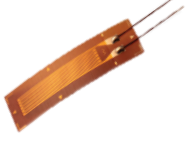


Şekil 3.22. Basit Burulma Düzeneği

Şekil 3.22. de sunulan yükleme düzeneğinde kullanılan malzemelere ait özellikler, Tablo 3.7. de ayrıntılı olarak verilmiştir

Tablo 3. 6. Yükleme ve ölçüm ekipmanları

No	İsim	Görsel	Ölçüm Kapasitesi	Kullanım Amacı
1	Hidrolik piston		600 kN	Eksenel yükleme
2	Yük hücresi		1000 kN	Hidrolik pistonun yük aktarımını sağlamak
3	Yükleme plakası		3 mm	Piston Yüğü İletimini Sağlamak
4	Yer değiştirme ölçer		100 mm	Yükleme altında yer değiştirmelerin tespiti

5	Hareketli Mesnet		80mm	Kirişin dönmesinin sağlanması
6	Manuel hidrolik pompa		600 kN	Hidrolik pistonun eksenel yüklenmesini sağlamak
7	Veri aktarma cihazı		8 Kanallı	Ölçüm aletlerinden elde edilen verilerin dijital ortama aktarılması
8	Birim şekil değiştirme ölçer		10 mm	Donatıda meydana gelen şekil değiştirmelerin ölçümü
9	Kiriş kulakları		3 mm	Hidrolik piston yükünün aktarıldığı burulma kulağı

Burulma kuvvetleri altındaki kiriş davranışının incelenmesi ve özellikle burulma momenti – dönme açısı ilişkisi ile enerji yutma kapasitesi gibi parametrelerin belirlenebilmesi amacıyla, her kirişin orta noktasına gelecek şekilde metal levhalar sabitlenmiştir. Bu levhalar üzerine, Şekil 3.23. de gösterildiği gibi, 100 mm ölçüm kapasiteli ve birbirinden bağımsız çalışan dört adet potansiyometrik cetvel (LVDT) yerleştirilmiştir. LVDT uçlarının karşılıklı yüzeylerine yerleştirilmesi sayesinde, kiriş yüzeyindeki eş zamanlı ve simetrik dikey yer değiştirmeler hassas bir şekilde ölçülmüştür. Elde edilen veriler aracılığıyla, kirişin burulma etkisi altındaki dönme açısı ve yer değiştirme değerleri yüksek doğrulukla tespit edilmiştir.



Şekil 3.23. Potansiyometrik Cetvel ve Levha

4. BULGULAR

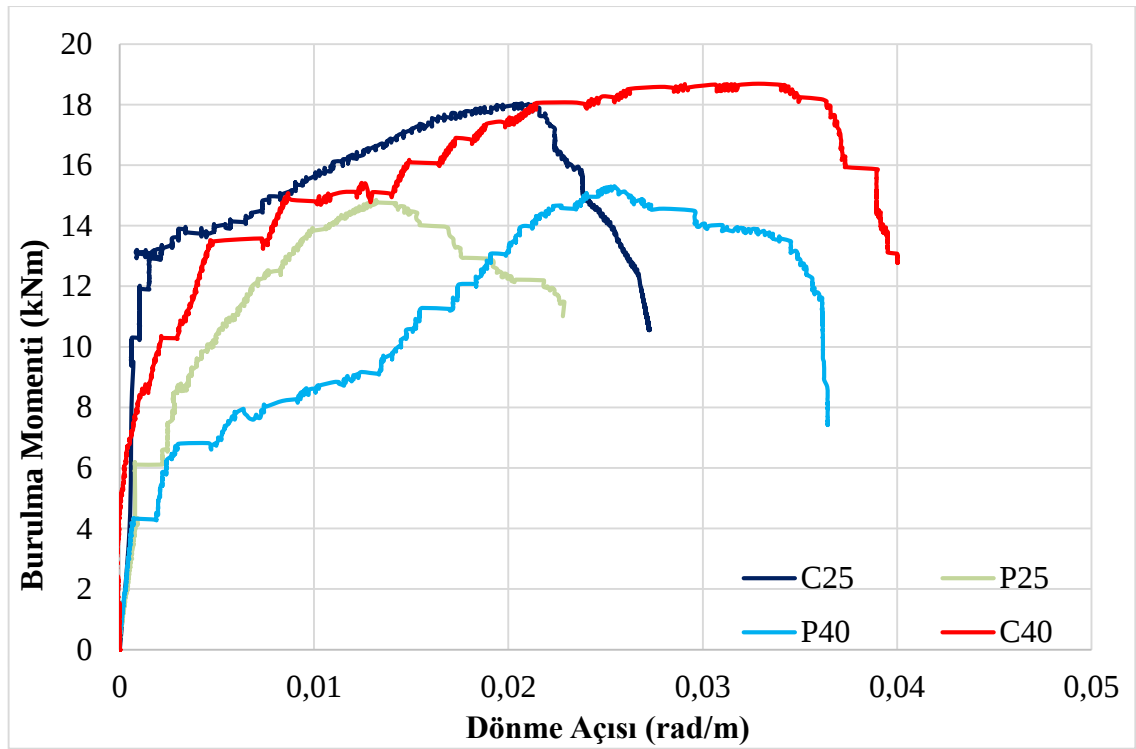
Betonarme kiriş numuneleri, Şekil 3.22. de sunulan yükleme ve ölçüm düzeneği kullanılarak deneysel olarak test edilmiştir. Uygulanan deneyler sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda, kirişlerin burulma momenti–dönme açısı ilişkileri analiz edilmiş; çatlakların oluşum ve yayılma desenleri detaylı şekilde incelenmiştir. Ayrıca, rijitlik, nihai burulma dayanımı ve enerji tüketimi gibi yapısal performans kriterleri kapsamlı olarak değerlendirilmiştir. Bu analizler, doğal perlit agregasının kiriş davranışına etkilerinin belirlenmesine yönelik bulgular sunmaktadır.

4.1. Burulma Moment – Dönme Açısı İlişkisi

Bu bölümde, betonarme kiriş numunelerinin burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişki deneysel veriler ışığında analiz edilmiş ve farklı beton tiplerinin burulma davranışları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar, doğal perlit agregası içeren betonların, geleneksel betonlara kıyasla burulma etkisi altındaki performans farklılıklarını ortaya koymayı amaçlamaktadır. Elde edilen bulgular, beton türünün kirişlerin burulma kapasitesi ve deformasyon davranışı üzerindeki belirleyici rolünü göstermektedir.

Şekil 4.1. ve Tablo 4.1. verileri birlikte değerlendirildiğinde;

- P25 ve P40 sınıfındaki doğal perlit agregalı betonarme kirişler, C25 ve C40 sınıfındaki geleneksel agregası içeren kirişlerle karşılaştırıldığında, başlangıç rijitliği açısından daha üstün bir performans sergilemiştir.
- P40 numunesi, C40 numunesine kıyasla daha yüksek bir süneklik sergilemiştir. Bu durum, dönme açısındaki artışa paralel olarak momentin daha kontrollü bir şekilde azaldığı gözlemiyle doğrulanmaktadır. Bu sonuç, P40 numunesinin daha elastik bir davranış sergileyerek, burulma etkisi altında daha fazla deformasyon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.
- P25 numunesi, C25 numunesine kıyasla burulma momenti altında daha yüksek enerji sönümleme kapasitesi göstermiş ve daha fazla deformasyon kapasitesine ulaşmıştır. Bu, P25 numunesinin, burulma etkisi altındaki yapısal davranışında daha fazla enerji emme yeteneğine sahip olduğunu ve bu sayede daha dayanıklı bir deformasyon profili sergilediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4. 1. Betonarme Kiriş Numunelere Ait Burulma Moment – Dönme Açısı İlişkisi

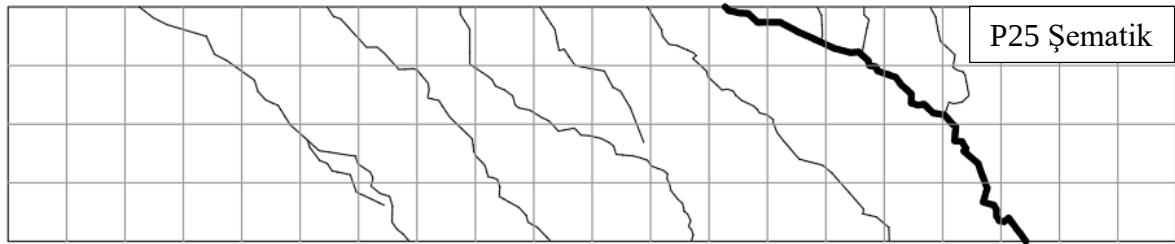
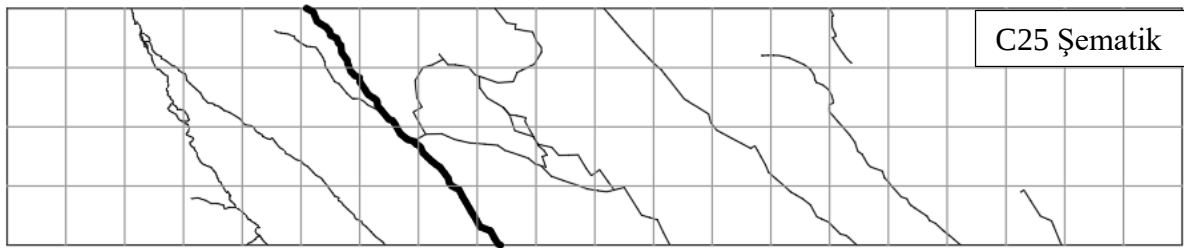
Tablo 4.1. Betonarme kirişlerde burulma momentine ilişkin deney sonuçları

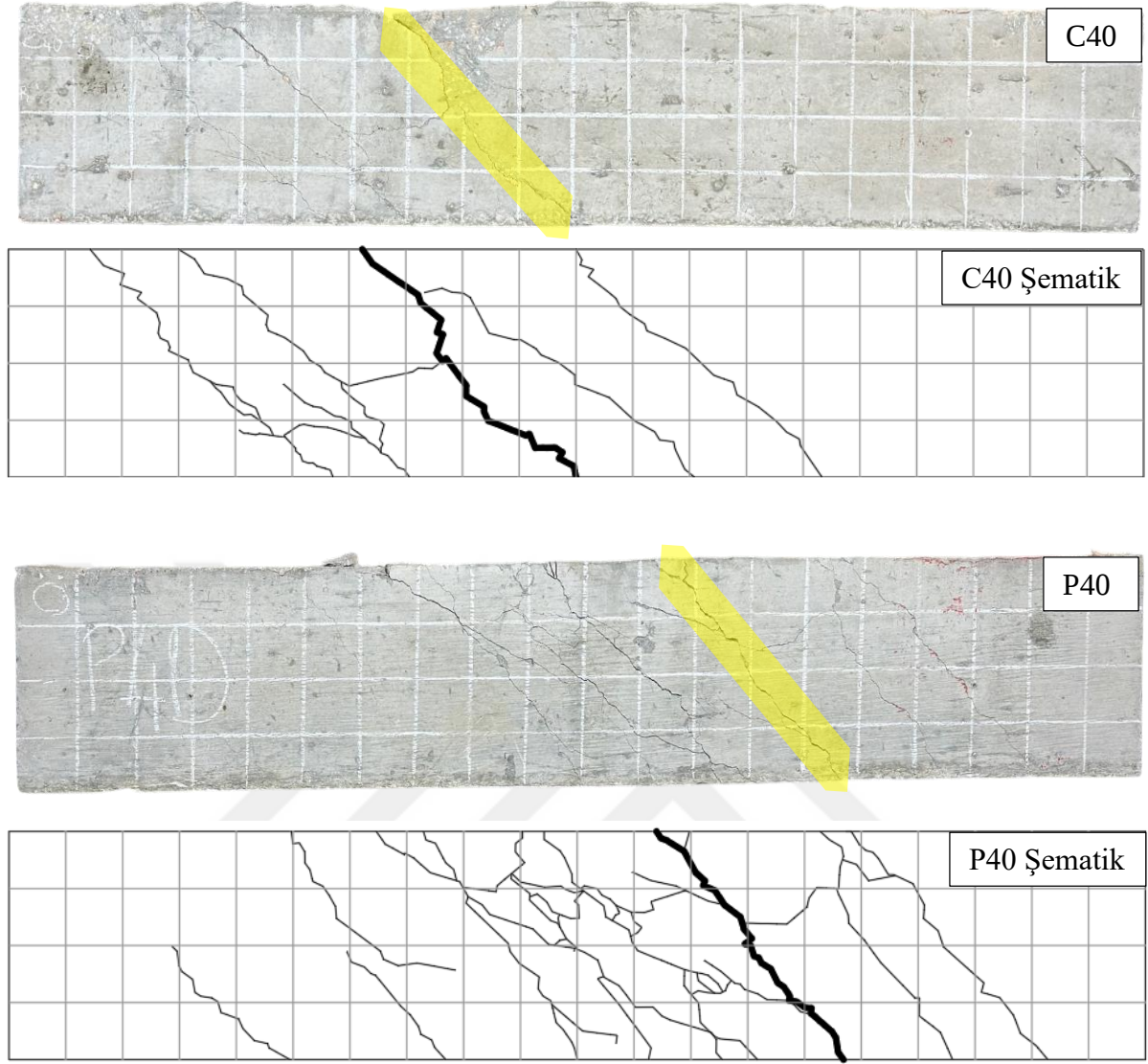
	C25	C40	P25	P40
T_{max} (kN.m)	18.04	18.68	14.85	15.30
T_y (kN.m)	13.09	13.04	11.30	9.88
$\varnothing_{max}$ (rad/m)	0.020	0.032	0.013	0.025
$\varnothing_y$ (rad/m)	0.0012	0.0027	0.0041	0.009

4.2. Çatlak Gözlemleri ve Hasar Dağılımları

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen çatlak oluşumu ve hasar dağılımı bulguları, betonarme kirişlerin yapısal performansını etkileyen en önemli parametreler arasında yer almaktadır. Bu bölümde, farklı beton türleri kullanılarak üretilen kiriş numunelerinin çatlak davranışları ayrıntılı olarak incelenmiş ve karşılaştırmalı değerlendirmelere yer verilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, malzeme türünün çatlak oluşumu ve ilerlemesi üzerindeki etkileri kapsamlı şekilde ortaya konulmuştur.

- Deney sonrasında kiriş numunelerinde oluşan çatlaklara ilişkin görseller Şekil 4.2. de sunulmuştur.
- Doğal perlit agregası içeren kirişlerde (P25 ve P40), çatlakların daha ince (kılcal), daha yoğun aralıklarla oluştuğu, ancak yayılımının daha kontrollü bir şekilde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, perlit agregasının çatlak gelişimini sınırlayıcı ve enerjiyi dağıtıcı etkisine işaret etmektedir.
- Özellikle P40 numunesinde gözlemlenen düşük çatlak genişlikleri, perlit agreganın gözenekli ve hafif yapısı sayesinde oluşan gerilmelerin beton matrisi içerisinde daha homojen bir şekilde dağıldığını ortaya koymaktadır. Bu durum, perlit agregasının çatlak kontrolü açısından olumlu katkılar sağladığını göstermektedir.





Şekil 4.2. Burulma Momentine Maruz Kalan Betonarme Kirişlerde Çatlak Dağılımları

Ayrıca, deneysel bulgular doğrultusunda, çatlak sayısının artışı ve çatlak ağının sıklaşması, yapı elemanının enerji sönmüleme davranışının önemli bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Geleneksel agregalı numunelerde çatlakların daha seyrek ve belirgin yönelimli olduğu, buna karşın perlit agregalı numunelerde çatlakların daha fazla sayıda, ince ve yaygın şekilde olduğu gözlenmiştir. Özellikle P40 numunesinde, çatlak ağının sıklaştığı ve çatlakların görece düşük genişlikte kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, perlit agregasının mikroyapısal etkisiyle gerilmeleri daha etkin dağıttığını ve çatlak ilerlemesini sınırlandırarak rijitlik kaybını geciktirdiğini göstermektedir.

Enerji tüketimi açısından değerlendirildiğinde, P40 numunesi C25'e kıyasla daha yüksek enerji sönümleme kapasitesi göstermiştir. Ancak C40 numunesiyle karşılaştırıldığında, P40'ın daha düşük dayanım seviyesinde benzer bir enerji tüketimi performansı sunduğu görülmektedir. Bu durum, düşük dayanımlı perlitli betonun enerji dağıtma ve çatlak kontrolündeki etkinliği sayesinde, yüksek dayanımlı geleneksel betonlara yapısal anlamda alternatif oluşturabilecek potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır.

4.3. Burulma Rijitliği ve Nihai Performans

Betonarme kirişlerin burulma yükü altındaki burulma momenti–dönme açısı davranışı, yapı sistemlerinin enerji sönümleme kapasitesi ve burulma dayanımı açısından kritik bir değerlendirme kriteridir. Bu bölümde, farklı beton türleriyle üretilen kiriş numunelerine ait deneysel burulma–dönme açısı eğrileri ile nihai burulma dayanım değerleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve burulma etkisi altındaki yapısal performans farklılıkları detaylı biçimde ortaya konulmuştur.

- Başlangıç rijitliği bakımından P40 ve C40 numuneleri benzer performans sergilemiş olsa da, burulma yüklemesi sonrasındaki deformasyon sürecinde P40 numunesinin daha sünek bir davranış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, perlit agregasının betonun süneklik kapasitesine olumlu katkı sağladığını ve burulma etkisi altındaki yapısal elemanlarda daha kontrollü enerji yayılımı ile deformasyon imkânı sunduğunu göstermektedir.
- C25 ve P25 numuneleri arasındaki karşılaştırma sonucunda, P25 numunesinin hem nihai burulma momenti kapasitesi hem de dönme açısı bakımından daha dengeli ve sünek bir performans sergilediği görülmüştür. Bu bulgu, doğal perlit agregasının düşük dayanım sınıfındaki betonarme kirişlerde burulma etkisine karşı yapısal davranışı olumlu yönde etkilediğini ve deformasyon kapasitesini artırarak daha kontrollü bir enerji yayılımı sağladığını göstermektedir.
- Nihai burulma momenti kapasitesi P40 numunesi için 15.30 kN.m, C40 numunesi için ise 18.68 kN.m olarak ölçülmüştür. Her ne kadar C40 numunesi daha yüksek bir nihai tork değeri sunmuş olsa da, P40 numunesi burulma etkisi altında daha fazla deformasyon yapabilmiş ve daha yüksek bir süneklik kapasitesi sergilemiştir. Bu bulgu, perlit agregası kullanımının betonarme kirişlerde şekil değiştirme yeteneğini artırarak burulma davranışını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

- Elde edilen burulma momenti–dönme açısı eğrileri, doğal perlit agregası içeren betonların burulma etkisi altındaki enerji sönümleme performansında belirgin bir iyileşme sağladığını göstermektedir.

4.4. Enerji Tüketimi ve Yutma Kapasitesi

Deneysel çalışmalarda elde edilen burulma momenti (T) – dönme açısı (θ) ilişkisi eğrisinin altında kalan alan, yapı elemanının sönümleyebildiği toplam deformasyon enerjisini göstermekte olup bu değer “enerji tüketimi” veya “enerji sönümleme kapasitesi” olarak literatürde ifade edilmektedir. Bu hesaplamada kullanılan temel yaklaşım, moment (T) ile dönme (θ) parametrelerinin çarpımına dayanan aşağıdaki formülasyonla tanımlanır:

$$\text{Enerji} = \int T(\theta) d\theta \quad (\text{Denklem 2})$$

Bu integrasyon sonucu elde edilen alanın birimi, kNm × rad olarak SI sistemine çevrildiğinde doğrudan Joule (1 kNm = 1000 N·m = 1000 J) cinsine dönüşmektedir (Hsu, 2017; Rahal ve Collins, 1996). Dolayısıyla, burulma etkisi altında yapılan deneysel çalışmalarda enerji tüketimi hesabının Joule biriminde ifade edilmesi uygun ve yaygın bir yaklaşımdır.

Bu yöntem, TS EN 1992-1-1 (Eurocode 2, 2004) ve ACI 318-16 (2016) gibi uluslararası standartlarda doğrudan formüle edilmemiş olsa da, moment-eğrilik veya moment-dönme eğrilerinin altındaki alanların enerji ifadesi olarak yorumlanması, özellikle sismik performans ve şekil değiştirme kapasitesine dayalı analizlerde literatürde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Lubliner ve diğ., 1989; Collins ve Mitchell, 1991; Akter Hosen ve diğ., 2008].

Tablo 4.2. de sunulan verilere dayanarak, yapısal elemanların burulma etkisi altındaki sismik performanslarının değerlendirilmesine yönelik olarak enerji tüketimi ile enerji yutma kapasitesi hesaplanmıştır. Bu bölümde, elde edilen analiz sonuçları doğrultusunda, geleneksel betonarme kirişler ile perlit katkılı betonarme kirişlerin enerji sönümleme kapasiteleri karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

Tablo 4.2. Enerji tüketimi ve yapısal performans değerleri

Numune Kodu	Enerji Tüketimi ($10^3 \times$ Joule)	Göreceli Artış (%)	Göçme Tipi	Çatlak Deseni	Nihai Tork (kNm)	Burulma Rijitliği (kNm/rad)
C25	906	-	Burulma Karma Göçme	Diagonal ana çatlaklar (45°)	18.04	13.09
C40	1097	+21	Diagonal Çatlak + Burulma Göçmesi	Diagonal + Yarma çatlakları	18.68	13.04
P25	578	-36	Kılcal Çatlaklar + Ezilme	Kılcal ve düzensiz çatlak deseni	14.85	11.30
P40	989	+9	Gelişmiş Kılcal + Burulma Karma Göçme	Kılcal ve yaygın çatlak deseni	15.30	9.88

Tablo 4.2. de sunulan bulgular doğrultusunda;

- En düşük enerji tüketimi kapasitesi, 906 Joule ile C25 numunesine ait olarak belirlenmiştir.
- En yüksek enerji tüketimi kapasitesi, 1097 Joule ile C40 numunesine ait olarak belirlenmiştir.
- Geleneksel agrega kullanılan kirişlere oranla, P25 numunesi 578 Joule'lük enerji tüketimi kapasitesiyle daha zayıf bir dayanım göstermiştir.
- Doğal perlit katkılı numuneler içerisinde, 989 Joule enerji tüketimiyle en yüksek kapasiteye P40 numunesi ulaşmıştır.

Enerji tüketimi kapasitelerine ilişkin yapılan değerlendirmeler sonucunda;

- Enerji yutma ve sönmeme davranışları açısından değerlendirildiğinde, doğal perlit agregası ile üretilen betonarme kirişlerin avantajlı olduğu görülmektedir.
- P40 numunesindeki yüksek enerji tüketimi kapasitesi, yapı elemanının daha fazla deformasyon enerjisini absorbe etme yeteneğini ortaya koymaktadır. Bu kapasite, dinamik yükler altında yapıların performansını artıran kritik bir özellik olarak öne çıkmaktadır.

- Geleneksel agregalı kullanılan betonarme kirişlerde, enerji tüketimi düşük seviyelerde kalmış ve kırılma davranış daha belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir.

4.5. Genel Yorum ve Performans İlişkileri

Yapı elemanlarının sismik performansını belirlemede enerji tüketimi ve enerji yutma kapasitesi önemli rol oynamaktadır. Bu bağlamda, yükleme eğrileri altında kalan alanların hesaplanmasıyla betonarme kirişlerin enerji tüketim değerleri belirlenmiştir. Tablo 4.2 de sunulan verilere göre, perlit agregalı betonarme kirişler, geleneksel agregalı kirişlere oranla daha yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Özellikle P40 numunesi, 1097 Joule enerji tüketimi ile geleneksel C25 kirişe kıyasla %89,79 daha yüksek bir enerji tüketim kapasitesine ulaşmıştır. Bu bulgular, perlitli betonarme kirişlerin daha fazla deformasyon enerjisini absorbe ederek daha yüksek bir enerji tüketim performansı sergilediğini göstermektedir. Ayrıca, çatlak oluşumları ve kırılma modları incelendiğinde, perlitli betonarme kirişlerin kırılma sırasında daha sünek bir davranış sergileyerek düktil kırılma modlarına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

5. TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, doğal perlit agregası kullanılarak üretilen betonarme kirişlerin basit burulma yükleri altındaki yapısal davranışları ve hasar mekanizmaları, geleneksel betonarme kiriş ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen önemli bulgular ve öneriler aşağıda sunulmaktadır.

- Beton basınç dayanımındaki artışın, betonarme kirişlerin burulma momenti kapasitelerini artırdığı gözlemlenmiştir. 25 MPa dayanımlı numunelere kıyasla, 40 MPa basınç dayanımına sahip numuneler daha büyük burulma momenti kapasitesine sahip olmuştur.
- Burulma momenti - dönme açısı eğrileri üzerinde yapılan incelemeler, tüm numunelerin başlangıç rijitliklerinin birbirine yakın olduğunu göstermektedir.
- Geleneksel agregalı numunelerde çatlaklar, baskın diyagonal şeritler boyunca yayılırken; doğal perlitli kirişlerde çatlaklar daha yayılmış bir desen sergilemiştir. Deneysel gözlemler doğrultusunda, çatlak sayısının artması ve çatlak ağının sıklaşmasının, enerji sönümleme kapasitesi üzerinde doğrudan etkili olduğu belirlenmiştir. Perlit agregalı numunelerde (özellikle P40), çatlaklar daha ince ve yaygın olarak oluşmuş; bu durum, gerilmelerin homojen dağılması sayesinde çatlak ilerlemesinin geciktirildiğini ve böylece daha yüksek enerji tüketimi sağlandığını göstermektedir.
- Enerji tüketimi kapasiteleri göz önünde bulundurulduğunda, geleneksel agregalı kirişlerin doğal perlit agregalı kirişlere kıyasla daha yüksek bir performans gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle C40 numunesi, 1097 Joule enerji tüketimi ile en yüksek kapasiteye ulaşırken; geleneksel C25 numunesi ise 906 Joule değerine ulaşmıştır. Doğal perlit agregalı kirişlerden P40, 989 Joule ile geleneksel C25 kirişine benzer bir enerji tüketimi kapasitesi gösterirken, P25 numunesi 578 Joule ile en düşük enerji tüketim kapasitesine ulaşmıştır.
- Elde edilen bulgular, betonarme kiriş üretiminde geleneksel agrega yerine doğal perlit agregası kullanımının, elemanın sünek davranış yeteneğini artırırken, deformasyon kapasitesi ve enerji tüketimi performansını sınırladığını ortaya koymaktadır.

- Perlit oranının artırılmasıyla birlikte ortaya çıkan basınç dayanımı kaybını telafi etmek amacıyla, yüksek performanslı beton karışımlarında perlitin farklı fraksiyonlar halinde kullanılması üzerine çalışmalar yapılabilir. Ek olarak perlit agregasının yüksek boşluk oranı, çatlakların gelişimini hızlandırma potansiyeline sahip olduğundan, çelik, bazalt, poli-propilen gibi farklı lif katkıları ile güçlendirilmiş kompozit beton karışımlarının kullanımının faydalı olacağı değerlendirilmektedir.
- Bu çalışma laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilmiş olduğundan, perlitli betonarme kirişlerin tam ölçekli saha uygulamalarındaki performanslarının değerlendirilmesi önerilmektedir.
- Bunlara ek olarak, korozyon direnci ve uzun dönem performansına ilişkin ek testlerin yapılması, malzemenin mühendislik uygulamalarındaki güvenilirliğini önemli ölçüde artıracaktır.
- Bu tez çalışması, perlit agregalı betonarme kirişlerin burulma davranışına yönelik yapılacak ileri düzey çalışmalar için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

- ACI Committee 318. (2016). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-16) and commentary. American Concrete Institute.
- Ağırman, S. (2024). Geopolimer betonarme kirişlerin kesme, eğilme ve burulma davranışlarının incelenmesi (Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı).
- Akbaşı, A., & Çalışkan, Ö. (2023). Deprem Etkisinde Hasar Alan Betonarme Yapıların Düzensizlik Türleri Yönü İle İncelenmesi. In International Conference on Scientific and Academic Research (Vol. 1, pp. 428-435).
- Aker Kimya. (2024). Hakkımızda. Aker Kimya. <https://www.akerkimya.com/sayfa/hakkimizda.html>
- Akkaya, A., & Çağatay, İ. H. (2024). Basınç Kuvvetinin Geçirgen Beton Blokların Çekme Dayanımı ve Sızma Oranı Üzerindeki Etkisinin Araştırılması. Binalar , 14 (11), 3689.
- Akter Hosen, M., Jumaat, M. Z., Saiful Islam, A. B. M., Obaydullah, M., Darain, M., & Huda, N. (2016). Investigation on energy absorption capacity of reinforced concrete beams by the near-surface mounted technique using ductile materials. Science of Advanced Materials, 8(8), 1536-1546.
- American Concrete Institute. (2005). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05). American Concrete Institute.
- ASTM International. (2023). ASTM C39/C39M-23: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Ataş, O. (2023) ‘‘ECC betonla üretilen kompozit kesitli BA kirişlerin burulma hasarlarının deneysel araştırılması.’’
- Aydınlar Madencilik. (2025). About Us <https://www.aydinlarmadencilik.com.tr/about-us>
- Aydoğuş, T. (2014). Çok katlı yapılarda üniform olmayan burulma etkilerinin hesabı için bir yöntem.
- Bayrak, B. (2021). Hibrit lifli kendiliğinden yerleşen betonlu perde duvarların burulma davranışının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi (Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı).
- Bayülke, N. (1998, Haziran 27). Adana-Ceyhan depreminde yapısal hasar. <http://angora.deprem.gov.tr/>

- Beiram, A. A. H., & Al-Mutairee, H. M. K. (2022). Effect of using waste rubber as partial replacement of coarse aggregate on torsional strength of square reinforced concrete beam. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 35(2), 397-405.
- Bentz, E. C., Vecchio, F. J., & Collins, M. P. (2006). Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements. *ACI structural journal*, 103(4), 614.
- Berktaş, İ. (1995) “Betonarme I-Taşıma Gücü ve Kesit Hesapları”, İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul.
- Bıkkı, M. (2015). Türkiye’de Hasara Ve Can Kaybına Neden Olan Deprem Listesi (1900-2014). *İçinde*, 3, 1-10.
- Bulut, H. A., (2024). A different approach for green concrete production: Determination of the effect of e-waste and waste rubber powder on durability properties of concrete. *Challenge Journal of Concrete Research Letters* , vol.15, no.3, 69-81.
- Canbaz, M. ve Ezici, M. (2022). Genleştirilmiş Polistiren Granülleri İçeren Hafif Betonların Özellikleri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(1), 31-38.
- Canpolat, F., Akçaözöğlü, S., & Özal, G. (2023). 6 Şubat Depremlerinde Niğde’de Hasar Alan Yapıların Düzensizlik Türlerinin İncelenmesi. *STAR Sanat Ve Tasarım Araştırmaları Dergisi*, 4(7), 284-301.
- Celep. Z., ve Kumbasar, N. (1996) “Betonarme Yapılar”, Sema Matbaacılık, İstanbul.
- Çelikel, Z. (2019). Yüksek dayanımlı beton ile üretilen betonarme kirişlerde çelik lif ve polipropilen lif katkılarının burulma davranışına etkisi (Master's thesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Coğrafya Harita. (t.y.). Türkiye Perlit Madeni Haritası. <http://cografyaharita.com/haritalarim/4fturkiye-perlit-madeni-haritasi.png>
- Collins, M. P., & Mitchell, D. (1991). *Prestressed Concrete Structures*, Prentice Hall.
- Demir, İ., & Korkmaz, S. (2024). Perlit Tozu İçeren Cüruf Bazlı Jeopolimerlerde Molarite, Kürlenme Süresi ve Kürlenme Sıcaklığının Etkisi. *İran Bilim ve Teknoloji Dergisi, İnşaat Mühendisliği İşlemleri* , 48 (2), 763-778.
- Devlet Planlama Teşkilatı. (2001). 8. Kalkınma Planı (2001–2005): Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara.
- Doğangün, A., (2018). *Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı*. Birsan Yayınları, İstanbul

- Dumlu, F. (2025). Jumbo böğürtlen (*Rubus spp.*) yeşil çeliklerinin aeroponik ve perlit ortamında köklenme performanslarının araştırılması (Yüksek lisans tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- Durmuş, G. & Topuz, H. C., (2022). Thermal Characterization of Foam Concrete Panels Containing Expanded Perlite-Polystyrene, Foam and Aerogel Layer. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol.10, no.1, 39-49.
- El Mir, A. I. (2017). Influence of additives on the porosity related properties of selfcompacting concrete.
- Elemam, W. E., Agwa, I. S., & Tahwia, A. M. (2023). Reusing ceramic waste as a fine aggregate and supplemental cementitious material in the manufacture of sustainable concrete. *Buildings*, 13(11), 2726. <https://doi.org/10.3390/buildings13112726>
- ERMCO (2024). Guidelines for the use of recycled aggregates in concrete. European Ready Mixed Concrete Organization (ERMCO), Brussels
- Ersoy, U. (1975) “Betonarmede Burulma”, Güven Kitabevi, Ankara.
- Ersoy, U., & Özcebe, G. (2012). Betonarme: Temel ilkeler TS 500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) göre hesap (630 s.). Evrim Yayınevi.
- European Committee for Standardization. (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1). Brussels: CEN.
- European Committee for Standardization. (2014). EN 206: Concrete – Specification, performance, production and conformity. CEN.
- Farrag, S., Abushammala, M. F. M., & Al-Balushi, I. (2024). Utilisation of industrial waste materials in the production of geopolymer concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1347(1), 012088. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1347/1/012088>
- Geldim, R. A. (2024). Alkali ile aktive edilmiş pomza agregalı hafif harçların mekanik özelliklerine bağlayıcı türü ve aktivatör oranının etkisinin incelenmesi (Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı).
- Google Earth. (2025). <https://earth.google.com/>
- Görhan, G., & Şimşek, O. (2016). Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Pirinç Kabuğu Külünün Etkisi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 107-117.
- Gülyaprak, H. Y. (2019). Artvin Yusufeli bölgesindeki pirinç kabuğu külünün betonda bağlayıcılık özelliğinin araştırılması (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

- Günaydın, A., & Gökdemir, H. (2021). Perdelerin Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımındaki Etkisi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(3), 381-395. <https://doi.org/10.31796/ogummf.880934>
- Gündüz, L., Sarıışık, A., Tozaçan, B., Davraz, M., Uğur, D., & Çankıran, O. (1998). Pomza teknolojisi (Cilt 2, s. 111). Isparta.
- Hsu, T. T. (2017). Unified theory of reinforced concrete. Routledge.
- Kaya, SA, Yalçın, C. ve Kaya, O. (2023, Mayıs). Ters çevrimli saf burulma altında tam ölçekli betonarme kirişlerin deneysel araştırması. Yapılarda (Cilt 51, s. 734-746). Elsevier.
- Kılınçarslan, Ş., & Tuzlak, F. Uçucu Kül Katkılı Köpük Betonların Termo-Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi, 2(1), 1-5.
- Kuzeydoğu Anadolu Kalkınma Ajansı. (2022). Erzincan ilinde perlit madeni araştırma raporu. https://www.kalkinmakutuphanesi.gov.tr/assets/upload/dosyalar/erzincan-ilinde-perlit-madeni-arastirma-raporu_03032023.pdf
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., & Onate, E. (1989). A plastic-damage model for concrete. International Journal of solids and structures, 25(3), 299-326.
- Muhaimin, A. (2015). Perilaku Mekanik Beton dengan Crumb Rubber. Universitas Hasanudin: <https://core.ac.uk/download/pdf/77623849.pdf>.
- Özcan, N.T. (2019). “Deprem Tehlike Analizi Nedir?”, http://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/f102867ed0c9597_ek.pdf?tipi=79&turu=X&sube=3 adresinden erişildi.
- Özper Perlit. (t.y.). Filtre perlit. <https://ozpermak.com/filtre-perlit>
- Perlit Market. (t.y.). Perlit nedir? <https://perlitmarket.com/blog/perlit-nedir?o=7&page=1>
- Perlitsa. (t.y.). Perlit Sıva ve Şap. <https://perlitsa.com/perlit-urunleri/perlit-siva-ve-sap/>
- Purwanti, H., & Artiningsih, T. P. (2018). Palm kernel shell as an alternative aggregate on high performance concrete. Journal of Science Innovare, 1(2), 68–75. <https://doi.org/10.33751/jsi.v1i02.1004>
- Rahal, K. N., & Collins, M. P. (1996). Simple model for predicting torsional strength of reinforced and prestressed concrete sections. Structural journal, 93(6), 658-666.
- Rashad, A. M. (2016). A synopsis about perlite as building material–A best practice guide for Civil Engineer. Construction and Building Materials, 121, 338-353.
- Şenol, H., Yılmaz, M., & Kaya, S. (2022). Geri dönüştürülmüş malzemelerin beton üretiminde kullanımı üzerine bir inceleme. Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(3), 210–225.

- Sezen, H. (2000). Structural engineering reconnaissance of the August 17, 1999 earthquake: Kocaeli (Izmit), Turkey. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Silva, Y. F., Villaquirán-Cacedo, M., & Izquierdo, S. (2023). Exploring the potential of alternative materials in concrete mixtures: Effect of copper slag on mechanical properties and carbonation resistance. *Materials*, 16(20), 6677. <https://doi.org/10.3390/ma16206677>
- Stefanidou, M., Kesikidou, F., Konopisi, S., Tsardaka, E. C., Pacht, V., Tsampali, E., & Konstantinidis, G. (2022, September). Criteria for the Utilization of Perlite By-products in Traditional Mortars. In *Historic Mortars International Conference* (pp. 374-385). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Subaşı, S. (2013). Genleştirilmiş Kıl Agregası İle Taşıyıcı Hafif Beton ÜRETİMİ. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24(3).
- Tiber, B. (2011). Perlit içeren fonksiyonel bir tekstil ürününün tasarımı (Doctoral dissertation, Dokuz Eylül Üniversitesi (Turkey)).
- Topçu, A. (2014). Taşıyıcı sistem düzensizlikleri, doğrular, yanlışlar, hasarlar. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, <http://mmf.ogu.edu.tr/atopcu>.
- TS500 (2000). “Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 708. (2010). Steel for the reinforcement of concrete—Reinforcing steel. Ankara: Turkish Standards Institution.
- Turan, A. İ., Ayaz, Y., Yalçiner, H., Kumbasaroğlu, A., & Çelik, A. (2024). Experimental and Analytical Investigation of Moment-Carrying Capacities of Reinforced Concrete Frame Systems Corroded by Accelerated Corrosion Method. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 14(2), 755-772.
- Turanlı, L., Demir, İ., & Gökçe, H. S. (2021). Atık bazlı bağlayıcıların sürdürülebilir beton üretimindeki rolü. *Yapı Malzemeleri Dergisi*, 9(2), 95–108.
- Turhan, E. Y. (2003). Beton. Ankara Syf, 183.
- Tursun, D. (2024). Kat adetleri farklı betonarme binaların burulma davranışının değerlendirilmesi (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Bilim Dalı).
- Uluer, O., Karaağaç, İ., Aktaş, M., Durmuş, G., Ağbulut, Ü., Khanlari, A., & Çelik, D. N. (2018). Genleştirilmiş perlitin ısı yalıtım teknolojilerinde kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 36-42.
- Vuran, E., Serhatoğlu, C., Timurağaoğlu, M. Ö., Smyrou, E., Bal, İ. E., & Livaoğlu, R. (2025). Damage observations of RC buildings from 2023 Kahramanmaraş earthquake sequence

and discussion on the seismic code regulations. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 23(3), 1153-1182.

Yorulmaz, A. M. (2018). Betonarme yapılarda A1 düzensizlik durumunun değişik deprem bölgelerinde araştırılması (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

