

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PERLİT İLE ÜRETİLMİŞ BETONARME KOLONLARIN
TERSİNİR YÜK ETKİSİ ALTINDA YAPISAL
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Sefa ATLI

Danışman: Prof. Dr. Hakan YALÇINER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN
2023
Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PERLİT İLE ÜRETİLMİŞ BETONARME KOLONLARIN TERSİNİR YÜK ETKİSİ ALTINDA YAPISAL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Sefa ATLI

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hakan YALÇINER

Günümüzde betonarme yapılar oldukça yaygın kullanıma sahiptir. Bu yaygın kullanım bu alana olan ihtiyacı gün geçtikçe artırmaktadır. Betonarmenin günümüzde farklı alanlarda kullanılma ihtiyacının artması, doğal agregaya olan ihtiyacın gün geçtikçe artış göstermesi beton teknolojisi alanında bazı gelişmelere neden olmuştur. Betona olan bu ihtiyaç zamanla uçucu kül, yüksek fırın cürufu, perlit gibi alternatif malzemelerin ortaya çıkmasını kaçınılmaz hale getirmektedir. Bu ihtiyaç, hammaddesi olan agregaya için alternatif malzemelerin düşünülmesini ve kullanılmasına yol açmaktadır. Perlit, geleneksel betonda kullanılan agregaya göre daha hafif, sürdürülebilir, ekonomik bir malzeme olması sebebiyle araştırmaya konu olmuştur. Perlitin yapısal davranışını incelemek için doğal perlit agregası kullanarak yapısal eleman üretilmiştir. Çalışma kapsamında 21 MPa ve 35 MPa basınç dayanımlarına sahip geleneksel ve perlitli olmak üzere her basınç dayanımından 2'şer adet betonarme kolonu üretilmiştir. Üretilmiş olan betonarme kolonlarının yapısal davranışlarının incelenmesi için sabit eksenel yük altında tersinir tekrarlanır yanal yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yük-deplasman, süneklik, rijitlik ve enerji yutma kapasiteleri bakımından bu iki malzeme için yapısal davranış farklılıkları ortaya konularak perlitin geleneksel agreganın yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Deneysel bulgular neticesinde perlitin betonarme kolonlarda kullanılmasıyla taşıma gücü kapasitesi bakımından olumlu sonuçlar elde edilmesine rağmen perlitli kolonların süneklik, rijitlik ve enerji yutma kapasiteleri bakımından geleneksel betonarme kolonlara göre daha az performans gösterdiği görülmüştür. Sonuç olarak perlit agregası ile üretilen betonarme kolonların yapısal davranışlarının önemli ölçüde farklı olmasının nedenleri bu tip betonların gerilme-birim şekil değiştirme davranışı gibi mekanik özelliklerin araştırılması ile ileriki çalışmalarda ortaya konulabileceği düşünülmektedir.

2023, 53 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Betonarme kolon, Geleneksel beton, Perlit, Tersinir tekrarlanır yanal yükleme, Yük deplasman

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS PRODUCED WITH PERLITE UNDER CYCLIC LOADING TEST

Sefa ATLI

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

Supervisor: Prof. Dr. Hakan YALÇINER

Today, reinforced concrete structures are widely used. This widespread use increases the need for this field day by day. The increase in the need for use of reinforced concrete in different areas and the increasing need for natural aggregates have led to some developments in the field of concrete technology. This need for concrete makes the emergence of alternative materials such as fly ash, blast furnace slag and perlite inevitable. This need leads to the consideration and use of alternative materials for aggregate, which is its raw material. Perlite has been the subject of research because it is a lighter, sustainable and economical material compared to the aggregate used in conventional concrete. In order to examine the structural behavior of perlite, a structural element was produced using natural perlite aggregate. Within the scope of the study, 2 reinforced concrete columns of each compressive strength, traditional and perlite, with compressive strengths of 21 MPa and 35 MPa, were produced. In order to examine the structural behavior of the produced reinforced concrete columns, reversible and repeated lateral loading tests were carried out under constant axial load. In terms of load-displacement, ductility, stiffness and energy absorption capacities, structural behavior differences for these two materials were revealed and the usability of perlite instead of traditional aggregate was investigated. As a result of the experimental findings, although positive results were obtained in terms of bearing capacity with the use of perlite in reinforced concrete columns, it was observed that perlite columns performed less than conventional reinforced concrete columns in terms of ductility, rigidity and energy absorption capacity. As a result, it is thought that the reasons why the structural behavior of reinforced concrete columns produced with perlite aggregate are significantly different can be revealed in future studies by investigating mechanical properties such as stress-strain behavior of this type of concrete.

2023, 53 Pages

Keywords: Cycling loading test, Load – displacement, Perlite, Reinforced concrete column, Traditional concrete

TEŐEKKÖR

Lisansüstü eğitime adım attığım ilk günden itibaren desteklerini bir an olsun üzerimizden esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle yolumu aydınlatıp, ufkumu açan çok değerli bilim insanı danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hakan YALÇINER'e, çok değerli hocam Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU'na, Arş. Gör. Ahmet İhsan TURAN'a, Arş. Gör. Alper ÇELİK'e, ve sevgileriyle, dualarıyla beni her zaman cesaretlendiren, destekleyen canım aileme teşekkür ederim.

Sefa ATLI

Temmuz, 2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. KURAMSAL TEMELLER.....	11
3.1. Betonarme ve kolon davranışı.....	11
3.2. Plastik Mafsal ve Plastikleşme	12
3.3. Rijitlik.....	12
3.4. Süneklik.....	13
3.5. Yük-deplasman ilişkisi	14
3.6. Enerji yutma kapasitesi	15
4. MATERYAL ve YÖNTEM.....	16
4.1. Materyal	16
4.1.1. Malzeme ve kesit özellikleri	16
4.1.1.1. Donatı mekanik özellikleri	17
4.1.2. Ön deney çalışmaları	18
4.1.3. Numunelerin hazırlanması	26
4.1.3.1. Donatı işleri.....	26
4.1.3.2. Kalıp işleri.....	27
4.1.3.3. Beton işleri	28
4.2. Yöntem	33
4.2.1. Deney Düzenegi	33
4.2.2. Ölçüm düzenegi sistemi	36
4.2.3. Yükleme programı.....	37
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	39

5.1. Deney Sonuçları	39
5.1.1. Yük-deplasman sonuçları.....	39
5.1.2. Enerji yutma kapasite sonuçları	46
5.1.3. Rijitlik ilişkileri	48
6. SONUÇLAR.....	51
KAYNAKLAR	52



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Betonarme bir taşıyıcı sisteme ait sünekliğin belirlenmesi.....	14
Şekil 4.1. Betonarme kolon kesit özellikleri	17
Şekil 4.2. Donatılara ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	18
Şekil 4.3. Kuruması için serimi yapılmış perlit agregası	19
Şekil 4.4. Perlit agregası eleme düzeneği.....	19
Şekil 4.5. Suda bekletilen perlit agregası	20
Şekil 4.6. Perlit agregası dağılım oranları.....	21
Şekil 4.7. Islatılmış şekilde kuruması beklenen perlit agregası	21
Şekil 4.8. Ayır tane boyutlarına ayrılmış perlit malzemesi.....	22
Şekil 4.9. Ön deney numune beton döküm çalışmaları.....	22
Şekil 4.10. Deney numunelerinin uygun şekilde sıkıştırma işleminin yapılması	23
Şekil 4.11. Beton dökümü sonrası 7 ve 28 gün için alınmış olan silindir numuneler.....	23
Şekil 4.12. Ön deney çalışmaları için dökülmüş olan beton silindir numuneleri	24
Şekil 4.13. Kolon numunelerde kullanılmış donatı kafesleri	26
Şekil 4.14. Kolon numunelerde kullanılan etriyeleri bağlanmış boyuna donatılar.....	27
Şekil 4.15. Betonarme kolonların dökümü yapılacağı kalıp sistemi.....	28
Şekil 4.16. Beton dökümü gerçekleştirilen betoniye	29
Şekil 4.17. Beton döküm aşamaları.....	30
Şekil 4.18. Prizini almış betonarme kolonun kütleme işlemi	31
Şekil 4.19. 28 gün sonrasında deneye hazır olan betonarme kolon numuneler	32
Şekil 4.20. Yükleme düzeneği için tasarlanan deney düzeneği 3 boyutlu gösterimi.....	33
Şekil 4.21. Deney düzeneği.....	34
Şekil 4.22. Yükleme sistemi için oluşturulmuş olan deney düzeneği.....	35
Şekil 4.23. Yanal yer değiştirmeyi ölçmek için konulan yer değiştirme ölçer	37
Şekil 4.24. Deney sisteminde kullanılan yükleme programı.....	38
Şekil 5.1. Geleneksel C20 kolon numunesi yük-deplasman grafiği	39
Şekil 5.2. Perlit C20 kolon numunesi yük-deplasman grafiği	40
Şekil 5.3. Geleneksel C40 kolon numunesi yük-deplasman grafiği	40
Şekil 5.4. Perlit C40 kolon numunesi yük-deplasman grafiği	41
Şekil 5.5. Betonarme kolon numunelere ait iskelet eğrileri	41

Şekil 5.6. Geleneksel C20 yük-deplasman idealleştirmesi	42
Şekil 5.7. Perlit C20 yük-deplasman idealleştirmesi	43
Şekil 5.8. Geleneksel C40 yük-deplasman idealleştirmesi	43
Şekil 5.9. Perlit C40 yük-deplasman idealleştirmesi	44
Şekil 5.10. İki doğrultulu göçme kriteri grafiği	45
Şekil 5.11. Çevrimde tüketilen enerjinin hesaplanması	46
Şekil 5.12. C20 ve P40 kolon numunelerine ait enerji ilişkileri	47
Şekil 5.13. C20 ve P40 kolon numunelerine ait enerji ilişkileri	48
Şekil 5.14. C20 ve P20 kolon numunelerine ait rijitlik ilişkileri	49
Şekil 5.15. C40 ve P40 kolon numunelerine ait rijitlik ilişkileri	50



TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Donatı mekanik özellikleri.....	18
Tablo 4.2. C20 Perlit silindir numunelere ait beton basınç dayanımları.....	24
Tablo 4.3. C40 Perlit silindir numunelere ait beton basınç dayanımları.....	25
Tablo 4.4. C20 Geleneksel silindir numunelere ait beton basınç dayanımları	25
Tablo 4.5. C40 Geleneksel silindir numunelere ait beton basınç dayanımları	25
Tablo 4.6. Yükleme adımları.	37
Tablo 5.1. C20 Geleneksel silindir numunelere ait beton basınç dayanımları	44
Tablo 5.2. C40 Geleneksel silindir numunelere ait beton basınç dayanımları	44
Tablo 5.3. C20 Geleneksel silindir numunelere ait beton basınç dayanımları	45
Tablo 4.5. C40 Geleneksel silindir numunelere ait beton basınç dayanımları	25

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

F_{max}	Sistemin almış olduğu maksimum yük
F_y	Akma noktasındaki yük
F_u	Ultimate noktasındaki yük
Δ_y	Akma noktasındaki yer değiştirme
Δ_u	Ultimate noktadaki yer değiştirme
μ	Süneklik katsayısı
K	Elastik rijitlik
$F_{j,max}$	Her bir çevrime denk gelen maksimum yük
Δ_j	Her bir çevrime denk gelen deplasman

Kısaltmalar

ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
TS-EN	Türk Enstitüleri Avrupa Normu
UEPG	Aggregates European Groups

1. GİRİŞ

Kentleşme ile birlikte sanayileşmedeki artış, inşaat sektöründe alt ve üst yapılarda beton üretiminin en önemli hammaddesi konumunda bulunan agregaya olan ihtiyacı artırmıştır. Agreganın miktarının genel toplam kullanımda büyük bir yer tutan hazır beton sektörü verilerine bakıldığında Türkiye'nin 2018 yılında sadece 100 milyon m³'lük yıllık üretim ile Avrupa birincisi; ABD ve Çin'den sonra dünya üçüncüsü konumunda olduğu görülmektedir (UEPG, 2018). İnşaat sektöründeki bu ihtiyacı karşılamak için taş ocakları ve nehirlerden agrega elde edilmesi sırasında ekolojik sisteme büyük ölçüde zarar verilmektedir. Bu zararların başında taş ocaklarına yakın olan bölgelerde yoğunlaşan hava kirliliği, toprak kirliliği ve su kirliliği gelmektedir. Bu olumsuz etkiler dikkate alındığında, betondaki agrega miktarını azaltmak veya agreganın yerine alternatif yapı malzemelerinin kullanılması, yalnızca ekonomik açıdan değil, aynı zamanda beton bileşenlerinin üretimiyle ilişkili olan çevresel tehditleri azaltarak ekosistemimizi kurtarmak için de kritik öneme sahiptir.

Ekolojik sisteme verilen zararı azaltmayı hedef alan, hem enerji tasarrufu sağlamak hem de betonun fiziksel özelliklerine katkı sağlayabilecek atık malzemelerin beton içerisinde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Betonun özelliklerindeki gelişmeler ve atık malzemelerin kullanımına bağlı olarak çevreye sağladığı faydalar, yeşil beton üretimine yönelik daha fazla araştırmayı teşvik etmektedir. Araştırmalarda kullanılan alternatif ve atık malzemeler genel olarak; pet şişe (Akçaözoğlu, 2008), asfalt kaplaması (Şahan, M. F.), demir tozu (Durak, 2022), uçucu kül (Zhang, 2022), inşaat molozu (Çakır, 2018), palm yağı kazanı klinkeri (Chai, 2017), odun atığı (Raza, 2020), kil tuğla (Yang, 2020) ve kauçuk lastik (Vadivel, 2011), gibi ürünler yer almaktadır. Bu çalışmalarda amaç harç veya betonun tasarım aşamasında beklenen mekanik özelliklerini geliştirmek, kullanılan agrega miktarını azaltmak, enerjiyi korumak ve sera gazı emisyonunu azaltmaktır.

Yapılmış olan çalışmalar ışığında hafif bir malzeme olan perlit agregasının alternatif malzemeler içerisinde göstermiş olduğu avantajları ile ön plana çıkmaktadır. Perlit, geliştirilmiş haliyle önceki ham hali arasında yirmi kata kadar hacim artışı gösterebilen ve bu şekilde oldukça da hafif bir malzeme olabilen, çok iyi ısı ve ses izolasyon özelliklerine sahip bir kayadır. Perlit, ülkemizde önemli bir doğal kaynak olarak

bulunmakta ve birçok sektörde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Dünya'daki olası perlit rezervinin yaklaşık %74'üne Türkiye sahiptir. Özellikle beton sektöründe perlit, birçok avantajıyla tercih edilen bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Perlit, bir mineraldir ve hafif, yalıtkan, yangına dayanıklı ve dayanıklı özelliklere sahiptir. Bu nedenle, beton üretiminde perlit kullanımı, yapıların enerji verimliliğini artırırken aynı zamanda dayanıklı ve sürdürülebilir yapılar elde etmeyi sağlar. Ayrıca, perlit, beton karışımında hacimce bir katkı maddesi olarak kullanılarak betonun ağırlığını azaltır ve dolayısıyla yapıların taşıyıcı sistemine daha az yük bindirir. Türkiye'nin zengin perlit rezervleri, ülkemizin beton sektöründe rekabet gücünü artırmakta ve çevre dostu, enerji verimli yapılar için önemli bir kaynak sağlamaktadır.

Dünya'da ve ülkemizdeki perlit kullanım miktarına baktığımız zaman perlit, en fazla olarak inşaat sektöründe kullanıldığı görülmektedir. Bundan dolayı, perlit tüketimi inşaat sektöründeki olumsuzluklardan bir hayli etkilenmektedir. Perlitin ısı yalıtımı, ses yalıtımı ve depreme karşı dayanıklılık avantajları açısından önemli üstünlüklerinin olması, inşaat sektöründe ekonomiye olumlu katkılar sağlayacaktır (Azizi, 2007).

Yıllar içerisinde beton için farklı atık ve katkı malzemelerinin etkisini araştırmak amacıyla birçok bilimsel çalışma yapılmış ve bunların sağladığı faydalar tespit edilmiş olmasına rağmen gerçekleştirilen deneysel çalışmalar prizmatik kiriş, küp ve silindir numuneler üzerinde sınırlı kalmıştır. Doğal perlit agregası kullanımının taşıyıcı elemanlarda etkilerini inceleyen herhangi bir çalışma henüz gerçekleştirilmemiştir.

Bu tez kapsamında beton içerisindeki agrega yerine ham perlit kullanarak betonarme kolon elde edilecektir. Aynı beton basınç dayanımına sahip sadece ham perlit agregası ve sadece geleneksel beton olarak üretilecek betonarme kolonlarının tersinir tekrarlanır yanal yükleme düzeneği ile yapısal davranışları incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilmiş olan deney sonuçlarıyla perlit ve geleneksel betonarme kolonlarının yapısal farklılıkları ortaya konulmuştur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Betonarme yapıyı oluşturan betondan beklenen başlıca özellikler; düşük birim hacim ağırlık, işlenebilme özelliği, basınç dayanımı, aderans dayanımı, kırılma tokluğu ve zararlı çevresel etkilere karşı dayanıklılık olarak sıralanabilir. Mevcut literatür incelendiğinde belirtilen bu özellikleri betona kazandırmak veya mevcut özelliği iyileştirmek amacıyla çeşitli katkı ve atık/alternatif malzemelerin (pet şişe, inşaat molozu, palm yağı kazanı klinkeri, odun atığı, kil tuğla ve kauçuk lastik) betona eklenerek yeni karışımların elde edildiği görülmektedir.

Agrega tipi ve agrega granülometrisi beton karışımlarında mekanik özellikleri etkileyen önemli parametrelerdendir. Beton içerisinde hafif agrega kullanımı, betonun birim hacim ağırlığını doğrudan etkileyerek yapılarda ölü yükü azalttığı için araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Lydon (1982) yapmış olduğu çalışmada hafif agregalar için beton basınç dayanımının agrega tipine bağlı olduğunu ve beton yoğunluğun artmasıyla basınç dayanımının artış gösterdiğini belirtmiştir. Topçu vd. (1998) hafif ağırlıklı agregaların hava boşlukları sayesinde betonun daha yüksek dayanım, daha iyi çekme dayanımı kapasitesine, düşük ısı genleşme katsayısına, üstün nitelikli ısı ve ses yalıtımı özelliklerine sahip olduğunu vurgulamıştır. Bir diğer hafif agrega kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada ise Yaşar vd. (2003) betonda hafif agrega kullanılmasıyla yapının ölü ağırlığının ve kullanılacak donatı miktarının azalacağını ortaya koymuşlardır.

Günümüzde beton üretiminin artmasına bağlı olarak agregaya olan ihtiyaç da artmaktadır. Araştırmacılar geri dönüştürülmüş betonlardan elde edilen agregaların yeniden kullanılması üzerinde çalışmalar yürütmüşlerdir. Geri dönüştürülmüş beton agregasının kullanımı, beton üretiminin sürdürülebilir yollarından bir tanesidir. Bununla birlikte, betonda geri dönüştürülmüş agreganın kullanılması, temel olarak düşük dayanıklılık ve yetersiz mekanik performans ile sonuçlanmaktadır. Ashraf vd. (2023) 13 adet numune üzerinde yürütmüş oldukları deneysel çalışmada, geri dönüştürülmüş agregaya ek olarak silis dumanı ve karbon fiber malzemesi kullanarak betonun işlenebilirlik, su emme ve basınç dayanım özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Deneysel sonuçlar, silis dumanının çimento hamurunun mikro yapısını ve bağlayıcılık özelliği ile karbon lifleri

arasındaki bağı geliştirdiğini ortaya koymuştur. Ek olarak silis dumanının geri dönüştürülmüş betonda su emiliminin %14'e kadar azalttığı sonucuna varılmıştır. Eryılmaz K. vd. (2023) yapmış olduğu çalışmada geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların fiziksel özelliklerini ve geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen geopolimer betonun mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan araştırmalar neticesinde aynı tane boyutundaki doğal agregalarla karşılaştırıldığında geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların su emme oranının daha yüksek, Los Angeles aşınma direncinin ise daha düşük olduğu ortaya konurken geopolimer betonun mekanik özelliklerinin geleneksel betonun mekanik özelliklerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Geopolimer agregaların tane yoğunluğu, doğal agreganın tane yoğunluğuna göre düşük olduğu görülmüştür bununla birlikte geopolimer agregaların düşük aşınma direncine sahip olması yüksek aşınmaya maruz kalan uygulamalarda beklenilenden daha kötü sonuç ortaya çıkmasını kolaylaştırmaktadır. Geri dönüştürülmüş geopolimer agregalarla ilgili genel çalışmalar incelendiğinde üretilen geopolimer betonların basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülü; geleneksel betonun basınç ve eğilme dayanımına ve elastisite modülüne göre daha düşük olduğu görülmüştür. Geri dönüştürülmüş agrega miktarında artış oldukça betonun mekanik özelliklerinde bir azalma meydana geldiği ortaya konulmuştur. Ayrıca, agregaya olan ihtiyacın farklı atık malzemeler kullanılması ile giderilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, sinterlenmiş uçucu kül agregası, hurma çekirdeği kabuğu veya Hindistan cevizi kabuğu gibi çeşitli yapay agrega malzemeleri ile ilgili çalışmalar literatürde yer almaktadır. Kumar T. U. vd. (2023) yapmış oldukları deneysel çalışmada sinterlenmiş uçucu kül agregası kullanarak yapısal hafif beton üretiminin fizibilitesini incelemiş ve hafif beton üretmek için iri agreganın yerine kullanacak şekilde sinterlenmiş uçucu kül agregası ve diğer malzemelerin kullanımına ilişkin araştırmalar gerçekleştirmiştir. Literatür incelemesine göre, bu agregalar benzer ağırlıktaki agregalara göre %16-46 daha hafif ve su emme konusunda daha yetenekli olduğu görülmüştür. Sinterlenmiş uçucu kül kullanılarak üretilen beton, güçlü mekanik ve yapısal nitelikler gösterdiği saptanmıştır. Sinterlenmiş uçucu kül agregalı betonun basınç dayanımı 22 ile 43 MPa ve yoğunlukları 1600 ile 2000 kg/m³ arasında olduğu görülmüştür. Bu değerler ışığında uçucu kül agregası kullanılarak yapılan betonun yapısal anlamda iyi sonuçlar ortaya koyabileceği görülmüştür.

Betonda hafif agrega kullanımı, geri dönüştürülmüş agrega kullanımı ve farklı atıkların beton içerisinde geleneksel agrega yerine kullanımının yanı sıra betonların mekanik özelliklerini iyileştirmek için birçok lif ve çeşitli mineraller de katkı olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda araştırılması yapılan malzemelerden bir tanesi de silis dumanıdır. Betona optimum oranda silis dumanı eklemek; hidrasyon ısını düşürmesi, yüksek hedef dayanımı ve düşük permeabilite, alkali silika reaksiyonunu ve sülfat etkisini kontrol altına alması gibi birçok yarar sağladığı bilinmektedir. Buna karşın silis dumanının betonun işlenebilirliğini düşürmesi gibi negatif yönde etkileri de vardır. Betondaki optimum silis dumanı miktarı bu etkilerin değerlerine bağlı olarak belirlenebilir ve çimento, agrega miktarları gibi faktörlerden de etkilenir. Polimer liflerden betona katılan malzemelerden en yaygın olarak kullanılan polipropilen liflerdir. Polipropilen lifler çalışma prensibi olarak betonun içinde üç boyutlu bir mikro donatı ağı oluşturarak, betonda doğal olarak varlığı kabul edilen zayıflıkları azaltıp betonun bazı özelliklerini iyileştirebildiği literatürde birçok araştırmada ortaya konmuştur. Sümer, B. (2013) gerçekleştirmiş oldukları çalışmada endüstriyel bir atık malzeme olan silis dumanının saha betonunda kullanımının beton özellikleri üzerine etkileri incelenmiş ve silis dumanının beton üzerindeki olumsuz etkilerini iyileştirmek için polipropilen lif katılarak beton özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışma kapsamında silis dumanının aşırı ince bir malzeme olmasından dolayı su ihtiyacını arttırdığı görülmüştür. Polipropilen lif kullanımının ise silisli betonlarda işlenebilirliği zorlaştırdığı ortaya konulmuştur. Bu sonuçların yanı sıra silis dumanlı betonlara lif takviyesinin basınç ve eğilme dayanımını arttırdığı saptanmıştır böylece polipropilen liflerin beton üretiminde kullanılmasının uygun olabileceği bu deneysel çalışma ile ortaya konmuştur. Yalciner vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, geo-grid ve geleneksel etriye ile iki farklı sargılama tekniğinin kullanıldığı tam ölçekli betonarme kirişlerin farklı plastik fiber oranlarında eğilme davranışları incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, geleneksel etriye yerine geo-grid sargısı ve farklı oranlarda polipropilen lif kullanılan betonarme kirişlerin nihai yük taşıma kapasitelerinin fiber kullanılmayan numunelere göre daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Bicer vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada 3 farklı oranda polipropilen lif katkısı içeren betonarme kirişler üretilerek hızlandırılmış korozyon yöntemi ile korozyona maruz bırakılmıştır. Deneysel numunelerin korozyon etkisiyle

değişen eğilme kapasiteleri üzerinde yapılan araştırmalarda, polipropilen lif kullanımının korozyona maruz kalan kirişlerin süneklik kapasitelerini iyileştirdiği görülmüştür. Başyigit, C. vd. (2010) yapmış oldukları çalışmada polipropilen lifli yarı hafif betonları üreterek basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Yapılmış olan deneysel çalışmada normal dayanımlı beton ile aynı karışıma çimento ağırlığının %6 oranında polimer ilave edilerek polipropilen lifli yarı hafif beton numuneler üretilmiştir. Numuneler basınç dayanımı deneyi yapılarak numunelerin 7 ile 28 günlük dayanımları değerlendirilmiştir. Polimer katkıların ilave edilmesi taze haldeki betonun işlenebilirliğini büyük ölçüde etkilemektedir. Normal betonda basınç dayanımı deneyinde betonda kırılmalar ve parçalanmalar görülmekte iken polimer katkılı betonların basınç dayanımı deneyinde ise çatlaklar meydana gelmiştir. Çatlaklar meydana gelmesine rağmen halen yük taşımaya devam ettiği gözlenmiştir. Bölükbaş, Y. (2011) yapmış olduğu çalışmada; farklı su/çimento oranlarında sırasıyla 0.45, 0.50 ve 0.55 olan 300, 350 ve 400 dozlu ve 5, 10, 15, 20 kg/m³ oranlarında cam elyaf içeren beton numunelerin porozite, kapiler su emme katsayısı, ultra ses geçiş hızı gibi parametreleri tarafından incelemelere tabi tutmuştur. Ayrıca basınç ve yarmada çekme dayanımları test edilmiştir. Çalışma sonucunda, cam lif içeriğinin artması ile porozite değerinde ve kapiler su emme katsayısında artış olduğu görülmüş, bununla birlikte ultra ses geçiş hızlarında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca numunelerin basınç dayanımları düşük lif oranlarında az artışlar göstermiş olmasına rağmen lif oranı arttığında basınç dayanımında düşüşler yaşanmıştır. Benzer şekilde yarmada çekme dayanımları düşük cam lif oranlarında artış göstermiştir ancak 20 kg/m³ cam lif içeren numunelerde yarmada çekme dayanımlarında azalma meydana geldiği görülmüştür. Demirel, B. (2007) gerçekleştirmiş oldukları bu çalışmada, betonda mineral katkı olarak kullanılan silis dumanının karbon fiber içerikli hafif betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışma kapsamında, silis dumanı, CEM I 42,5 portland çimento, bazik karakterli pomza agregası ve karbon fiber ile birlikte hafif beton numuneler üretilmiştir. Çalışma için, silis duman içermeyen hafif beton, silis dumansız karbon fiberli hafif beton, silis duman içeren hafif beton ve silis dumanlı fiberli hafif beton olmak üzere 4 seri numune hazırlanmıştır. Gereken serilere, çimento ağırlığının %10'u kadar silis dumanı; yine çimento ağırlığının %0,5'i kadar da karbon fiber ilave edilmiştir. Numunelere eğilmede çekme deneyi uygulanmış ve hem karbon fiberin hem de silis dumanının hafif betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri

belirlenmiştir. Karbon fiber ilavesi, silis dumansız numunelerde eğilmede çekme dayanımını %21,91 arttırırken; silis dumanı içeren numunelerde ise %32,07 arttırmıştır. Silis dumanı açısından incelendiğinde ise, silis dumanı ilavesinin fiber katkılı numunelerde basınç dayanımını %31,12 arttırdığı görülürken eğilmede çekme dayanımını %23,14 arttırdığı görülmüştür. Sonuçta, fiberli serilerde, silis dumanı ilavesiyle eğilmede çekme dayanımında meydana gelen yüzdece artışın, basınç dayanımında meydana gelen yüzdece artıştan daha az olduğu ortaya konulmuştur. Beton teknolojileri kapsamında betona eklenen maddelerden birisi de cam lif olup bu şekilde üretilen betonlar cam lif takviyeli beton olarak adlandırılmaktadır. Beton içerisine cam lif katkısı yapılarak betonun yangın, basınç ve çekme dayanımında artışlar gösterdiği gözlenmiştir. Aslan, S. (2020) yapmış olduğu çalışmada farklı miktarlarda cam lifler takviye edilmiş ve sabit su/çimento yüzdesiyle üretilen beton numunelerinin, cam lifi takviye edilmemiş betonlara oranla basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Beton içerisine katılan cam lifi miktarıyla bağlantılı olarak, betonun basınç ve çekme dayanımında farklılıklar ortaya çıktığı görülmüştür.

Hafif geleneksel agregaların ve alternatif atık malzemelerin beton içerisinde kullanılmasının yanı sıra geleneksel agregaya göre daha düşük birim hacim ağırlığa sahip olan perlit madeninin beton içerisinde kullanılmasının mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Perlit, ısıyla genleşme özelliği barındıran, geliştirildiğinde camsı tanelerden oluşan geliştirilmiş perlit agregasına dönüşen ve ilk hacminin 20 katına kadar genleşebilen bir kayadır. Beton üretiminde hafif ve gözenekli yapıya sahip agregaların kullanılmasıyla, hafif betonlar üretilebilmektedir. Genleştirilmiş perlitin hafif agrega şeklinde kullanılarak üretilen betonlar hafif özelliklerinden dolayı mevcut betonun ölü yüklerini azaltmakta ve betona oldukça iyi ısı ve ses yalıtımı özelliği katmaktadır. Bulgurcu vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada beton içerisinde %10' dan %80' e kadar değişen oranlarda genleştirilmiş perlit kullanılmıştır. Beton içerisinde perlit oranının artmasıyla birlikte betonun ısı iletkenlik değerinin azaldığı sonucuna varılarak perlit kullanımı ile betonun termal özellik performansının artacağı belirtilmiştir. Bulgurcu vd. (2009) çalışmasında elde etmiş olduğu perlit kullanımı ile yapı ölü yükünün azalması durumu Yaşar vd. (2003) tarafından elde edilen sonuçlar ile de paralellik göstermektedir. Genleştirilmiş perlit agregası kullanarak yapısal hafif beton üzerinde gerçekleştirilen bir diğer çalışma ise İbrahim vd. (2020) tarafından yürütülmüştür. Bu

çalışmada klorür etkisine maruz bırakılan numunelerde su/çimento oranı 0.25 ile sınırlandırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda perlit agregalı betonun geleneksel betona göre; birim hacim ağırlığının %20 ila %30 oranında azaldığı ve ısı yalıtımı açısından daha iyi bir performans gösterdiği belirtilmiştir. Demirboğa vd. (2002) tarafından yürütülen çalışmada %30 uçucu kül ve %70 çimento ile üretilen beton numunelerde pomza yerine geliştirilmiş perlit agregası kullanıldığında sertleşmiş beton numunelerinin ısı iletkenliğinin daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Chihaoui vd. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada aynı dane çapına sahip %0, %10 ve %20 oranlarında doğal puzolan ve doğal perlit kullanarak üretilmiş olan beton numunelerin alkali silika reaksiyonu riskine maruz kalması durumunda meydana gelecek değişimlerin betona etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak alkali silika reaksiyonu etkisine maruz kalan doğal perlit ile üretilen numunelerin doğal puzolan ile üretilen numunelere göre karşı daha dirençli olduğunu sonucuna varılmıştır. Farklı oranlarda doğal perlit kullanılması ile elde edilen beton ile geleneksel agregası kullanılarak üretilen betonun beton basınç dayanımlarının incelenmesi amacıyla Ragul vd. (2022) tarafından deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda beton üretiminde ince agregası yerine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında doğal perlit agregası kullanılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında beton karışımında %15 sınır değere kadar ince agregası yerine kullanılacak doğal perlit agregasının betonun basınç dayanımını artırdığı, %15'ten fazla bir değişimin ise beton basınç dayanımında %13'e kadar azalma meydana getirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Azizi vd. (2007) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada farklı oranlarda geliştirilmiş perlit kullanarak üretilen hafif betonların, basınç dayanımları, elastisite modülleri, ısı iletkenliği, su emme oranları ve kılcallık katsayıları ile birim ağırlıkları arasındaki ilişki ortaya konulmuştur. Deneysel çalışmada taze beton birim ağırlıkları 700-2000 kg/m³ arasında değişen toplam 6 seri hafif beton üretilmiştir. Üretilen tüm hafif betonların etkin su/çimento oranı 0,55 olarak belirlenmiştir. Hafif beton karışımları, toplam agregası hacminin sırasıyla %0, %20, %40, %60, %80, %100 oranında genişletilmiş perlit ve toplam agregası hacminin sırasıyla %100, %80, %60, %40, %20, %0 oranında kum kullanılarak üretilmiştir. Tüm hafif beton karışımlarına çimento ağırlığının yaklaşık %0,3'ü oranında hava sürükleyici katkı maddesi eklenmiştir. Ayrıca, istenilen kıvamın sağlanabilmesi amacıyla %0 ve %20 oranlarında geliştirilmiş perlit içeren karışımlarda çimento ağırlığının %15 ve %40 perlit içeren karışımda ise çimento

ağırlığının %0,5 oranında akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Hafif betonlara yapılan deneyler sonucunda, beton karışımlarındaki genleştirilmiş perlit miktarı arttıkça, işlenebilirliğin arttığı saptanmıştır. Ayrıca betonların içindeki genleştirilmiş perlit miktarı arttıkça su emme oranları ve kılcalık katsayıları da artmaktadır. Bu çalışmada deneyleri gerçekleştirilen hafif beton karışımları için, ulaşılan sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde tüm perlit katkılı hafif beton bileşimlerinin normal betonlara kıyasla yüksek ısı yalıtımı sağladığı, hacimce toplam agreganın, %40 ve %60'ı oranında genleştirilmiş perlit içeren hafif betonların yapısal/yalıtım beton türüne girdiği, %80'i oranında genleştirilmiş perlit içeren hafif betonların ise yalıtım betonu türüne girdiği ve bu amaçlı kullanım için uygun olduğu ortaya konulmuştur. Pramusanto P. vd. (2020) yapmış oldukları bu çalışmada, agregası olarak her hacmi %50 genleşebilen perlit ile birleştirilmiş doğal kum ve %100 genleşebilen perlit ile hafif betonlar yapılmıştır. Agregaların hacmi %80'den %89'a kadar değişmiştir. Betonların yoğunlukları ölçülmüş ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak, genleştirilmiş perlitin beton yoğunluğunu azaltma etkisi olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, genleştirilmiş perlit agregası arttıkça dayanım azaldığı ortaya konmuştur. Beton agregası olarak genleştirilmiş perlitin beton yoğunluğunu azaltma etkisi vardır. Genleştirilmiş perlitin gözenekli yapısı da betonun yüksek su emme özelliğine katkıda bulunmuştur. Ancak agregası olarak genleştirilmiş perlitin eklenmesi betonun basınç dayanımını düşürmüştür. Sharma B. (2022) yapmış oldukları bu çalışmada ince agregaları genleştirilmiş perlit ve pomza ile değiştirilerek hafif beton üretmişlerdir. Hafif beton geliştirmek için genleştirilmiş perlit ve pomzanın etkisi araştırılmıştır. İlk hafif beton numuneler, ince agregaların değişen oranlarda %0, %25, %50 ve %100 genleştirilmiş perlit ile değiştirilmesiyle oluşturulmuştur. İkinci oluşturulan karışım oranı ise, doğal kumun eşit oranda ikili parçacıklarla (genleştirilmiş perlit ve pomza) değiştirilmesinin etkisini incelemek için hazırlanmıştır. Her iki hafif beton karışımının mekanik ve dayanıklılık özellikleri geleneksel karışımla karşılaştırılmıştır. Genleştirilmiş perlitin dahil edilmesi, geliştirilen hafif betonun yoğunluğunu düşürmüştür. Bununla birlikte, genleştirilmiş perlit ve pomza kullanılarak hazırlanan karışımın yoğunluğu, yalnızca hafif beton içeren genleştirilmiş perlitin yoğunluğundan biraz daha yüksek olduğu görülmüştür. Hafif betona pomzanın dahil edilmesi, pozolanik reaktivite oluşturmada ve hafif beton içerikli genleştirilmiş perlitten daha iyi mukavemet ve dayanıklılık özellikleri göstermesine yol açmıştır. Ayrıca, mikro yapı özellikleri,

gözenekli hafif malzemenin varlığının, geleneksel betona kıyasla mekanik özelliklerde bir iyileştirme ortaya çıkarmadığı görülmüştür. Kadela M. vd. (2023) gerçekleştirmiş oldukları bu çalışmada beton numuneleri çimento, su, hafif perlit agregaları ve çelik lifler kullanarak üretilmiştir. İki farklı çelik lifi ilavesi (betonun ağırlığına göre sırasıyla %1,3 ve %2,6) kullanılmıştır. Çelik elyaf ilaveli perlit agregalı hafif beton numuneleri, basınç (%18-48), çekme (%25-52) ve eğilme mukavemetinde (%26-41) önemli bir artış göstermiştir. Ayrıca, çelik liflerinin beton içerisine dahil edilmesinden sonra daha yüksek termal iletkenlik gösterdiği görülmüştür; ancak bu modifikasyonlardan sonra özgül ısı değerleri düştüğü gözlemlenmiştir. Bu nedenle, hafif ve enerji verimli beton yapıların üretimi için sürdürülebilir bir seçenek olarak perlit alternatif olarak gösterilebilmektedir.

Mevcut literatür incelendiğinde betona pozitif etki kazandırmak veya mevcut özelliği iyileştirmek amacıyla çeşitli atık ve katkı malzemeleri kullanıldığı görülmektedir. Betonda kullanılan bu atık malzemelerin kullanımına yönelik birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen uygulama olarak betonarme elemanlar üzerinde yapılan çalışmalar oldukça sınırlı olduğu, yapılan birçok araştırmanın ise beton içerisinde kullanılan katkı veya atık malzemenin belirli oranlarda kullanılarak oluşturulduğu görülmüştür. Literatüre bakıldığı zaman betonda bulunan agreganın tamamının yerine doğal ham perlit agregası kullanılarak üretilen tam ölçekli betonarme kolonlar üzerinde bugüne kadar herhangi bir deneysel çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada geleneksel beton agregası tamamen kaldırılarak yerine doğal ham perlit agregası kullanılarak üretilen betonarme kolonlar üzerinde yapısal davranışlarını incelemek için deneysel çalışma yapılmıştır. Geleneksel ve perlitli betonarme kolonlar aynı basınç dayanımı ve aynı kesit özelliklerine sahip şekilde üretilmişlerdir. Özdeş üretilen betonarme kolonların yapısal davranışları karşılaştırılmıştır.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Betonarme ve kolon davranışı

Betonarme, beton ve donatının kendi güçlü yönlerini kullanarak bir diğerinin daha güçsüz yönünü gidermesiyle birbirleri ile uyum içerisinde bu iki bileşenin birlikte çalışması olarak tanımlayabiliriz. Beton yüksek basınç dayanımına sahip olmasına karşın çekme dayanımı açısından zayıftır. İşte betonarme dediğimiz elemanı betonarme yapan özellik ise yüksek çekme dayanımına sahip olan çelik çubukların betonun bu zayıf tarafını kapatarak beraber sağlıklı bir yapı oluşturmalarıdır. Bu şekilde mekanik özellik olarak güçlü bir yapı ortaya koyulabilmektedir.

Eksenel kuvvet ve eğilme momenti taşıyan elemanlardan birisi de kolonlardır. Betonarme içerisinde kolonlar görev esası olarak yapılarda, gelen yüklerin temel sistemine güvenli bir şekilde aktarılmasını sağlamaktadırlar. Basit olarak konut bir betonarme yapı örnek gösterilecek olursa mevcut döşeme ve çatı sisteminden gelen yükler önce kirişlere ardından kirişler kendi ölü yük ağırlıklarıyla birlikte üstüne gelen taşımış olduğu diğer yükleri kolonlar vasıtasıyla temel sistemine, temeldeki yükler de bu yükleri zemine iletilmektedir. Kolonların sağlamış olduğu bu statik göreviyle beraber yapıya gelen deprem ve rüzgar gibi yatay yüklerin karşılanmasını da sağlamaktadır.

Kolonlar eğilme momenti ve eksenel yük etkisi altında kalan elemanlardır. Kolon elemanın görevi; yatay kuvvetlerin oluşturduğu kesme kuvveti, burulma, rötre ve moment gibi oluşacak etkileri güvenli bir şekilde temel sistemine iletmektir (Köken, 1997). Kolonlar sadece betondan oluşan elemanlar değildir. Betonun zayıf olan çekme dayanımını karşılamak için, eğilme etkilerini karşılamak, zamanla oluşacak olan deformasyon ve oturmalar göz önüne alınarak kolonlara donatı çubukları konulmaktadır. Kolon davranış ve performansını anlamak için temelde 3 ifade yer almaktadır. Bu ifadeler aynı şekilde yapının genel olarak tamamı olarak da davranışını ifade etmek için kullanılmaktadır. Süneklik, rijitlik ve dayanım olarak tanımlanabilir.

3.2. Plastik Mafsal ve Plastikleşme

Bir yapı sistemine bir deprem durumunda mevcut yapıda hasarın en az şekilde olabilmesi tasarım aşamasının temel amaçlarındandır. Bundan dolayı sistemin kontrollü biçimde hasarı alması istenmektedir. Hasar boyutunun doğru şekilde öngörebilmek için yapısal elemanların elastik ötesi davranışının hakim bir şekilde bilinmesi gerekmektedir. Bu sebepten dolayı plastikleşme ve plastik mafsal üzerindeki durulması gereken önemli konulardandır. Genel olarak yapı sisteminde görülen hasar, sistemi meydana getiren yapısal elemanlarda oluşmuş olan hasarın büyüklük ve tipine göre değerlendirilmektedir. Taşıyıcı yapısal elemanlarda meydana gelen bu hasarlar yapı sisteminde kat ötelenmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Kat ötelenmelerinin büyük bir kısmı, yapısal elemanlarda plastik mafsal olarak adlandırılan kısımlarında meydana gelen dönme ve eğrilikten meydana gelmektedir. Bu nedenden dolayı yapısal taşıyıcı sistemin doğrusal-elastik olmayan yöntemlerle çözümlenmesi yapısal sistem hakkında daha doğru ve kesin sonuçlar elde edilmesine olanak oluşturmaktadır.

3.3. Rijitlik

Rijitlik, bir yapı malzemesinin veya yapı sistemlerinin dış kuvvetlere karşı direnç gösterme yeteneğidir. Yani, bir malzemenin veya yapı sisteminin, belirli bir yük altında deforme olmadan sabit kalmayı sürdürebilmesidir. Bu özellik, yapıların sağlamlığı ve dayanıklılığı için çok önemlidir. Çünkü yapılar, kullanım amacına göre belirli bir yük altında dayanıklı olmalıdırlar. Rijitlik, yapı malzemeleri ve sistemleri için farklı şekillerde ifade edilebilir. Örneğin, betonarme yapılar için rijitlik, betonun kendisiyle birlikte kullanılan donatının çekme dayanımı tarafından sağlanır. Bu donatı, betonun dayanımını artırarak yapıya ekstra dayanıklılık ve güç sağlar. Bu sayede, betonarme yapılar yüksek dayanıklılık gerektiren yapılarda kullanılmaktadır.

Malzeme özellikleri ve eleman ölçüleri rijitliği etkilemektedir. Eleman rijitliği, yapının tümü için hesaplanmış olan davranış ve performansını kontrol etmemizi sağlayan parametrelerden bir tanesidir. Eleman rijitliğinin doğru hesaplanması bu bakımdan önemlidir. Örneğin gerçek etkisinden fazla olarak hesaplanmış olan rijitlik etkisi hesaplanacak kesme yükünün yanlış olarak hesaplanmasına dolayısıyla depremin yapıda oluşturacağı etkinin artmasına sebebiyet verecektir. Aynı şekilde gerçek etkisinden az

olarak yanlış hesaplanan bir rijitlik etkisi ise deprem etkisi halinde hesaplamadan beklenen orandan çok daha fazla bir ötelenme talebi ile karşılaşacak ve deprem etkisini istenildiği gibi karşılayamayacaktır.

Rijitlik, yapıların dayanıklılığına etki eden bir faktör olduğundan, yapıların tasarımı ve inşaatı sırasında dikkate alınması gereken önemli bir unsurdur. Bu nedenle, yapıların rijitliği, yapı mühendisleri ve tasarımcıları tarafından özenle incelenmekte ve belirlenmektedir.

3.4. Süneklik

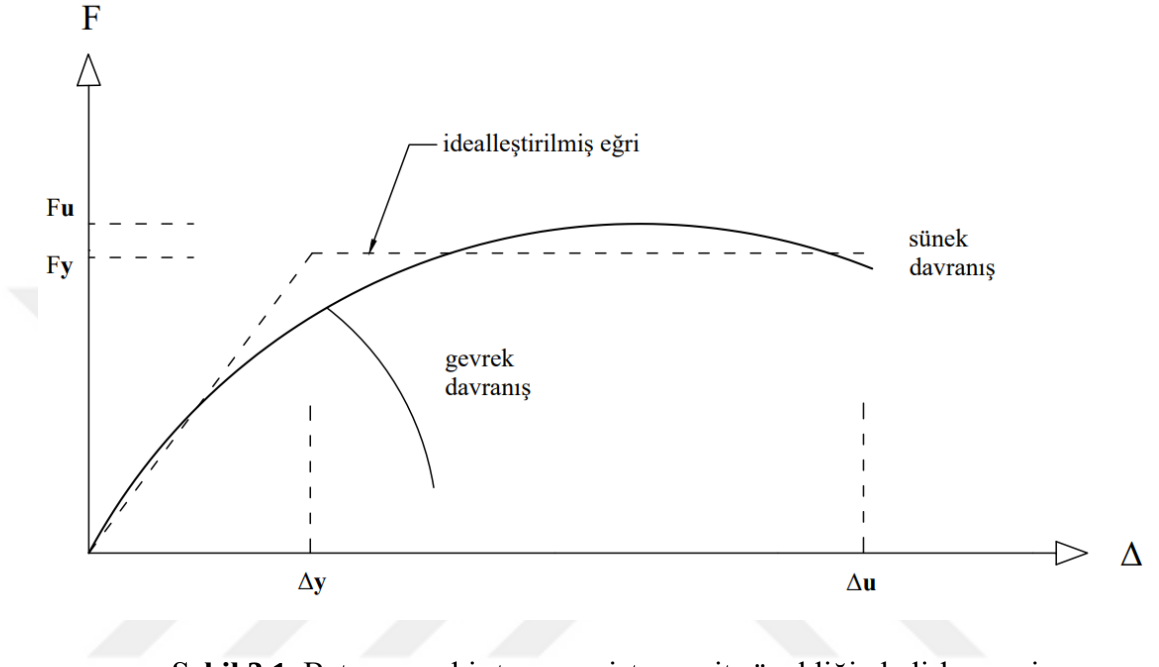
Süneklik, bir yapı malzemesinin veya yapı sisteminin yük altında deformasyona uğraması halinde, bu deformasyonun yapısal bütünlüğü bozmadan geri kazanılabilme yeteneğidir. Bu özellik, yapıların dayanıklılığı, güvenliği ve insan hayatını koruma açısından son derece önemlidir. Süneklik, yapıların, deprem veya rüzgar gibi yüksek kuvvetler altında deforme olma ihtimali olduğunda, yapısal hasarın azaltılmasına veya en aza indirilmesine yardımcı olur. Bu sayede, yapılar daha dayanıklı ve güvenli hale gelirler.

Süneklik, genellikle yapıların esnekliği ve deformasyon kabiliyetiyle ilişkilendirilir. Yapı malzemeleri ve sistemleri için farklı süneklik seviyeleri bulunmaktadır. Örneğin, betonarme yapılar genellikle daha az sünek olabilirken, çelik yapılar daha fazla sünek olabilirler. Bu farklılık, malzeme özellikleri, yapı geometrisi, yükseklik, ağırlık, yerel iklim koşulları ve bölgenin deprem riski gibi faktörlere bağlıdır.

Süneklik, yapı mühendisleri ve tasarımcıları tarafından, yapıların tasarımı ve inşaatı sırasında hesaba katılması gereken önemli bir faktördür. Yapıların sünekliği, doğal afetlerde insan hayatını korumak, yapıların hasarını azaltmak ve ekonomik kayıpları önlemek açısından son derece önemlidir.

Sünekliği tek bir parametre ile ifade edebilmek zordur çünkü her bir sistem veya eleman için kendi içinde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda malzeme bazında süneklik, kesit bazında süneklik, eleman bazında süneklik, taşıyıcı sistem bazında süneklik, enerji bazlı süneklik gibi başlıklar altında süneklik kavramı incelenebilmektedir.

Kolonlar için eleman bazında süneklik incelendiğinde eleman sünekliği yük-yerdeğiştirme ilişkisi ile ifade edilmektedir. Bu durumda tanımlanan süneklik oranına ötelenme süneklik katsayısı (oranı) adı verilebilmektedir. Betonarme taşıyıcı bir sistemin süneklik davranışının gösterimi Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Betonarme bir taşıyıcı sisteme ait sünekliğin belirlenmesi

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (3.1)$$

Sonuç olarak, süneklik, yapıların dayanıklılığı ve insan hayatını koruma açısından son derece önemli bir özelliktir. Bu nedenle, yapıların tasarımı ve inşaatı sırasında, süneklik özelliklerinin incelenmesi ve uygun önlemlerin alınması gerekmektedir.

3.5. Yük-deplasman ilişkisi

Yük-deplasman ilişkisi, bir yapı malzemesinin veya yapı sisteminin, bir yüke maruz kaldığında ne kadar deforme olacağını veya ne kadar yer değiştireceğini ifade eden matematiksel bir fonksiyondur. Bu ilişki, yapı mühendisleri ve tasarımcıları tarafından, yapıların dayanıklılığı ve güvenliği için önemli bir faktör olarak kullanılır.

Yük-deplasman ilişkisi, bir malzemenin veya yapı sisteminin yüksekliği, ağırlığı, geometrisi, malzeme özellikleri ve bağlantı yöntemleri gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Bu ilişki, çoğu zaman lineer veya doğrusal olmayan bir fonksiyon olarak ifade edilir.

Lineer bir yük-deplasman ilişkisi, malzemenin veya yapı sisteminin yüke bağlı olarak doğrusal bir şekilde deforme olacağını gösterir. Bu durum, malzeme veya yapı sistemi doğru bir şekilde boyutlandırıldığında, öngörülebilir bir şekilde davranacakları anlamına gelir. Doğrusal olmayan bir yük-deplasman ilişkisi, yüke bağlı olarak malzemenin veya yapı sisteminin daha karmaşık bir şekilde deforme olacağını gösterir. Bu durum, yapıların doğru bir şekilde tasarlanması ve boyutlandırılması için daha fazla analiz ve hesaplama gerektirir.

Yük-deplasman ilişkisi, yapıların dayanıklılığı ve güvenliği için önemli bir faktör olduğundan, yapı mühendisleri ve tasarımcıları tarafından özenle incelenir. Bu ilişkinin doğru bir şekilde anlaşılması, yapıların doğru bir şekilde tasarlanması ve inşa edilmesi için kritik önem taşır.

3.6. Enerji yutma kapasitesi

Enerji yutma kapasitesi, bir yapı veya yapı elemanının, üzerine etki eden dış yüklerin neden olduğu enerjiyi ne kadar absorbe edebileceğini ifade eden bir ölçüdür. Bu kavram, yapı mühendisliği ve tasarımında önemli bir faktördür, çünkü yapıların güvenliği ve dayanıklılığı, üzerlerine etki eden yüklerin neden olduğu enerjinin ne kadar etkili bir şekilde emilebildiği ile yakından ilişkilidir.

Enerji yutma kapasitesi, bir yapı veya yapı elemanının şekil değiştirme özellikleri, malzeme özellikleri ve geometrisi gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Örneğin, bir malzeme veya yapı elemanı, üzerine etki eden dış yüklerin neden olduğu deformasyonun büyüklüğü arttıkça, daha fazla enerji absorbe edecektir.

Enerji yutma kapasitesi, bir yapı veya yapı elemanının performansını değerlendirmek için kullanılan bir ölçüdür. Yüksek enerji yutma kapasitesi, bir yapı veya yapı elemanının daha dayanıklı ve güvenli olduğunu gösterir. Özellikle, doğal afetler, yangınlar,

Çarpışmalar gibi acil durumlar için yapılan tasarımlarda enerji yutma kapasitesi, yapıların tahribata dayanıklı olmasını sağlayabilir.

Enerji yutma kapasitesi, yapı mühendisleri ve tasarımcıları tarafından, yapıların doğru bir şekilde boyutlandırılması ve dayanıklılığı için önemli bir faktör olarak dikkate alınır. Yüksek enerji yutma kapasiteli yapı elemanları, yüksek hasar toleransı, düşük bakım maliyetleri, ve uzun ömür özellikleri sağlayarak yapıların daha sürdürülebilir olmasını sağlar.

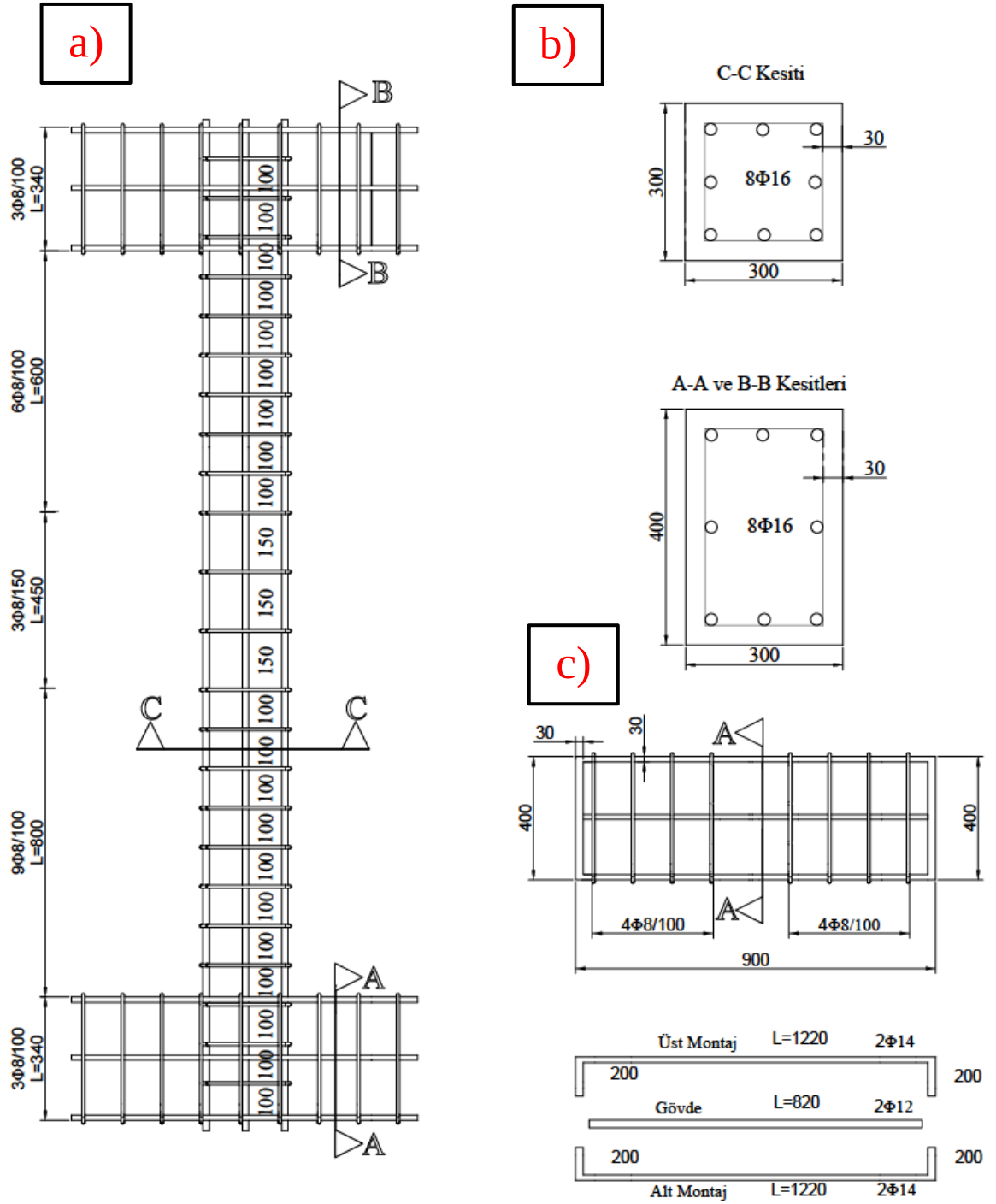
4. MATERYAL ve YÖNTEM

Gerçekleştirilen tez çalışmasının bu bölümünde deneysel çalışmada üretilmiş olan betonarme kolon numunelerinin malzeme-kesit özellikleri, uygulanacak tersinir tekrarlanır yanal yükleme deney ve ölçüm düzenekleri detaylarıyla birlikte açıklanmıştır. Çalışma kapsamında geleneksel ve perlit agregası kullanarak 1'er adet C20 ve C40 MPa beton basınç dayanımına sahip tam ölçekli betonarme kolon numuneleri üretilmiştir. Geleneksel ve perlit agregası kullanılarak üretilen betonarme kolon numuneleri 20 ve 40 MPa beton basınç dayanımlarına göre sırasıyla C20, C40 ve P20, P40 şeklinde isimlendirilmiştir.

4.1. Materyal

4.1.1. Malzeme ve kesit  zellikleri

Geleneksel ve perlitli agrega kullanılan betonarme kolon numuneleri özdeş malzeme ve kesit özelliklerine sahip olarak üretilmiştir. Üretilmiş olan betonarme kolon numunelerinde 8 adet 16 mm çapında boyuna nervürlü donatı kullanılmıştır. Sargı donatıları 8 mm çapında olup TS500 (TS500, 2000) minimum etriye aralığı göz önünde bulundurularak 100 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. şekil 4.1'de kolon ve kaide, kiriş kesit özellikleri gösterilmiştir.

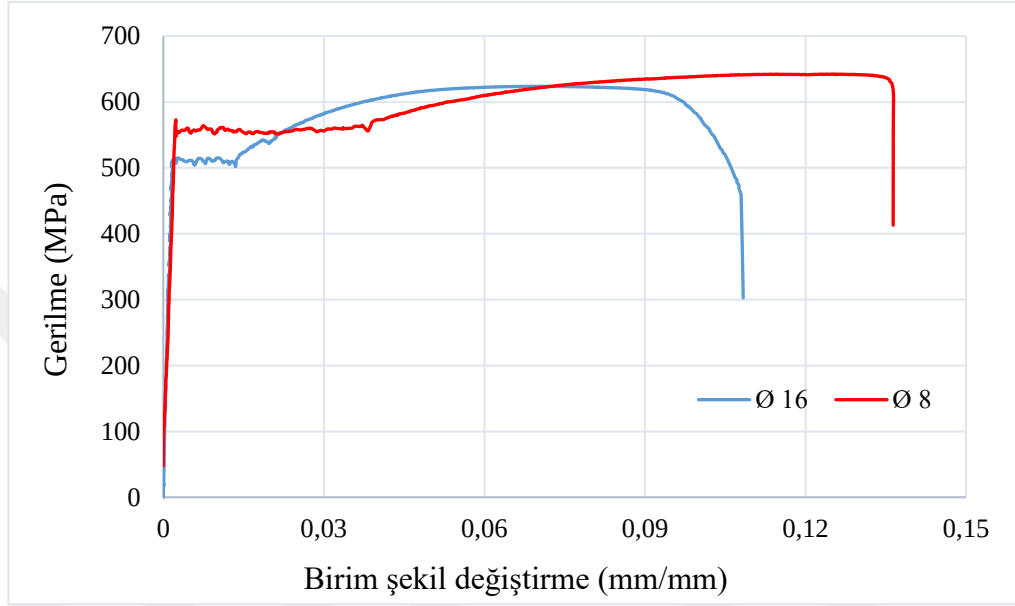


Şekil 4.1. Betonarme kolon kesit özellikleri: **(a)** kolon kesit özellikleri, **(b)** kesit açılım detayları, **(c)** kiriş ve temel kesit özellikleri

4.1.1.1. Donatı mekanik özellikleri

Tez çalışması kapsamında betonarme kolonların üretiminde kullanılan donatıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yükleme deneylerinden önce ASTM A370 (ASTM 2008) standartlarına uygun olarak donatı çekme deneyi gerçekleştirilerek donatıların mekanik özellikleri elde edilmiştir. Donatıların elde edilen mekanik özellikleri

8 mm çapındaki donatı için; akma dayanımı 548 MPa, ekme dayanımı 642 MPa olarak bulunmuştur. 16 mm çapındaki donatılar için ise akma dayanımı 492 MPa bulunurken çekme dayanımı 585 MPa olarak elde edilmiştir bu değerler Tablo 4.1’de detaylı olarak gösterilmiştir. Bu donatılar için elde edilen gerilme- gerinim grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Donatılara ait gerilme-birim Şekil değiştirme eğrileri

Tablo 4.1. Donatı mekanik zellikleri

Donatı	Akma Dayanımı (MPa)	ekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (mm/mm)	Elastisite Modülü (MPa)
Ø8	548	642	0,13	242228
Ø16	492	585	0,11	194475

4.1.2. n deney çalışmaları

n deney çalışmaları için dane boyutları karıŐık Şekilde ham perlit agregası temin edilmiştir. Karışım hesaplarında olası hataların önüne geçilmesi için temin edilen perlit agregaları Şekil 4.3’de gösterildiği üzere 1 ay süreyle üniform bir Şekilde kurumaya bırakılmıştır.



Şekil 4.3. Kuruması için serimi yapılmış perlit agregası

Tasarım hesaplarında kullanılacak perlit agregasının granülometri çalışmalarının gerçekleştirilmesi amacıyla yapılan literatür araştırmasından elde edilen veriler ışığında perlit agregası için kullanılacak dane boyut çapları 0-1 mm, 1-2 mm, 2-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm belirlenmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen olan elek analizi çalışması Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Perlit agregası eleme düzeneği

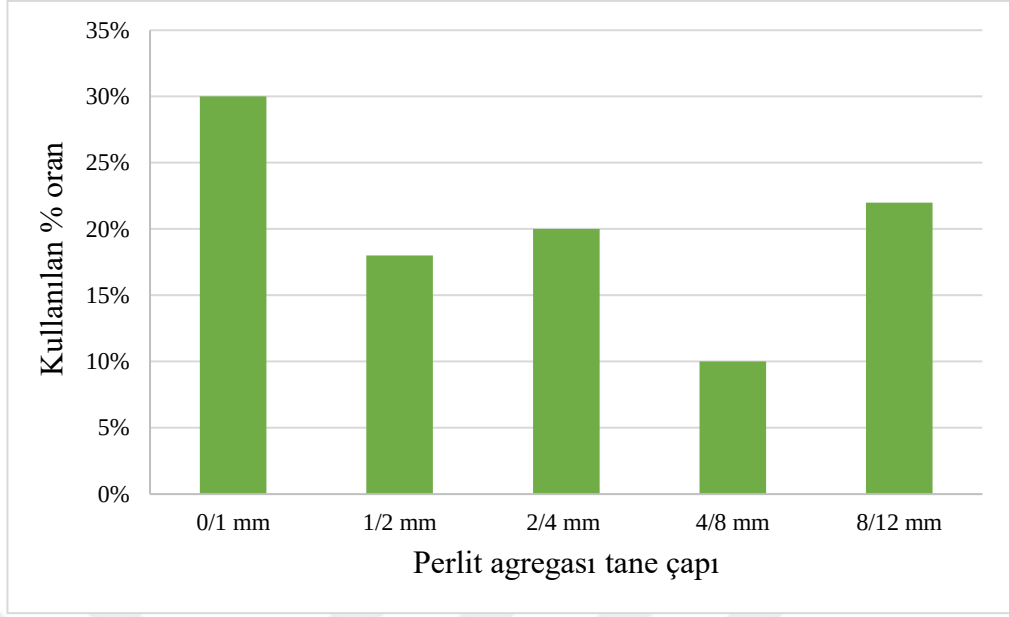
Granülometri dağılımına ek olarak geleneksel ve ham perlit agregasının malzeme mekanik özelliklerinin belirlenmesi de beton karışım hesaplarında etkin rol

oynamaktadır. Belirtilen doğrultuda beton üretiminde kullanılacak olan agregalar için özgül ağırlık deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılmış olan özgül ağırlık deneyleri kapsamında su içerisinde bekletilen perlit malzemesi Şekil 4.5’de gösterilmektedir. Deneyler sonucunda, geleneksel agregalardan ince agreganın $1,96 \text{ kg/dm}^3$ iri agreganın $2,07 \text{ kg/dm}^3$ ve perlit agregasının ise $1,26 \text{ kg/dm}^3$ özgül ağırlık değerlerine sahip olduğu saptanmıştır.



Şekil 4.5. Suda bekletilen perlit agregası

Perlit agregaları üzerinde gerçekleştirilen granülometri çalışmaları sonucunda agregalar 0-1 mm, 1-2 mm, 2-4 mm, 4-8 mm ve 8-12 mm olacak şekilde dane sınıflarına ayrılmıştır. Yapılan karışım hesapları sonucunda farklı çaptaki bu agregaların kullanım oranları sırasıyla %30, %18, %20, %10 ve %22 şeklindedir. Beton karışımında kullanılan perlit agregasının dane boyutuna göre kullanım oranları Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Perlit agregası dağılım oranları

Ön deneysel çalışmalarda ince agreganın iri agregaya göre daha geç kuruduğu gözlemlenmiştir. Bu bağlamda buna uygun olacak biçimde nem yüzdeleri tayin edilmiş; ince agregalar için nem yüzdesi -%5, iri agregalar içinse -%4 olacak şekilde deneylere devam edilmiş, nihai olarak kesin değerler; 0-1 mm ve 1-2 mm tane sınıfları için -%3, 2-4 mm tane sınıfı için yapılan gözlemlere dayanarak su yüzde değerleri farklı olarak belirlenmiş olup -%3.5 ve 4-8 mm ile 8-12 mm tane sınıflarında da -%3 olacak şekilde netleştirilmiştir. Şekil 4.7’ de kurumaya bırakılan perlit agregaları gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Islatılmış şekilde kuruması beklenen perlit agregası

Deneyler öncesi beton karışım hesabı oluşturulurken perlit karışımı için sırasıyla C20 ve C40 numuneleri için su/çimento oranı 0,55 ve 0,62 olarak seçilmiştir.

Detaylı yapılmış olan literatür araştırmalarından elde edilen veriler ışığında 20 MPa ve 40 MPa beton karışım hesabı bulunabilmesi için birçok farklı s/ç oranına sahip reçete oluşturularak ön deney çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 4.8. Ayrı tane boyutlarına ayrılmış perlit agregası

Beton dökümlerinde mikserle önce iri ve ince agregalar, ardından karışım suyunun yarısı ilave edilerek 3 dakika karıştırılmıştır. Ön karıştırma işlemi devam ederken karışıma çimento ilave edilerek ve 1 dakika daha karıştırılmıştır. Tüm bileşenler birlikte 2 dakika süresince daha karıştırıldıktan sonra beton mikseri durdurulmuştur. Karıştırma işleminin ardından beton basınç dayanımının belirlenmesi amacıyla önceden yağlanmış kalıplara beton numuneleri yerleştirilmiştir. Şekil 4.9’ da ön deney çalışmaları kapsamında yapılan deney aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Ön deney numune beton döküm çalışmaları

Bu işlem yapılırken 25'er kez şişleme çubuğu ile sıkıştırma yapılmış ve üretimi yapılan betonlar 24 saat kalıpta bekletilmiştir. Beton dökümü öncesi kalıp yağı ile yağlanmış olan 100 x 200 mm boyutunda olan silindir numuneler Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Deney numunelerinin uygun şekilde sıkıştırma işleminin yapılması

Her bir hedef basınç dayanımına ait olarak dökülen beton reçetelerine ait silindir numuneler her reçeteden 6 adet şekilde dökülerek ön deney aşamasına tabi tutulmuştur. Alınmış olan silindir numune kalıpları Şekil 4.11'de gösterildiği üzere uygun sıcaklık koşullarında 24 saat kalıp içerisinde bekletilmiştir.



Şekil 4.11. Beton dökümü sonrası 7 ve 28 gün için alınmış olan silindir numuneler

Dökümü gerçekleştirilmiş olan deney numuneleri 7 gün ve 28 gün sonuçları incelenmek üzere deney gününe kadar kür havuzunda standartlara uygun bir şekilde suda bekletilmiştir.



Şekil 4.12. Ön deney çalışmaları için dökülmüş olan beton silindir numuneleri

Yapılmış olan ön deneyler neticesinde C20 perlit ve geleneksel için, C40 perlit ve geleneksel beton için reçeteler elde edilmiştir. Elde edilmiş olan reçeteler C20 perlit, C40 perlit, C20 geleneksel ve C40 geleneksel için sırasıyla Tablo 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.2. C20 Perlit silindir numunelere ait beton basınç dayanımları

C20 Perlit Küp Numune İçeriği			
Bileşen Adı	Ağırlık (kg)	Su/Çimento Oranı	28 Günlük Basınç Dayanımı
Çimento (32,5)	560,00	0,64	fck = 23 MPa
Su	350,47		
0/1 mm (%30)	281,42		
1/2 mm (%18)	169,04		
2/4 mm (%20)	186,66		
4/8 (%10)	99,05		
8/12,5 (%22)	218,09		
Toplam	1854,73		

Elde edilmiş olan 28 günlük silindir beton basınç dayanımlarına bakıldığında zaman C20 beton silindir numunelere ait beton basınç dayanımı 23 MPa olarak bulunmuştur.

Tablo 4.3. C40 Perlit silindir numunelere ait beton basınç dayanımları

C40 Perlit Küp Numune İçeriği			
Bileşen Adı	Ağırlık (kg)	Su/Çimento Oranı	28 Günlük Basınç Dayanımı
Çimento (42,5)	560,00		
Su	308,09		
0/1 mm (%30)	350,00		
1/2 mm (%18)	210,00	0,56	fck = 37,5 MPa
2/4 mm (%20)	231,90		
4/8 (%10)	128,09		
8/12,5 (%22)	270,95		
Toplam	1778,08		

28 Günlük beton basınç dayanımları sonuçları incelendiğinde C40 perlit silindir numunelere ait değer 37,5 MPa olarak bulunmuştur.

Tablo 4.4. C20 Geleneksel silindir numunelere ait beton basınç dayanımları

C20 Geleneksel Küp Numune İçeriği			
Bileşen Adı	Ağırlık (kg)	Su/Çimento Oranı	28 Günlük Basınç Dayanımı
Çimento (42,5)	560,00		
Su	307,60		
Kum	560,00	0,55	fck = 25 MPa
Agrega	1120,00		
Toplam	2547,60		

C20 Geleneksel için kür havuzunda bekletilmiş olan 28 günlük silindir beton numunelerinin beton basınç dayanımları 25 MPa olarak bulunmuştur.

Tablo 4.5. C40 Geleneksel silindir numunelere ait beton basınç dayanımları

C40 Geleneksel Küp Numune İçeriği			
Bileşen Adı	Ağırlık (kg)	Su/Çimento Oranı	28 Günlük Basınç Dayanımı
Çimento (42,5)	560,00		
Su	253,80		
Kum	560,00	0,45	fck = 41 MPa
Agrega	1120,00		
Toplam	2493,8		

28 Gün sonucunda bekletilen C40 geleneksel silindir beton numunelere ait beton basınç dayanımları ise 41 MPa olarak bulunmuştur.

4.1.3. Numunelerin hazırlanması

4.1.3.1. Donatı işleri

Yapılmış olan tez çalışması kapsamında 4 adet betonarme kolonu için başlık ve temel kısımları için donatı kafesleri oluşturulmuş ve betonarme kolon için etriyeler kullanım için hazır hale getirilmiştir. Hazırlanmış olan donatılar Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Kolon numunelerde kullanılmış donatı kafesleri

Betonarme kolonun donatı işleri kapsamında öncelikle 16 mm çapında olan boyuna donatıların etriyelere montajı tamamlanmış ardından ise ayrı olarak yapılan donatı kafeslerinin içine geçirilerek donatı montajının tamamlanması sağlanmıştır. Yapılmış olan donatı kafesleri Şekil 4.14’te gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Kolon numunelerde kullanılan etriyeleri bağlanmış boyuna donatılar

4.1.3.2. Kalıp işleri

Tez çalışması kapsamında üretilen betonarme kolon numunelerinin imalatında ahşap kalıplar kullanılmıştır. Donatılar kalıplara konmadan önce kalıpların iç yüzey yağlanmış ve projeye uygun olacak şekilde pas payları yerleştirilmiştir. İmalatı yapılan ahşap kalıplara daha önceden hazırlanmış olan donatı kafesleri yerleştirilmiş ve beton dökümü için hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan kolon kalıpları Şekil 4.15’te verilmiştir.



Şekil 4.15. Betonarme kolonların dökümü yapılacağı kalıp sistemi

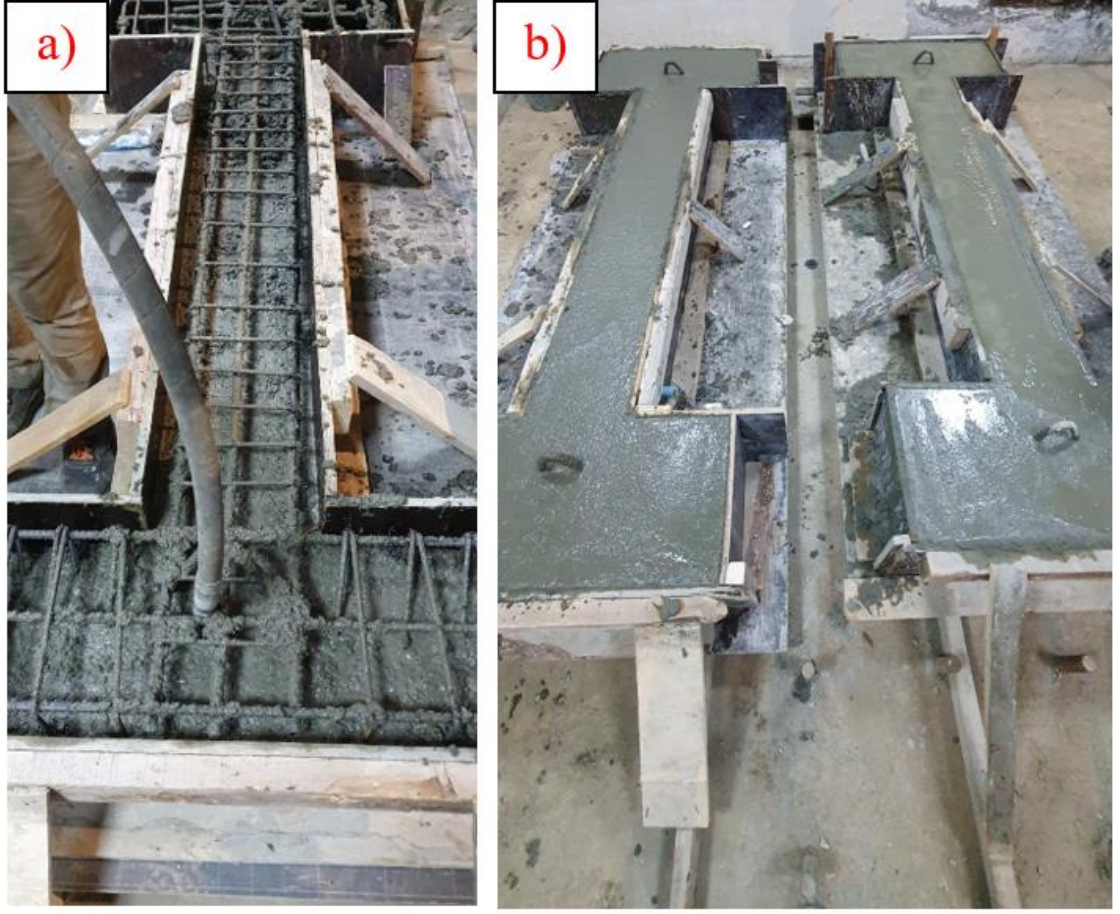
4.1.3.3. Beton işleri

Çalışma kapsamında elde edilmiş olan reçetelerin doğruluğunun sağlanması ve homojen bir döküm işleminin gerçekleştirilmesi için beton dökümü Şekil 4.16’da gösterilen betoniye yardımı gerçekleştirilmiştir. Beton dökümü esnasında her bir betonarme kolon numunesi için 12 adet 20 x 10mm ölçülerinde silindir numune alınmıştır. Alınan bu numuneler betonarme kolon deneyinin gerçekleştirileceği güne kadar betonarme kolonlar ile aynı kür koşullarında muhafaza edilmiştir. Bu silindir numuneler betonarme kolonlarla aynı gün kırımı yapılarak beton basınç dayanımları kontrol edilmiştir. Basınç dayanımı için alınan silindir numunelere ek olarak alınan numuneler ile her bir reçete için betonun yarmada çekme dayanım değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.16. Beton dökümü gerçekleştirilen betoniyer

Betoniyer ile dökümü gerçekleştirilen betonarme kolonların imalatı esnasında Şekil 4.17’de gösterildiği üzere vibratör yardımı ile beton malzemesinin homojen bir şekilde yerleşimi sağlanarak yaşanması muhtemel segregasyon durumlarının önüne geçilmiştir.



Şekil 4.17. Beton döküm aşamaları: **(a)** beton malzemenin döküm yapılırken vibratör ile sıkıştırılması, **(b)** dökümü gerçekleştirilmiş olan betonarme kolonları

Dökümü gerçekleştirilmiş olan betonarme kolonları ve alınmış olan silindir numuneler özdeş olarak kür işlemlerine tabi tutulmuştur. Dökümden sonraki 14 gün boyunca betonarme kolonlarının 12 saatlik periyotlarla kür işlemi yapılmıştır. Gerçekleştirilen kür işlemleri Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18. Prizini almış betonarme kolonun kürleme işlemi

28 gün sonunda betonarme kolon numunelerinin her birine ait olan silindir numunelerin basınç deneyleri yapılarak ön deney çalışmalarından elde edilen verilerin doğruluğu teyit edilmiştir. Yapılan beton basınç dayanım testlerinin ardından betonarme kolonları deney düzeneği için hazır hale getirilmiştir. Kolonların deney öncesi hazır şekilde gösterimleri Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



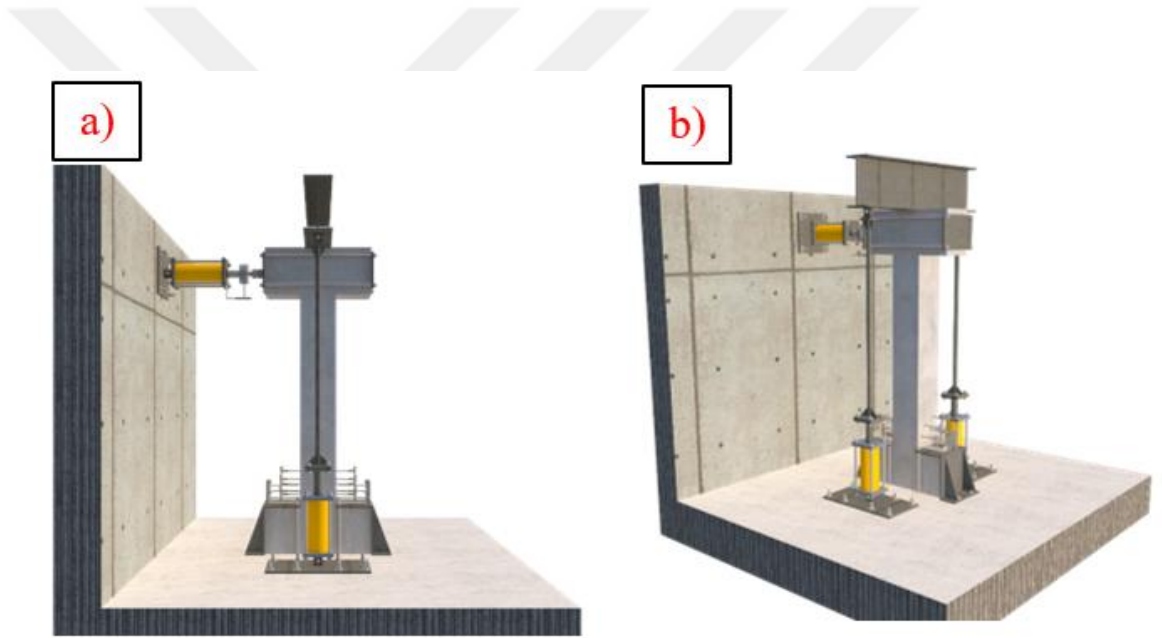
Şekil 4.19. 28 gün sonrasında deneye hazır olan betonarme kolon numuneler

Deney için uygun kür koşullarında bekletilen betonarme kolonların 28 gün nihayetinde tersinir tekrarlanır yanal yük etkisi altında deney için düzeneğe kurulumu gerçekleştirilmiştir.

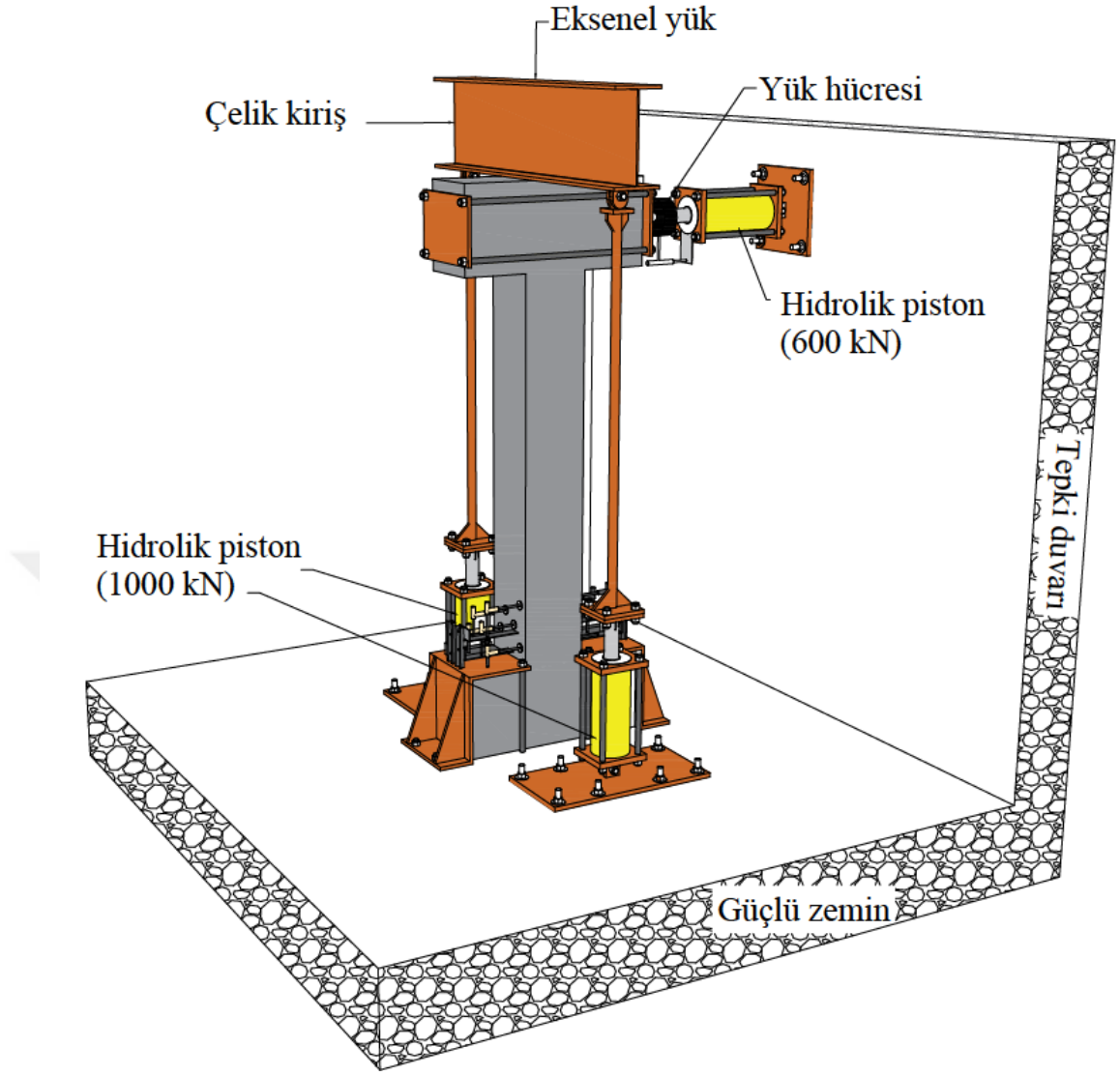
4.2. Yöntem

4.2.1. Deney Düzeneği

Deneylerin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi ve doğru deney sonuçlarının alınabilmesi açısından uygun deney düzeneğinin oluşturulması önemlidir. Literatür ışığında deney düzeneği tersinir tekrarlanır yüklemeye uygun bir şekilde oluşturulmuştur. Oluşturulan deney düzeneğine üç boyutlu olarak tasarlanan yükleme deney düzeneği Şekil 4.20’de ve uygulamada kullanılan yükleme sistemi ise Şekil 4.21’de gösterilmektedir.



Şekil 4.20. Yükleme düzeneği için tasarlanan deney düzeneği 3 boyutlu gösterimi: (a) Sol perspektiften görünüş, (b) ön perspektif görünüşü



Şekil 4.21. Deney düzeneği

Çalışma kapsamında üretilen betonarme kolonlar tersinir tekrarlanır yanal yük etkisi altında deneye tabi tutulmuştur. Şekil 4.21’de görüldüğü üzere betonarme kolon numunesine uygulanan yanal ve eksenel yük etkisiyle meydana gelebilecek olası düzlem dışı hareketin önüne geçilebilmesi amacıyla numune güçlü zemine çelik bohçalarla sabitlenmiştir. Sabit eksenel yük uygulanması amacıyla iki adet 100 ton kapasiteli hidrolik silindir kullanılmıştır. Kolon tepe noktasına yerleştirilen hayalet kirişe bağlı bulunan hidrolik pistonlar ile eksenel kuvvet uygulanmıştır. Tersinir tekrarlanır yükün uygulanması için gerekli yanal yükleme için ise tepki duvarına sabitlenmiş olan bir adet 60 ton kapasiteli hidrolik silindir kullanılmıştır. Betonarme kolonları için eksenel yük değeri taşıma gücü kapasitelerinin %30’u ($N/A \times f_{ck} = \%30$) olacak şekilde uygulanmıştır.

Yanal yükleme deplasman kontrollü olarak FEMA 356 protokolüne uygun bir şekilde 60 ton kapasiteli hidrolik piston ile uygulanmıştır. Yatay yükleme değerlerinin ölçümleri hidrolik silindire sabitlenmiş yük hücresi ile elde edilmiştir. Kolon tepe deplasmanını ölçmek için 200 mm kapasiteli LVDT (yer değiştirme ölçer) kullanılmıştır. Kolon boyunca oluşacak eğrilik ve dönme dağılımını elde etmek için sürekli bir şekilde 100 mm, 50 mm ve 25 mm kapasiteli LVDT'ler yerleştirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen veriler veri toplama sistemi vasıtasıyla bilgisayara aktarılmış ve kayıt altına alınmıştır. Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü 13 Mart Yapı Mekaniği Laboratuvarında tersinir tekrarlanır deney düzeneği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilmiş olan tersinir tekrarlanır deney düzeneğinin laboratuvar ortamında gösterimi Şekil 4.22'de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Yükleme sistemi için oluşturulmuş olan deney düzeneği

Şekilde numaralarla belirtilmiş olan Yükleme deney düzeneği enstrümanlarının sıralaması şu şekildedir;

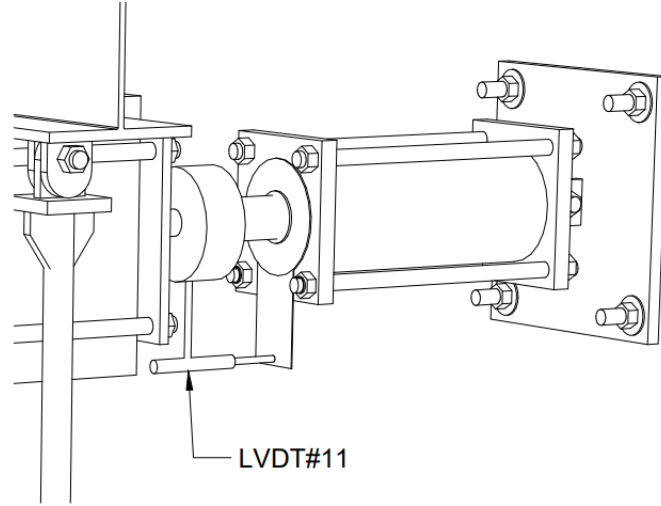
1. Bilgisayar
2. Veri toplayıcı

3. Hidrolik piston (1000 kN)
4. Hidrolik piston (1000 kN)
5. Betonarme kolon
6. Eksenel yük
7. Yük hücresi
8. Yatay yer değiştirme için LVDT
9. Hidrolik piston (600 kN)
10. Reaksiyon duvarı.

4.2.2. Ölçüm düzeneği sistemi

13 Mart Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiş olan tersinir tekrarlanır deneyi kapsamında betonarme kolon numunelerin ölçümleri eş zamanlı olarak 3 adet veri aktarım cihazı (Data logger) yardımıyla bilgisayar ortamına aktararak kayıt altına alınmıştır. Yer değiştirme miktarlarını ölçmek için ise Yer değiştirme ölçerler (LVDT) kullanılmıştır. Bir adet yer değiştirme ölçer kolon başlık yer değiştirmesi ölçmek için, 10 adet yer değiştirme ölçer ise eğriliği ölçmek amacıyla kolonun belirlenen bölgelerine yerleştirilmiştir. Yük ölçümlerinde tersinir artırımlı yanal yükün belirlenmesi için yanal yüklemeyi sağlayan hidrolik silindirin ucuna yük hücresi yerleştirilmiştir. Eksenel yükleme düzeylerinin aynı zamanlı ve eşit olarak uygulanabilmesi amacıyla hidrolik pistonlara bağlı olan manometrelerden basınç kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Betonarme kolon numunesine ait yanal yer değiştirmenin ölçülmesi için numunenin başlık kısmında bir adet 200 mm kapasiteli yer değiştirme ölçer konumlandırılmıştır. Şekil 4.23'te yanal yer değiştirmeleri sağlayan yer değiştirme ölçerin lokasyonu gösterilmektedir.



Şekil 4.23. Yanal yer değiştirmeyi ölçmek için konulan yer değiştirme ölçer

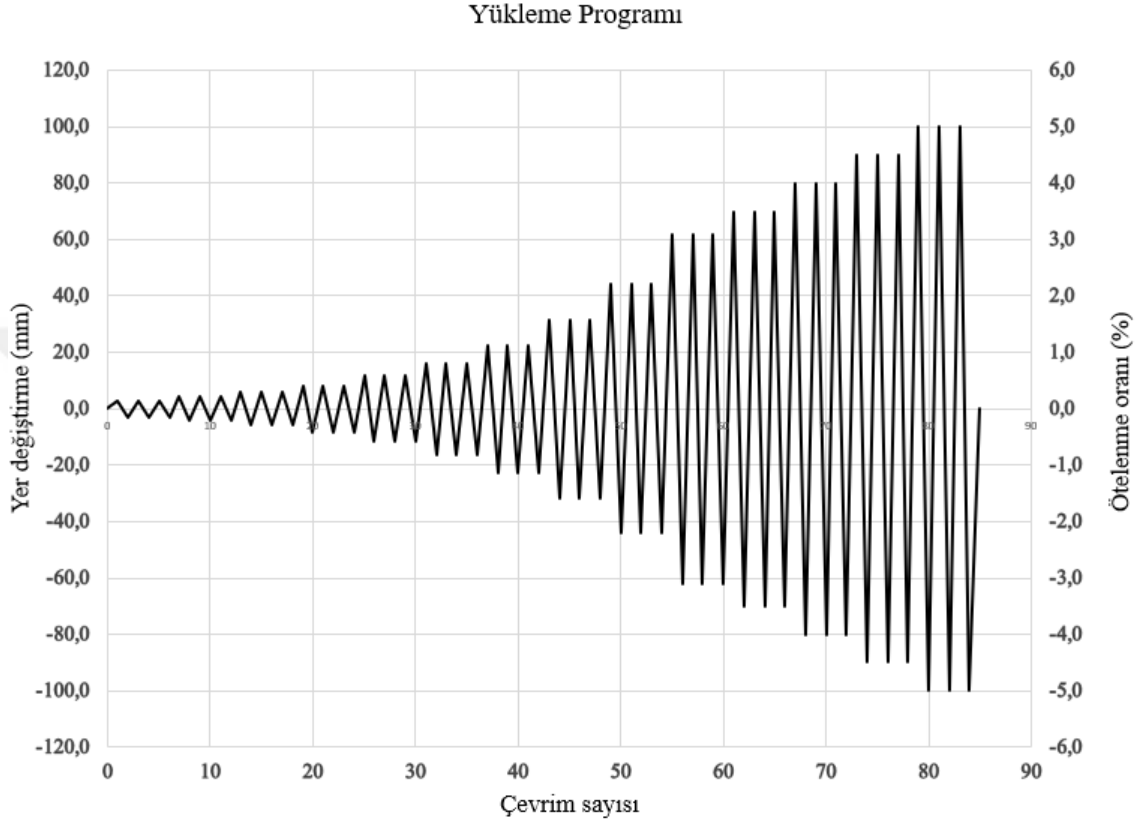
4.2.3. Yükleme programı

Deneyler, tersinir tekrarlanır yükleme etkisi altında deplasman kontrollü olarak yapılmıştır. FEMA 461 (2007) göz önüne alınarak her bir deplasman için 3 çevrim gerçekleştirilmiştir. Yükleme protokolünde gerçekleştirilen tepe deplasmanları ve ötelenme oranları Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6. Yükleme adımları

Adım	Deplasman (mm)	Ötelenme (%)
1	3,00 mm	0,15
2	4,20 mm	0,21
3	6,00 mm	0,30
4	8,50 mm	0,43
5	12,00 mm	0,60
6	16,00 mm	0,80
7	22,00 mm	1,11
8	30,00 mm	1,50
9	40,00 mm	2,00
11	50,00 mm	2,50
12	60,00 mm	3,00
14	70,00 mm	3,50
15	80,00 mm	4,00
16	90,00 mm	4,50
17	100,00 mm	5,00

Tersinir tekrarlanır deney süresince kullanılmış olan artırımsal yükleme programı Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Deney sisteminde kullanılan yükleme programı

Gerçekleştirilmiş olan yükleme deney düzeneği süresince uygulanan yükleme programı kapsamında Tablo 4.6' da verilmiş olan her bir deplasman ve ötelenme değeri için 3 adet çevrim gerçekleştirilmiştir. Her çevrim itme ve çekme olacak şekilde yani (+) ve (-) döngüden oluşmakta ve bu şekilde her bir betonarme kolon numunesi için tabloda belirtilen ötelenme oranları için bu program kullanılmıştır.

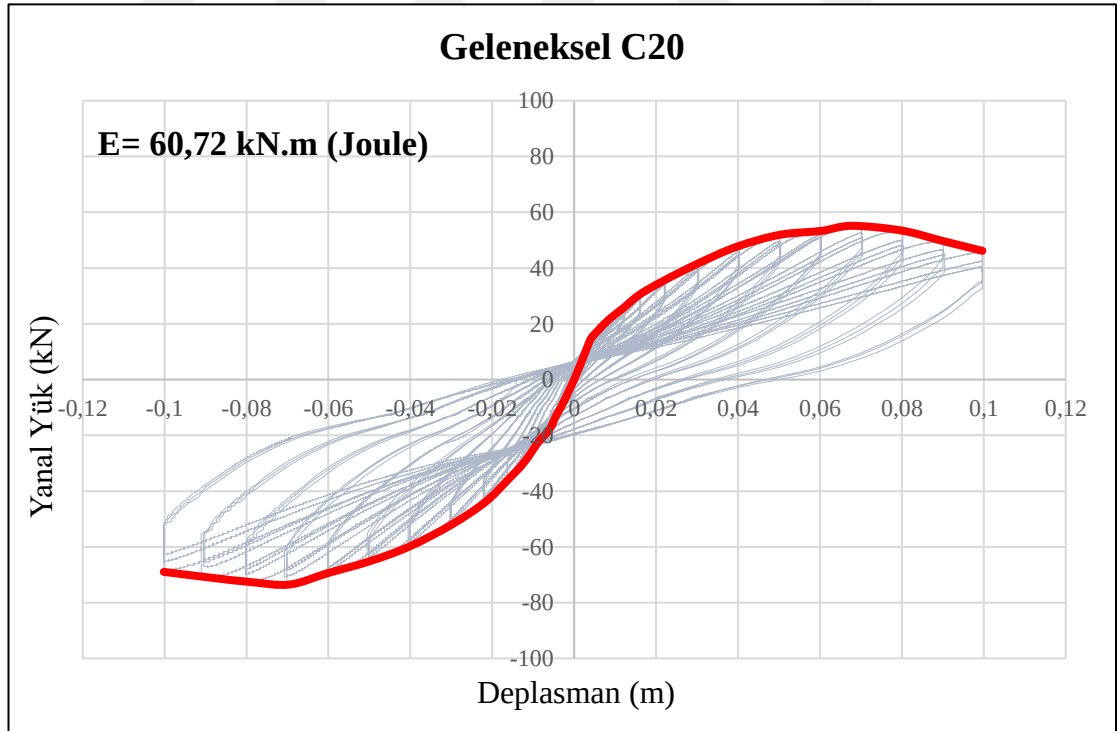
5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. Deney Sonuçları

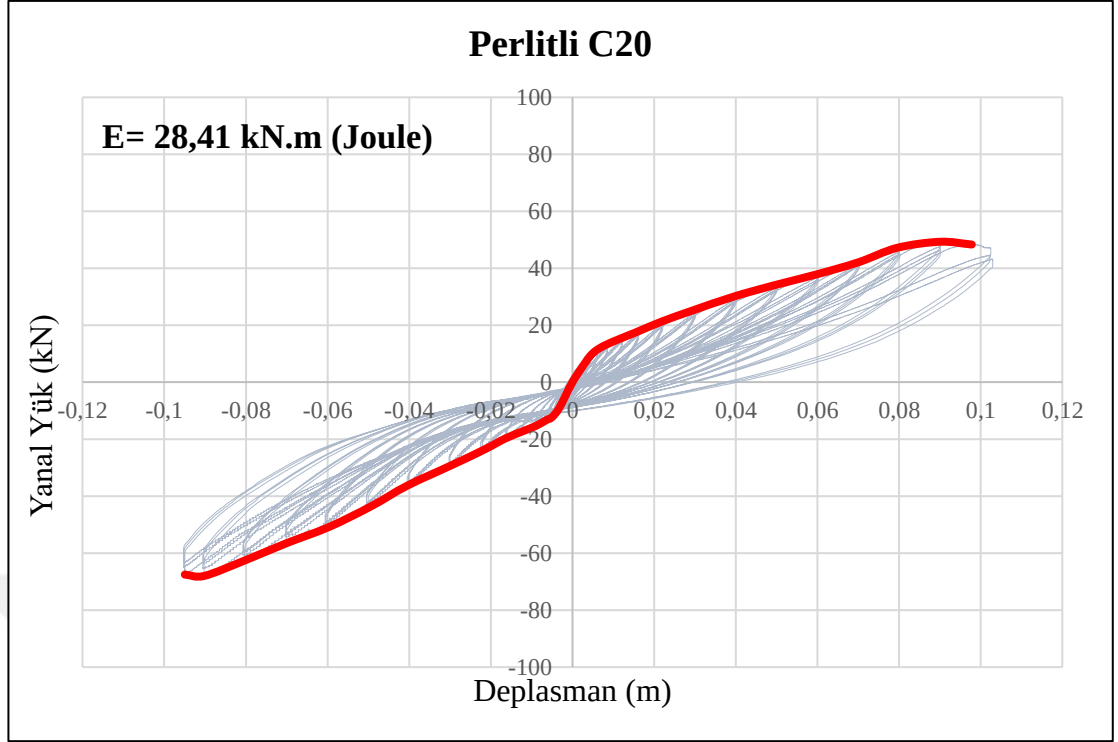
Tez çalışmasının bu bölümünde yükleme deneylerinin ardından elde edilen ham veri kullanılarak oluşturulan yük-deplasman ilişkisi, enerji yutma kapasitesi, süneklik oranları ve rijitlik bozulma eğrileri/değerleri incelenmiştir.

5.1.1. Yük-deplasman sonuçları

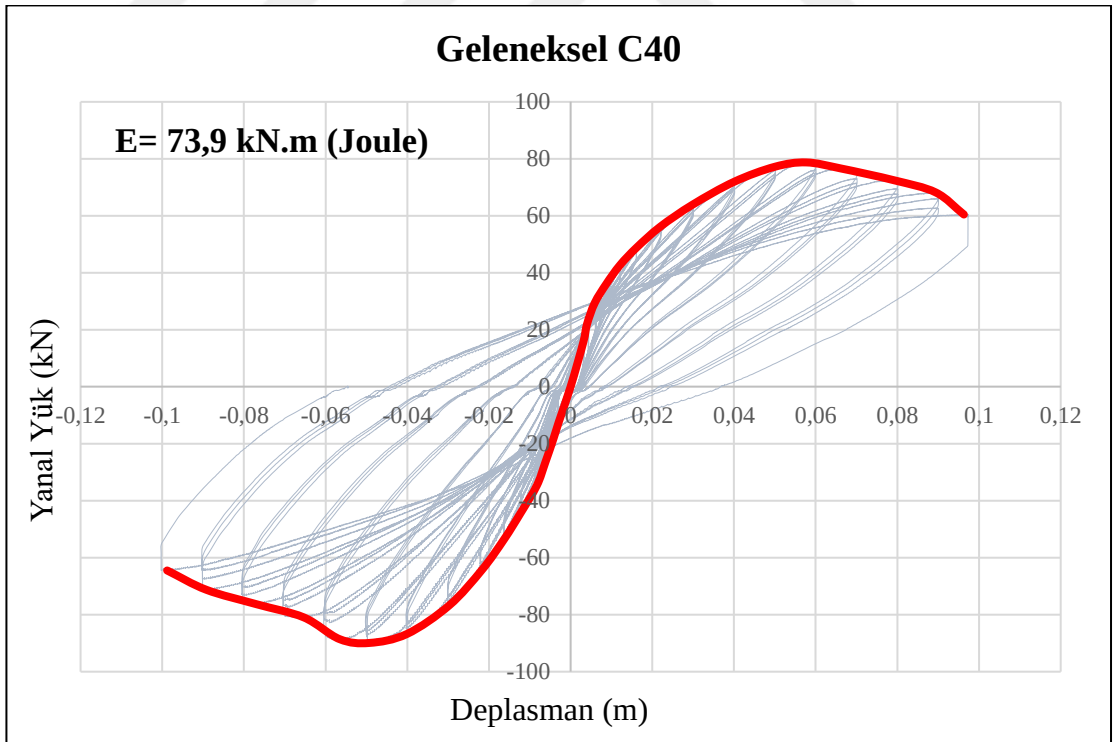
Tersinir tekrarlanır yanal yük ve sabit eksenel yük etkisi altında gerçekleştirilen deneyler sonucunda her bir deney numunesi için yük hücresi ve deplasman ölçer yardımıyla elde edilen yük- deplasman ilişkileri Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te sırasıyla verilmiştir. Deneyleri gerçekleştirilen C20, P20, C40 ve P40 betonarme kolon numuneleri için yük hücresinden elde edilen maksimum yük değerleri sırasıyla 55,12 , 49,25 , 78,7 ve 88,32kN'dir.



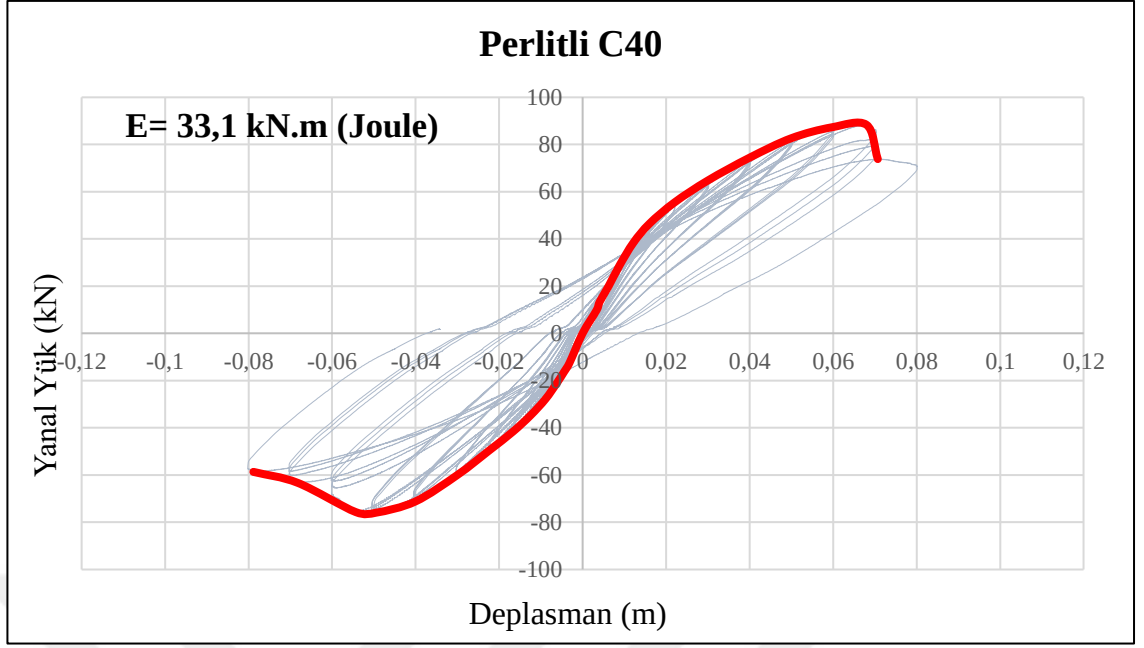
Şekil 5.1. Geleneksel C20 kolon numunesi yük-deplasman grafiği



Şekil 5.2. Perlit C20 kolon numunesi yük-deplasman grafiği

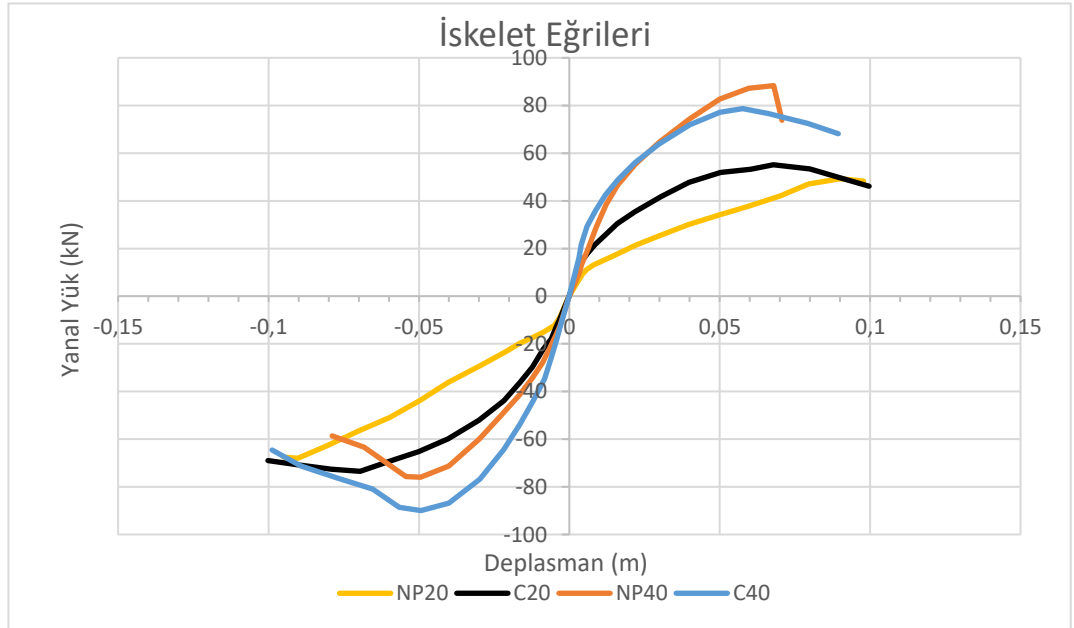


Şekil 5.3. Geleneksel C40 kolon numunesi yük-deplasman grafiği



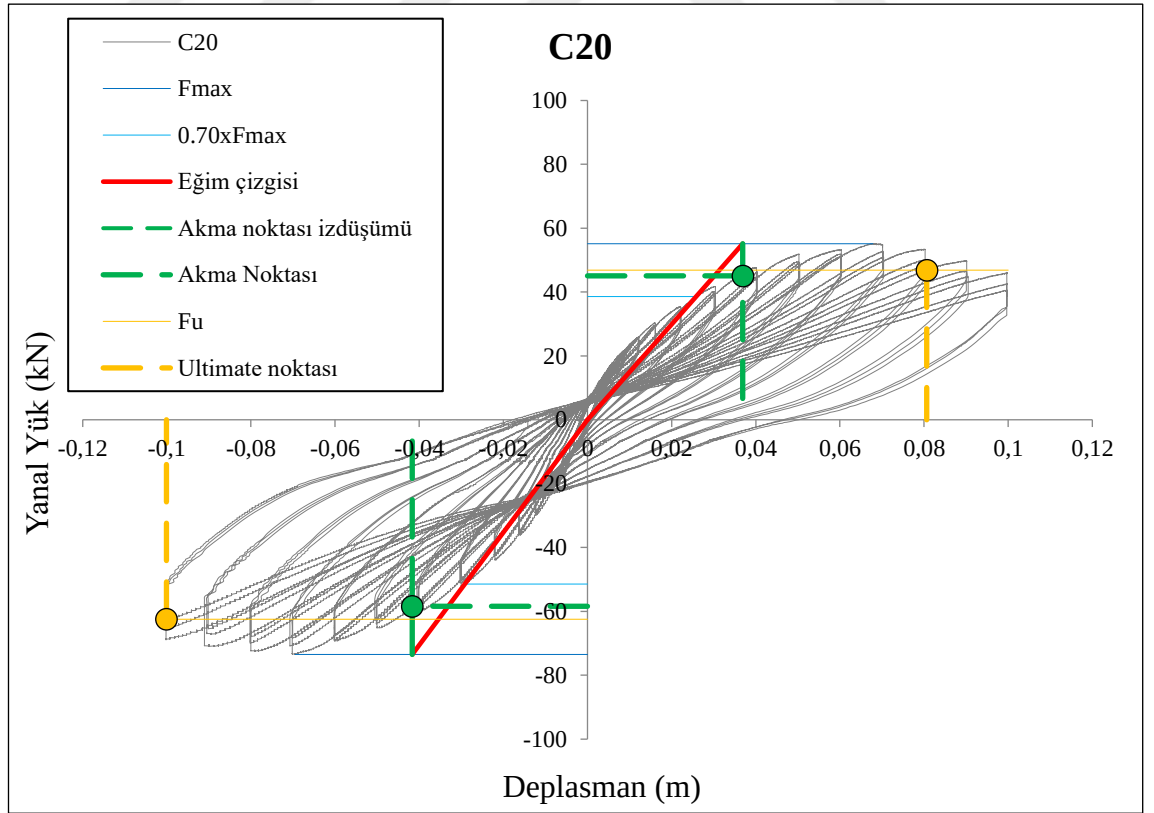
Şekil 5.4. Perlit C40 kolon numunesi yük-deplasman grafiği

Tersinir çevrimsel yükleme deneyi gerçekleştirilen geleneksel C20, C40 ve perlitli C20, C40 betonarme kolon numunelerinin her birine ait olan yük-deplasman eğrileri çıkarılmış ve ek olarak Şekil 5.5'te numunelere ait iskelet eğrileri verilmiştir. Verilmiş olan grafikte gri renk ile C20 geleneksel, sarı renk ile perlit C20, mavi renk ile geleneksel C40, turuncu renk ile ise perlit C40 gösterilmiştir.

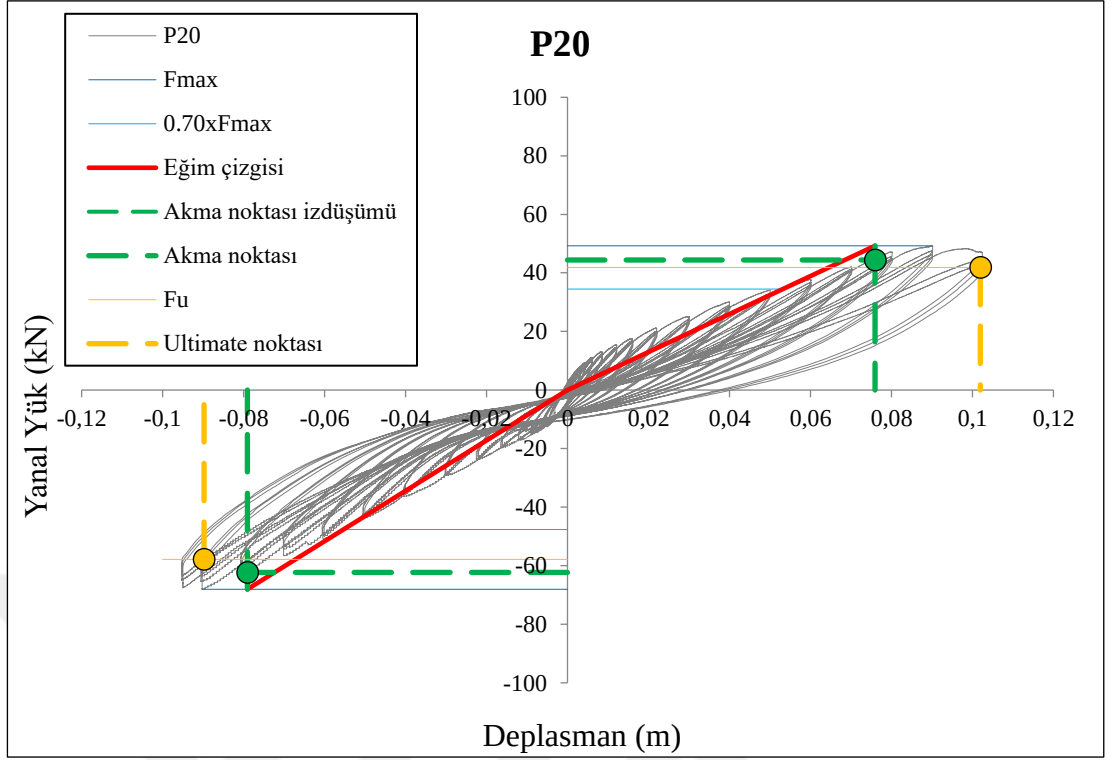


Şekil 5.5. Betonarme kolon numunelere ait iskelet eğrileri

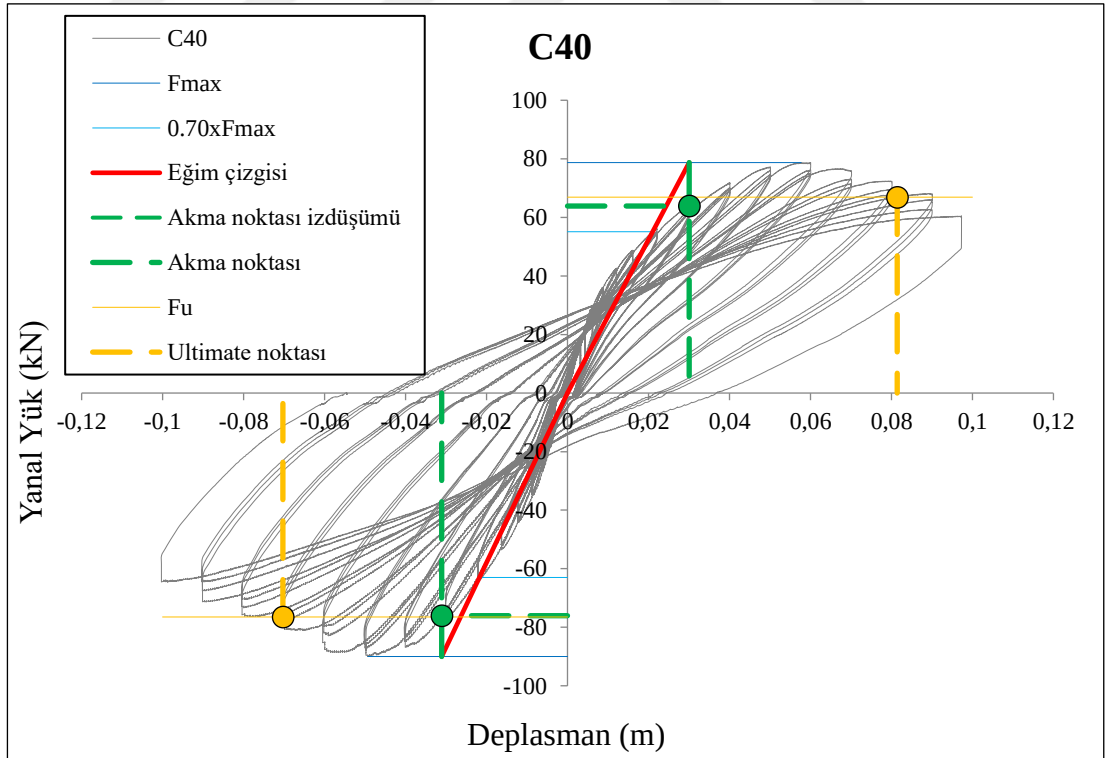
Mevcut literatür incelendiği zaman histeretik döngülerin idealleştirilmesi için farklı yaklaşım ve modellerin geliştirildiği/önerildiği görülmektedir. Bu yaklaşımlardan biri de betonarme kolon numuneleri için Sezen-Möhle (2004) tarafından önerilen idealize yöntemidir. Önerilen bu idealize yöntemi kapsamında; ilk önce maksimum yanal kuvvet negatif ve pozitif yönler için ayrı olarak bulunur sonrasında maksimum yükün %70 seviyesine düştüğü yük değerindeki ilk nokta belirlenerek grafikte belirtilir. Belirlenen bu noktadan ve orjinden geçecek şekilde bir doğru çizilir, doğrunun eğimi birincil rijitlik (k_1) değeridir. Bu doğru aynı eğimi devam ettirecek şekilde maksimum yük sınırına kadar uzatılır. Doğrunun maksimum yük sınırı ile karşılaştığı noktadan x eksenine doğru bir dik çizgi çizilir. X ekseninde elde edilen bu değer akma deplasmanı (Δ_y) olarak belirlenir. Akma deplasmanına karşılık gelen ilk yük değeri akma kuvveti (F_y) olurken, maksimum yükün %85'e düştüğü son yük değeri ise nihai kuvvet (F_u) olacaktır. Her bir betonarme kolon numunesine ait idealize edilmiş yük-yer değiştirme ilişkilerini gösteren şekiller Şekil 5.6-Şekil 5.9 'da gösterilmiştir.



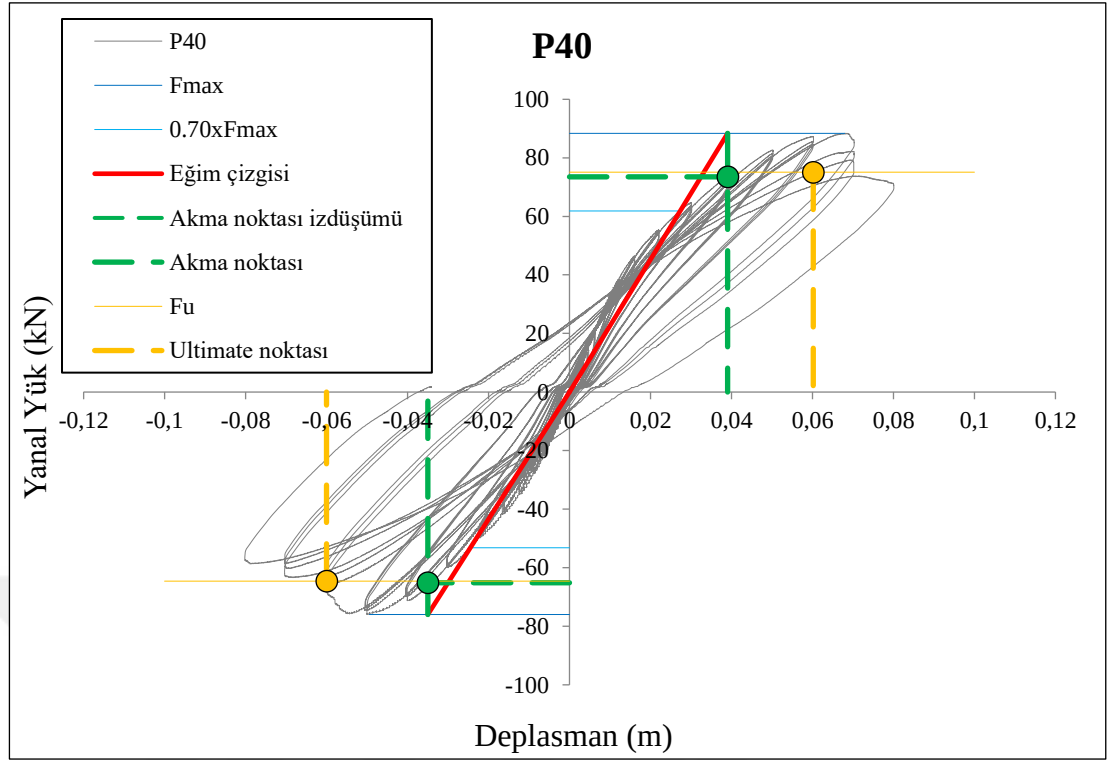
Şekil 5.6. Geleneksel C20 yük-deplasman idealleştirilmesi



Şekil 5.7. Perlit C20 yük-deplasman idealleştirilmesi



Şekil 5.8. Geleneksel C40 yük-deplasman idealleştirilmesi



Şekil 5.9. Perlit C40 yük-deplasman idealleştirilmesi

Yapılmış olan deneyler neticesinde her bir betonarme kolon numunesi için pozitif ve negatif yükleme yönleri için elde edilen sonuçlar Tablo 5.1' ve Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Pozitif Yükleme Sonuçları

Numune	Fmax (kN)	Fy (kN)	Fu (kN)	Δy (m)	Δu (m)	K (kN/m)	μ
C20	55,129	45,073	46,860	0,036	0,080	1252,0	2,222
P20	49,253	44,406	41,865	0,075	0,101	592,1	1,346
C40	78,696	63,853	66,891	0,030	0,081	2128,4	2,700
P40	88,328	73,486	75,079	0,039	0,060	1884,3	1,538

Tablo 5.2. Negatif Yükleme Sonuçları

Numune	Fmax (kN)	Fy (kN)	Fu (kN)	Δy (m)	Δu (m)	K (kN/m)	μ
C20	73,486	58,401	62,463	0,041	0,100	1424,6	2,439
P20	68,033	62,278	57,828	0,079	0,089	788,3	1,126
C40	89,964	76,030	76,470	0,031	0,070	2452,6	2,258
P40	75,970	65,126	64,574	0,034	0,060	1915,5	1,764

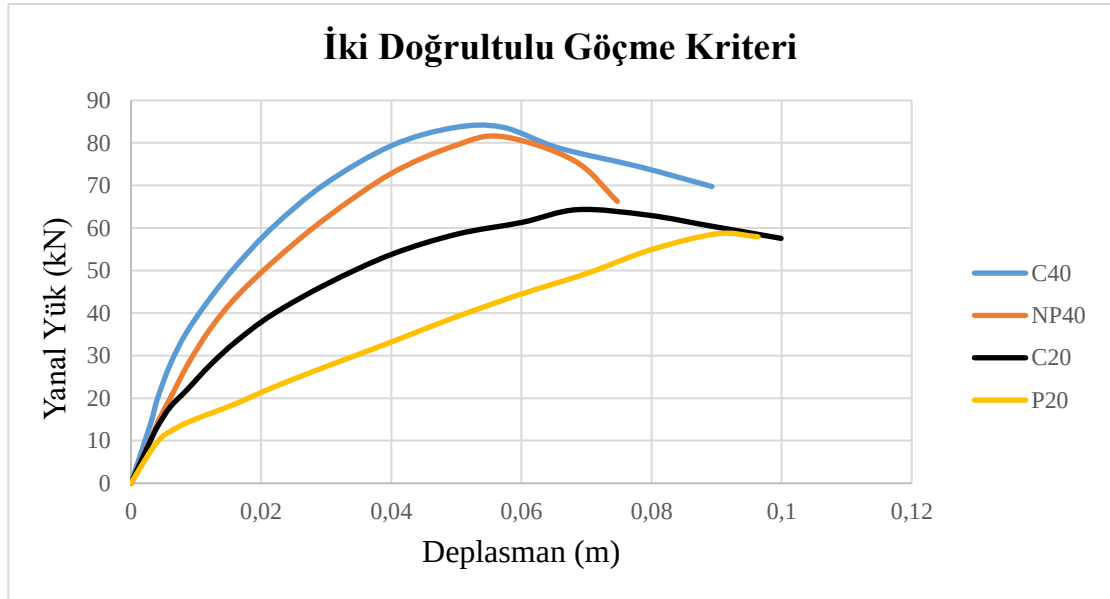
Verilmiş olan negatif ve pozitif yükleme sonuçlarının ortalama sonuçları baz alınarak oluşturulmuş olan iki doğrultulu göçme kriteri sonuçları Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. İki Doğrultulu Göçme Kriteri (Ortalama) Sonuçları

Numune	F _{max} (kN)	F _y (kN)	F _u (kN)	Δ _y (m)	Δ _u (m)	K (kN/m)	μ	E _u (kN.m)
C20	64,307	51,737	54,661	0,038	0,090	1338,3	2,330	60,72
P20	58,643	53,342	49,846	0,077	0,095	690,2	1,236	28,41
C40	84,330	69,941	71,680	0,030	0,075	2290,5	2,479	73,90
P40	82,149	69,306	69,826	0,036	0,060	1889,9	1,651	33,10

Tablo 5.3'te sunulan süneklik katsayıları deplasman bazlı yöntem ($\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$) kullanılarak elde edilmiştir. Tablo 5.3 incelendiğinde C20, P20 ve P40 kodlu betonarme kolonlarının süneklik katsayılarının C40 kodlu betonarme kolona göre sırasıyla 6%, 50% ve 34% oranlarında azalış gösterdiği görülmektedir.

İki doğrultulu göçme kriteri sonuçları ise grafik halinde Şekil 5.10'da verilmiştir. Verilmiş olan şekle göre gri renk ile geleneksel C20, sarı renk ile perlit C20, mavi renk ile geleneksel C40 ve turuncu renk ile ise perlit C40 numunelerine ait değerler grafikte verilmiştir.



Şekil 5.10. İki doğrultulu göçme kriteri grafiği

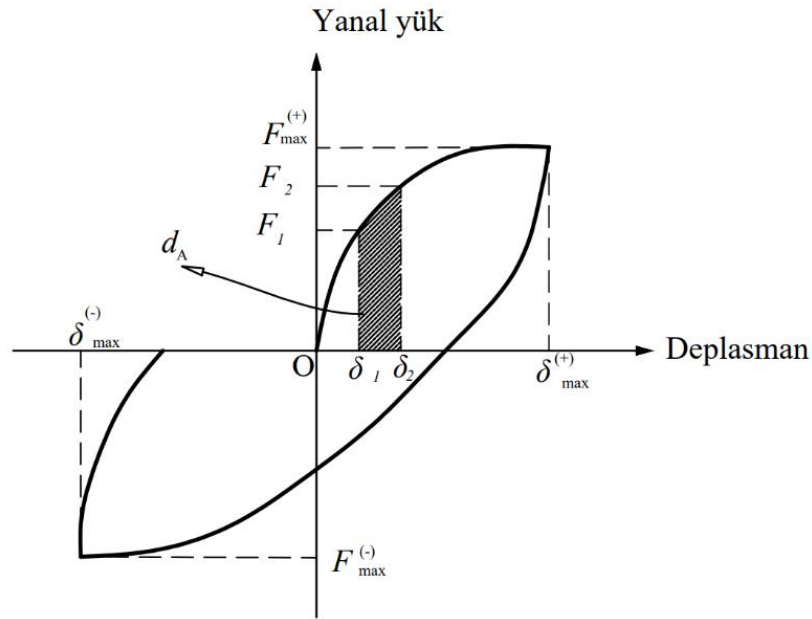
5.1.2. Enerji yutma kapasite sonuçları

Betonarme bir yapının performans seviyesini tanımlamak için dikkate alınan performans kriterlerinden olan enerji yutma kapasitesi yapının herhangi bir yük etkisi (eksenel yük, yanal yük vb.) altındaki davranışı (gevrek, sünek) biçimini tanımlayabilmektedir. Deneyleri gerçekleştirilen tüm betonarme kolonları için toplam enerji yutma kapasiteleri Denklem 5.1, 5.2 ve şekil yardımı ile hesaplanmıştır.

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \quad (5.1)$$

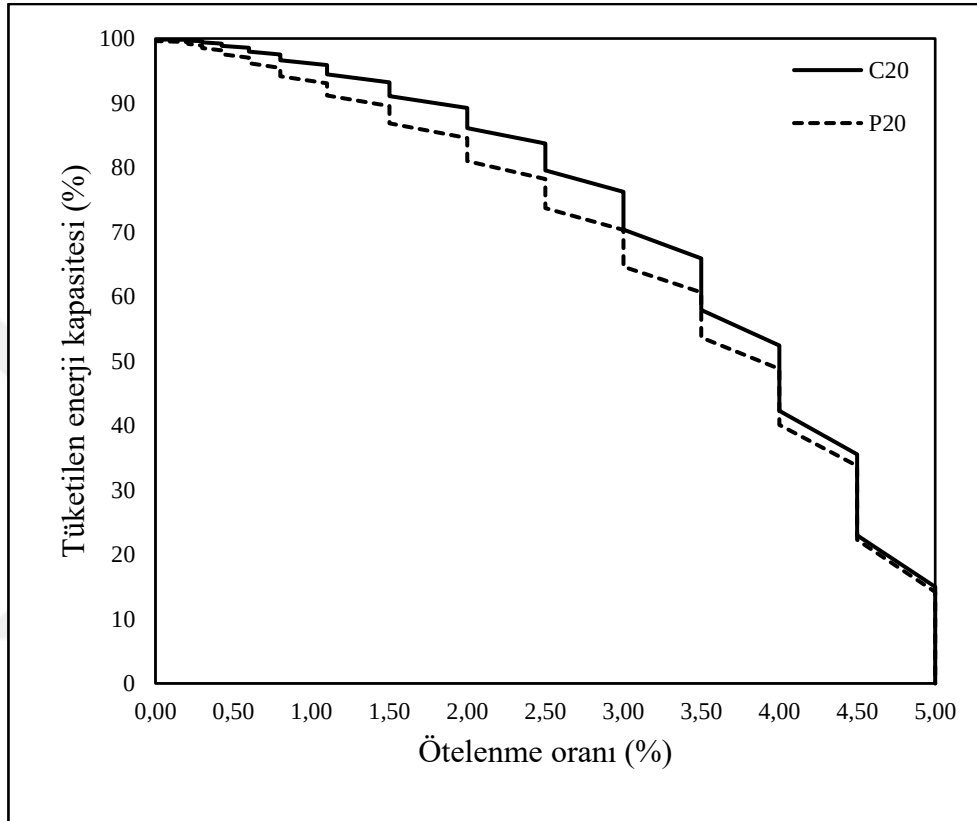
Denklem 5.1'de E her bir pozitif (E_i^+) ve negatif (E_i^-) döngü çevrimlerinde tüketilen toplam enerji tüketme kapasitesini simgelemektedir. Denklem 5.2'de betonarme kolonları için hesaplanan tüketilen toplam enerji kapasiteleri miktarı maksimum yükün %85'ine kadar karşılık gelen çevrimler için göz önüne alınmıştır. Şekil 5.11'de verilen yük-deplasman eğrisindeki taralı d_A birimlik alanın hesabı Denklem 5.2 ile elde edilmektedir.

$$d_A = (\delta_2 - \delta_1) \frac{F_2 - F_1}{2} \quad (5.2)$$

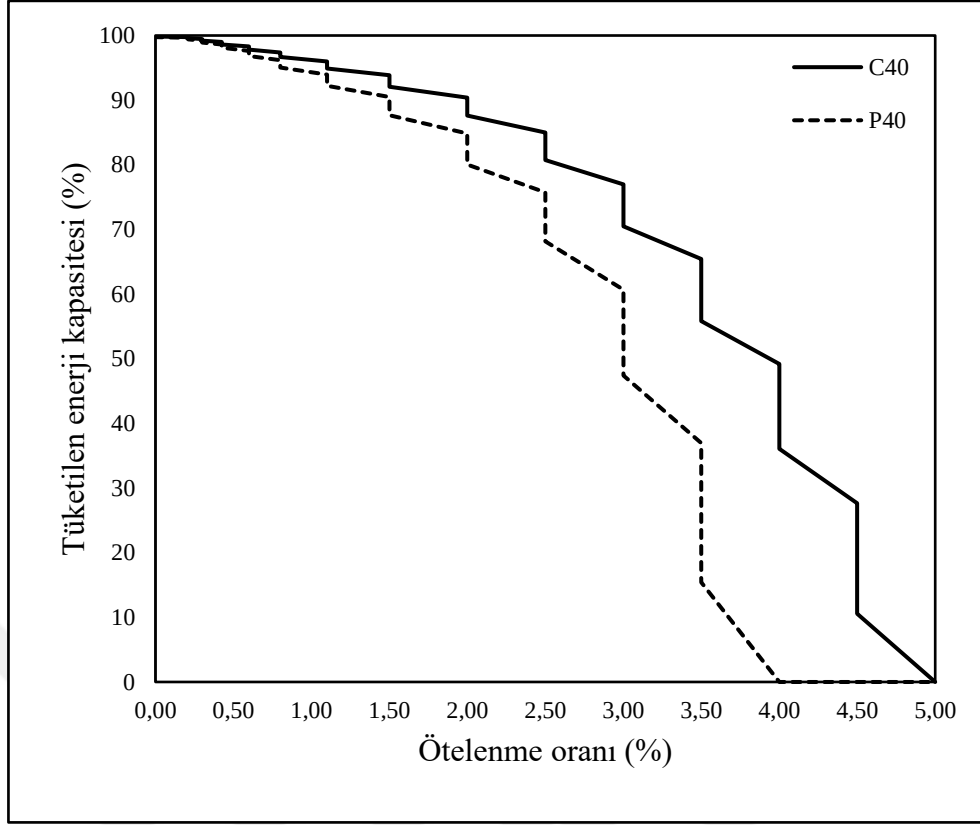


Şekil 5.11. Çevrimde tüketilen enerjinin hesaplanması

Deneyleri gerçekleştirilen C20, P20, C40 ve P40 numuneleri için elde edilen enerji değerleri sırasıyla 60,72 , 28,41 , 73,9 ve 33,1 kN.m (Joule) olarak hesaplanmıştır. Geleneksel agrega ile üretilmiş C40 kodlu betonarme kolon numunesinin enerji yutma kapasitesi dikkate alındığında C20, P40 ve P20 numunelerinin enerji yutma kapasiteleri 17%, 55% ve 61% oranlarında azalış göstermiştir.



şekil 5.12. C20 ve P20 kolon numunelerine ait enerji ilişkileri



Şekil 5.13. C40 ve P40 kolon numunelerine ait enerji ilişkileri

5.1.3. Rijitlik ilişkileri

Betonarme elemanların şekil değiştirmeye karşı gösterdiği direnç rijitlik olarak tanımlanmaktadır. Özellikle betonarme bir elemanda/sistemde tersinir tekrarlı yükleme etkisi altında plastik şekil değiştirmeler ile birlikte oluşan çatlaklar, donatı akması ve kabuk betonda meydana gelen deformasyonlar rijitlikte azalmaya sebep olmaktadır. Her bir betonarme kolonu için rijitlik değerleri Sun vd. (2008) tarafından tanımlanan modele göre Denklem 5.3 ve 5.4 yardımı ile hesaplanmıştır.

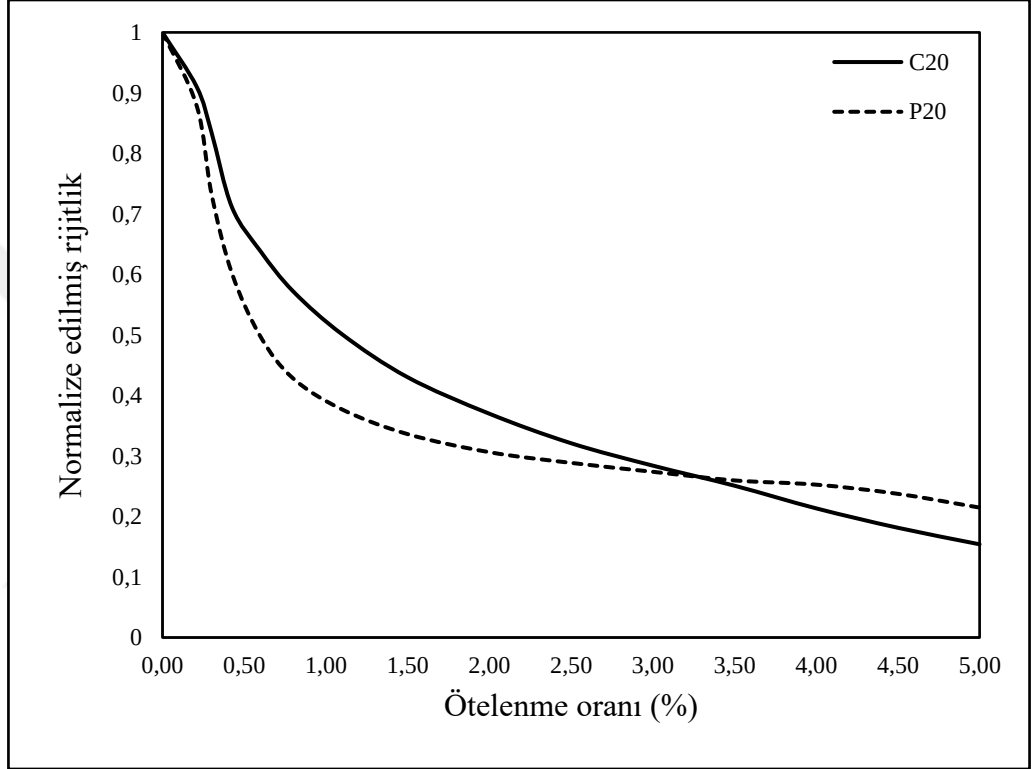
$$K_{\Delta} = \frac{K_{\Delta}^{+} + K_{\Delta}^{-}}{2} \quad (5.3)$$

$$K_{\Delta}^{+} = \sum_{j=1}^3 F_{j,max}^{+} / \sum_{j=1}^3 \Delta_j^{+}, K_{\Delta}^{-} = \sum_{j=1}^3 F_{j,max}^{-} / \sum_{j=1}^3 \Delta_j^{-} \quad (5.4)$$

Denklemden $F_{j,max}$ ve Δ_j sırasıyla her bir çevrime karşılık gelen maksimum yük ve deplasman değerlerini temsil etmektedir. Her çevrimin maksimum yük değerine karşılık gelen yer değiştirme değeri dikkate alınarak hesaplanan rijitlik değerleri ilk üç çevrimden elde edilen başlangıç rijitliği değerine bölünerek normalize edilmiştir. Şekil 5.12’de C20

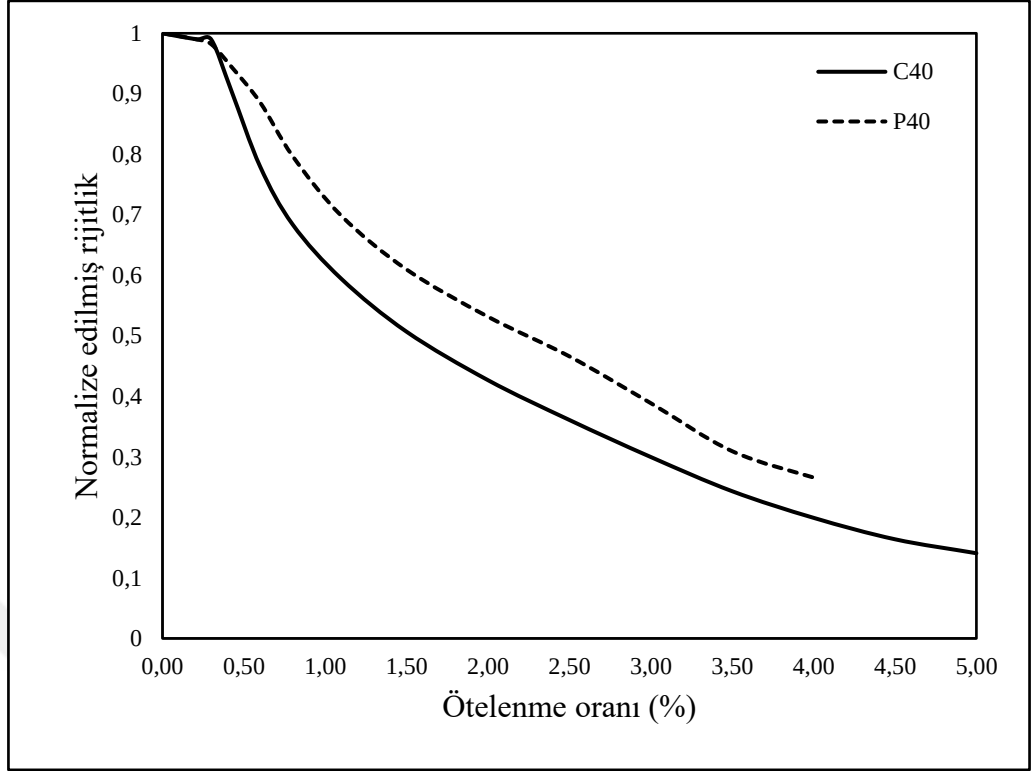
ve P20 Şekil 5.13'te ise C40 ve P40 numunelerine ait normalize edilmiş rijitlik azalma eğrileri sunulmuştur.

Şekil 5.14 dikkate alındığında 0.4% ötelenme oranına kadar C20 ve P20 numunelerinin rijitlik azalma değerleri paralellik göstermektedir. Bu ötelenme oranından sonra ise P20 numunesinin rijitlik bozulması C20 numunesine göre daha baskın hale gelmektedir.



Şekil 5.14. C20 ve P20 kolon numunelerine ait rijitlik ilişkileri

Şekil 5.15'te yer alan C40 ve P40 numunelerinin normalize rijitlik bozulması dikkate alındığında 0.3% ötelenme oranına kadar benzer davranış göstermektedir. Artan ötelenme oranı ile birlikte C40 numunesinin rijitlik bozulması P40 numunesine göre daha baskın hale gelmektedir.



şekil 5.15. C40 ve P40 kolon numunelerine ait rijitlik ilişkileri

6. SONUÇLAR

Betonarme yapı elemanlarında, perlit agregasının geleneksel agregaya yerine kullanılmasının, yapısal ve sismik performans parametreleri bakımından davranışının etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada, deneysel bulgular ve gözlemler neticesinde elde edilen sonuç-öneriler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır;

- 1) Perlit agregası ve geleneksel agregaya ile üretilen betonarme kolon numunelerinde, yanal yük taşıma kapasitelerinin yakın değerlerde elde edilmesi, hazırlanan iki farklı tipte beton karışım hesabı için basınç dayanımlarının yakın olduğunu göstermiştir.
- 2) Perlit agregası ile üretilen betonarme kolon numunelerinin, geleneksel agregayla üretilen betonarme kolonlara göre süneklik, rijitlik, enerji yutma kapasitesi vb. sismik performans göstergeleri bakımından oldukça yetersiz olduğu görülmüştür.
- 3) Perlit agregası ile üretilmiş betonarme kolon numunelerinin çevrimsel yükleme etkisi altında plastik şekil değiştirmesinin oldukça sınırlı olduğu ve yük boşaltıldığında çevrimlerin dar olarak kapanıp enerji sönümü bakımından yetersiz kaldığı deneyler esnasında gözlemlenmiştir.
- 4) Aktif deprem kuşağı üzerinde yer alan ülkemizde betonarme yapıların depreme dayanıklı olarak üretilmesi büyük önem arz etmektedir. Doğal perlit agregası ile üretilen betonarme yapı elemanları beton basınç dayanımı bakımından yeterli düzeyde olsa da, taşıyıcı sistem elemanlarında kullanılabilmesi, doğal perlitli beton tasarımında birim şekil değiştirmelerin (deformasyonların/birim kısaltmaların) geleneksel betondaki birim şekil değiştirmelere çekilebildiği beton karışım hesaplarının araştırılması durumunda önerilmektedir.
- 5) Perlit agregası ile üretilen betonarme kolonların yapısal davranışlarının önemli ölçüde farklı olmasının nedenleri bu tip betonların gerilme-birim şekil değiştirme davranışı gibi mekanik özelliklerin araştırılması ile ileriki çalışmalarda ortaya konulabilecektir.

KAYNAKLAR

- Akçaözoğlu, S. (2008) “Atık pet şişe kırıklarının hafif beton agregası olarak kullanılabilirliği”, Doktora Tezi, **Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adana.
- UEPG “2018 Dünya agrega tüketim istatistikleri”,
<http://www.uepg.eu/>
Son erişim tarihi: 15.05.2023
- Sahan, M. F. and Unsal, I. (2023) “An Experimental Analysis for Impact Behavior of Portland Cement Concrete Substituted with Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate”, **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, 1-18.
- Durak, U. ve Şimşek, 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.
- Zhang, D., Wang, Y., Ma, M., Guo, X., Zhao, S., Zhang, S. and Yang, Q. (2022) “Effect of equal volume replacement of fine aggregate with fly ash on carbonation resistance of concrete”, **Materials**, 15(4), 1550.
- Çakır, Ö. and 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.
- Chai, L. J., Shafigh, P. A. Y. A. M., Mahmud, H. I. L. M. I. and Aslam, M. J. S. M. (2017) “Effect of substitution of normal weight coarse aggregate with oil-palm-boiler clinker on properties of concrete”, **Sains Malaysiana**, 46(4), 645-653.
- Raza, M. S., Kunal, R. A. I., Kumar, D. and Mutahar, A. L. I. (2020) “Experimental study of physical, fresh-state and strength parameters of concrete incorporating wood waste ash as a cementitious material”, **Journal of Materials and Engineering Structures**, 7(2), 267-276.
- Yang, J., Shaban, W. M., Elbaz, K., Thomas, B. S., Xie, J. and Li, L. (2020) “Properties of concrete containing strengthened crushed brick aggregate by pozzolan slurry”, **Construction and Building Materials**, 247, 118612.
- Vadivel, T. S. and Thenmozhi, R. (2011) “Experimental behaviour of concrete with waste tyre rubber as coarse aggregate”, **Nature, Environment and Pollution Technology**, 10(2), 173-178.
- Azizi S. (2007) “Perlit Katkılı Hafif Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 56-60, İstanbul.

- Köken, A. (1997) “Experiments for teaching reinforced concrete behaviour”, Master's thesis, **Middle East Technical University**.
- Bakhshi, M., Dalalbashi, A. and Soheili, H. (2023) “Energy dissipation capacity of an optimized structural lightweight perlite concrete”, **Construction and Building Materials**, 389, 131765.
- Kadela, M., Małek, M., Jackowski, M., Kunikowski, M., Klimek, A., Dudek, D. and Rośkowicz, M. (2023) “Recycling of Tire-Derived Fiber: The Contribution of Steel Cord on the Properties of Lightweight Concrete Based on Perlite Aggregate”, **Materials**, 16(5), 2124.
- Sharma, B., Sharma, R. and Bansal, P. P. (2022) “Effect of fine aggregate replacement with expanded perlite and pumice on the development of lightweight concrete”, **Australian Journal of Civil Engineering**, 20(1), 115-129.
- Pramusanto, P., Nurrochman, A., Mamby, H. E. and Nugraha, P. (2020) “High strength lightweight concrete with expandable perlite as the aggregate”, **Materials Science and Engineering**, 830(4), 042040.
- Hu, H. S., Yang, Z. J., Xu, L., Zhang, Y. X. and Gao, Y. C. (2023) “Axial compressive behavior of square concrete-filled steel tube columns with high-strength steel fiber-reinforced concrete”, **Engineering Structures**, 285, 116047.
- Eryılmaz, K., Polat, R., Turhan, D. ve Karagöl, F. (2023) “Geopolimer Beton Atıklarından Elde Edilen Agregaların Geopolimer Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, **Journal of the Institute of Science and Technology**, 13(1), 419-431.
- Sarikaya, H. (2006) “Zeolit katkılı betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta.
- Aslan, S. (2020) “Cam lif takviyesinin beton üzerindeki etkilerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Avrasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon.
- Demirel, B. ve Yazıcıoğlu, S. (2007) “Silis Dumanının Karbon Fiber Takviyeli Hafif Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi”, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 11(1), 103-109.
- Bölükbaş Y., (2011) “Cam elyaf katkılı beton numunelerin mekanik davranışlarının incelenmesi ve yapay sinir ağları ile modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ.
- Akkaş, A., Alpaslan, L., Arabaci, S. ve Başyigit, C. (2010) “Polipropilen Lif Katkili Yari Hafif Betonların Basınç Dayanımı Özellikleri”, **Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi**, 2(1), 9-14.

- Sümer, B. ve Sarıbıyık, M. (2013) “Betonda silis dumanı ve polipropilen lif kullanımının beton özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi”, **Sakarya University Journal of Science**, 17(2), 217-224.
- Bicer, K., Yalciner, H., Balkıs, A. P. ve Kumbasaroglu, A. (2018) “Effect of corrosion on flexural strength of reinforced concrete beams with polypropylene fibers”, **Construction and building materials**, 185, 574-588.
- Yalciner, H., Kumbasaroglu, A., Ertuc, İ. ve Turan, A. İ. (2018) “Confinement effect of geo-grid and conventional shear reinforcement bars subjected to corrosion”, **In Structures**, 13(4), 139-152.
- Jayadurgalakshmi, M., Suganya, N. ve Kumar, T. U. (2023) “A state-of-the-art review-mechanical properties of light weight concrete by utilizing sintered fly ash aggregate”, **Materials Today**.
- Ashraf, M. J., Idrees, M. and Akbar, A. (2023) “Performance of silica fume slurry treated recycled aggregate concrete reinforced with carbon fibers”, **Journal of Building Engineering**, 66, 105892.
- Zong, S., Lu, Y., Ma, W., Liu, Z. and Li, P. (2023) “Research on eccentric-compressive behaviour of steel-fiber-reinforced recycled concrete-filled square steel tube short columns”, **Journal of Constructional Steel Research**, 206, 107910.
- Sun, Z., Si, B., Wang, D., & Guo, X. (2008) “Experimental research and finite element analysis of bridge piers failed in flexure-shear modes”, **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 7, 403-414.