

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DEPREM ETKİLERİ ALTINDA LİFLİ POLİMER KOMPOZİTLER İLE
SARGILANMIŞ BETONARME KOLONLARDA SÜNEKLİK**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gönül ANDIRIR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2026

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DEPREM ETKİLERİ ALTINDA LİFLİ POLİMER KOMPOZİTLER İLE
SARGILANMIŞ BETONARME KOLONLARDA SÜNEKLİK**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Gönül ANDIRIR
(501221038)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Alper İLKİ

ŞUBAT 2026

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**DUCTILITY OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS CONFINED WITH
FIBER-REINFORCED POLYMER COMPOSITES UNDER SEISMIC EFFECTS**

M.Sc. THESIS

**Gönül ANDIRIR
(501221038)**

Department of Civil Engineering

Structural Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Alper İLKİ

FEBRUARY 2026

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501221038 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Gönül ANDIRIR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DEPREM ETKİLERİ ALTINDA LİFLİ POLİMER KOMPOZİTLER İLE SARGILANMIŞ BETONARME KOLONLARDA SÜNEKLİK” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Alper İLKİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kutay ORAKÇAL
Boğaziçi Üniversitesi

Teslim Tarihi : 2 Ocak 2026
Savunma Tarihi : 9 Şubat 2026





Aileme,



ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca sağladığı akademik katkılar ve tez sürecindeki kıymetli danışmanlığı için sayın hocam Prof. Dr. Alper İlki'ye içtenlikle teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim çok değerli annem, babam ve kardeşime; tez sürecinde anlayışı ve desteğiyle yanımda olan Halis Kılıçarslan'a tüm kalbimle teşekkür ederim. Ayrıca bu süreçte destek veren tüm arkadaşlarıma da teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın, yapı mühendisliği alanında yürütülen çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Ocak 2026

Gönül Andırır
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	1
1.2 Literatür	3
1.3 Yöntem	5
2. BETONARME KOLONLARDA SÜNEKLİK	7
2.1 Süneklik Kavramı	7
2.2 Sargılama Kavramı	10
2.3 Lifli Polimer Kompozit ile Sargılamanın Sünekliğe Katkısı	12
3. TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ-2018'E GÖRE SARGILI KOLONLARDA SÜNEKLİK	15
3.1 Yönetmelik Yaklaşımı	15
3.1.1 Temel varsayımlar	15
3.1.2 Yönetmelikte süneklik kavramı	17
3.2 TBDY (2018)'e Göre LP ile Sargılı Beton Modeli	18
3.2.1 Model parametreleri	18
3.2.2 Gerilme-şekildeğiştirme eğrisi	20
3.2.3 Sınırlamalar	21
4. LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALARIN DERLENMESİ	23
4.1 Literatür Çalışması Kapsamı	23
4.1.1 Tarama kriterleri ve sınırlamalar	23
4.1.2 Süneklik ölçütleri	25
4.2 Kullanılan DeneySEL Veri Seti	26
4.2.1 Kesit geometrisi ve malzeme özellikleri	26
4.2.2 Sargılama detayları	28
4.2.3 Yükleme ve deney koşulları	28
4.3 DeneySEL Çıktılar	29
5. ANALİTİK HESAPLAR VE ELDE EDİLEN SONUÇLARIN LİTERATÜR VERİLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI	31
5.1 Analitik Hesap Yöntemi ve Esasları	31
5.2 Analitik Hesap Örneği	32
5.3 Karşılaştırma Esasları	38
5.4 Süneklik Karşılaştırması	42
5.5 Bulguların Değerlendirilmesi	45
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	49

6.1 Genel Sonuçlar	49
6.2 Yönetmeliğin Değerlendirilmesi	50
6.3 Gelecek Çalışmalar için Öneriler	51
KAYNAKLAR.....	53
EKLER	55
ÖZGEÇMİŞ.....	67



KISALTMALAR

ACI : American Concrete Institute

LP : Lifli polimer

TBDY (2018) : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)





SEMBOLLER

b	: Kesit genişliği
E_f	: Lifli polimerin elastisite modülü
f_{cc}	: Lifli polimerle sargılanmış betonun basınç dayanımı
f_{cm}	: Mevcut beton basınç dayanımı
f_l	: Lifli polimerin sağladığı yanal basınç
f_{ym}	: Mevcut boyuna donatı akma dayanımı
f_{yw}	: Mevcut enine donatı akma dayanımı
h	: Çalışan doğrultudaki kesit boyutu
n_f	: Tek yüzdeki LP sargı tabaka sayısı
r_c	: Köşelerde yapılan yuvarlatma yarıçapı
s	: Sargı donatısı aralığı
s_f	: Lifli polimer şeritlerin eksenden eksene aralığı
t_f	: Bir tabaka lifli polimer için etkili kalınlık
w_f	: Lifli polimer şeritinin genişliği
Δ_{kolon}	: Kolonun toplam yerdeğiştirme
Δ_p	: Plastik yerdeğiştirme
Δ_u	: Maksimum yerdeğiştirme
Δ_y	: Akma yerdeğiştirme
ϵ_{cc}	: Sargılanmış beton basınç dayanımına karşı gelen birim kısalma
ϵ_f	: Lifli polimerin etkin birim uzama sınırı
ϵ_{fu}	: Lifli polimerin kopma birim uzaması
$\epsilon_s^{GÖ}$	: Donatı çeliği için Göçmenin Önlenmesi performans düzeyi için tanımlanan birim uzama değeri
θ_p	: Göçmenin Önlenmesi performans düzeyi için plastik dönme sınırı
θ_y	: Akma dönmesi
κ_a	: Kesit şekil etkinlik katsayısı
L_p	: Plastik mafsal boyu
μ_{TBDY}	: TBDY (2018)'e göre hesaplanmış yerdeğiştirme sünekliği
μ_{deney}	: Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen yerdeğiştirme sünekliği
v	: Eksenel yük oranı

ρ_f	: Lifli polimerin hacimsel oranı
ϕ	: Donatı çapı
ϕ_p	: Plastik eğrilik
ϕ_u	: Göçme öncesi eğrilik
ϕ_y	: Akma eğriliği



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Veri setindeki kolonlara ait kesit geometrisi ve LP malzeme özellikleri.	27
Çizelge 4.2 : Veri setindeki kolonlara ait etriye konfigürasyonları.	27
Çizelge 4.3 : Yükleme ve deney koşulları.	29
Çizelge 5.1 : ASC-2NS kolonuna ait kesit geometrisi ve malzeme özellikleri.	33
Çizelge 5.2 : ASC-2NS kolonuna ait LP konfigürasyonu ve malzeme özellikleri.	33
Çizelge 5.3 : ASC-2NS numunesi için TBDY (2018)'e göre hesaplanan parametreler.	35
Çizelge 5.4 : ASC-2NS numunesi için hesaplanan değerler.	38
Çizelge 5.5 : TBDY (2018)'e göre hesaplanan sünekliğin deneysel sünekliğe oranına ait istatistiksel özet.	44
Çizelge A.1 : Literatürdeki kolon numunelerinin kesit geometrisi.	56
Çizelge A.2 : Lifli polimer özellikleri.	58
Çizelge A.3 : Deneysel çalışma ve süneklik oranları.	60
Çizelge A.4 : TBDY (2018)'e göre hesaplanan parametreler.	61
Çizelge A.5 : Kesit analizi ve yerdeğiştirme hesabı.	62



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Yetersiz enine donatı, düşük beton dayanımı ve yetersiz detaylandırma gibi sebeplerle hasar görmüş kolonlar (İlki ve diğ., 2008).	2
Şekil 2.1 : 2011 Van Depreminde yetersiz süneklik sebebiyle hasar görmüş kolonlar (Tapan ve diğ., 2013).	8
Şekil 2.2 : LP ile sargılanmış betonun gerilme-şekildeğiştirme davranışı (Diboune ve diğ., 2024).	12
Şekil 3.1 : LP ile sargılanmış beton için temsili gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.	21
Şekil 4.1 : Numunelerde yaygın görülen hasar durumu (İlki ve diğ., 2008).	30
Şekil 5.1 : Kolon numunesi ve kesit geometrisi (Iacobucci ve diğ., 2003).	33
Şekil 5.2 : ASC-2NS numunesi için oluşturulan sargılı beton malzeme modeli (SAP2000, 2024).	35
Şekil 5.3 : ASC-2NS numunesine ait moment-eğrilik eğrisi (SAP2000, 2024).	36
Şekil 5.4 : Temsili bir deneysel yük-yerdeğiştirme eğrisi (Bousias ve diğ., 2004)... ..	40
Şekil 5.5 : Yük-yerdeğiştirme grafiği üzerinden süneklik tanımı (Rakhshanimehr ve diğ., 2014).	40
Şekil 5.6 : Deneysel ve TBDY (2018) esaslı süneklik değerlendirme adımlarını gösteren akış şeması.	41
Şekil 5.7 : Deneysel ve TBDY (2018)'e göre hesaplanan süneklik parametrelerinin karşılaştırılması.	42
Şekil 5.8 : TBDY (2018)'e göre hesaplanan sünekliğin deneysel sünekliğe oranının dağılımı.	43
Şekil 5.9 : TBDY (2018)'e göre hesaplanan sünekliğin deneysel sünekliğe oranı ile eksenel yük oranı arasındaki ilişki.	44
Şekil 5.10 : Lifli polimer ile sargılanmış kolonlarda deney sonucunda görülen tipik hasar mekanizmaları (Ye ve diğ., 2003).	46
Şekil A.1 : Çevrimsel yükleme için deney düzeneği (Iacobucci ve diğ., 2003).	64
Şekil A.2 : Lifli polimer ile sargılanmamış kolonlara ait deney sonunda gözlenen hasar durumu (İlki ve diğ., 2008).	64
Şekil A.3 : Lifli polimer ile sargılanmış kolonlarda hasarın gelişimi (İlki ve diğ., 2008).	65



DEPREM ETKİLERİ ALTINDA LİFLİ POLİMER KOMPOZİTLER İLE SARGILANMIŞ BETONARME KOLONLARDA SÜNEKLİK

ÖZET

Deprem etkileri altında betonarme yapıların güvenli performans sergileyebilmesi için yapı elemanlarının yeterli süneklik ve enerji yutma kapasitesine sahip olması gerekmektedir. Bu bağlamda kolonlar, düşey yükleri taşımalarının yanı sıra deprem sırasında ortaya çıkan tersinir-tekrarlı yatay yükler altında sünek davranış göstermesi beklenen taşıyıcı elemanlardır. Türkiye’deki mevcut betonarme yapı stoğunun önemli bir bölümü, güncel deprem yönetmeliğinde öngörülen süneklik ve detaylandırma koşullarını karşılamamaktadır. Bu durum, kolonlarda ani dayanım kayıplarına ve gevrek göçmeye yol açarak deprem güvenliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, kolonların süneklik kapasitelerinin artırılması, deprem güvenliğinin iyileştirilmesi açısından mühendislik uygulamalarında önemli bir yer tutmaktadır.

Lifli polimer (LP) ile sargılama yöntemi, betonarme kolonların sünek davranışını geliştirmeye yönelik etkili bir güçlendirme tekniği olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. LP ile sargılama, beton çekirdeği üzerinde yanal basınç oluşturarak betonun şekil değiştirme kapasitesini artırmakta ve plastik mafsallarda daha büyük dönme kapasitelerinin oluşmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte LP ile sargılamanın sağladığı süneklik artışının büyüklüğü; kesit geometrisi, malzeme özellikleri, köşe yuvarlatma yarıçapı, beton dayanımı, eksenel yük düzeyi ve sargılama düzeni gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir.

Bu tez çalışmasında, lifli polimer ile sargılanmış dikdörtgen kesitli betonarme kolonlarda süneklik artışı, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) çerçevesinde incelenmiştir. Çalışma kapsamında, literatürde eksenel yük ve tersinir-tekrarlı yatay yükleme altında test edilmiş LP ile sargılanmış kolonlara ait deneysel veriler derlenerek kapsamlı bir veri seti oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalarda farklı biçimlerde tanımlanan maksimum yer değiştirme değerleri, ortak bir esas doğrultusunda yeniden düzenlenmiş ve elde edilen yer değiştirme temelli deneysel süneklik değerleri TBDY 2018 uyarınca hesaplanan yer değiştirme temelli süneklik değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Elde edilen bulgular, TBDY 2018’in lifli polimer ile güçlendirilmiş betonarme kolonlar için öngördüğü süneklik ve performans kriterlerinin güvenli tarafta kaldığını göstermektedir. Bu durum, genel itibarıyla ekonomik olmayan güçlendirme tasarımlarına yol açmaktadır. Çalışma, lifli polimer ile güçlendirilmiş dikdörtgen kesitli betonarme kolonların süneklik davranışının yönetmelik kapsamında ne ölçüde temsil edilebildiğini nicel olarak değerlendirmekte ve gelecekte yapılacak yönetmelik geliştirme çalışmalarına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.



DUCTILITY OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS CONFINED WITH FIBER-REINFORCED POLYMER COMPOSITES UNDER SEISMIC EFFECTS

SUMMARY

The seismic performance of reinforced concrete structures depends not only on the strength of individual members but also on their ability to undergo inelastic deformations while maintaining stability and load-carrying capacity. Ductility and energy dissipation capacity are therefore essential attributes for structures subjected to strong earthquake ground motions. Under severe seismic loading, structural elements are expected to undergo significant cyclic and reversible deformations without sudden strength degradation or loss of stability. In this context, reinforced concrete columns play a key role in ensuring the overall seismic safety of buildings, as they are responsible for carrying gravity loads while simultaneously resisting earthquake-induced lateral forces. A lack of sufficient ductility in columns can lead to brittle failure mechanisms, rapid loss of strength, and ultimately partial or total structural collapse.

In Türkiye, a large part of the existing reinforced concrete building stock was constructed before the current seismic design regulations. As a result, many of these structures fail to meet ductility and detailing requirements prescribed by contemporary seismic codes. Common deficiencies include low concrete strength, inadequate transverse reinforcement, insufficient confinement of the concrete core, and poor reinforcement detailing. Past earthquakes have demonstrated that such deficiencies significantly limit the ductile behavior of columns, often resulting in severe damage or premature collapse. Consequently, improving the ductility capacity of existing reinforced concrete columns has become an important issue in seismic strengthening and performance-based evaluation of buildings.

Among the various strengthening techniques developed to enhance column performance, confinement using fiber reinforced polymer (FRP) materials has been extensively studied and applied for many years. By restraining the lateral expansion of the concrete core, the FRP confinement provides additional confining pressure, which delays concrete crushing and increases the ultimate compressive strain capacity of confined concrete. This mechanism enables columns to sustain larger deformations before reaching their ultimate limit states, thereby improving their deformation capacity under seismic loading. The effectiveness of FRP confinement, however, depends on several parameters, including concrete strength, axial load level, confinement ratio, material properties of the FRP, and detailing characteristics such as corner rounding.

The influence of FRP confinement on the behavior of reinforced concrete columns has been extensively investigated through experimental studies. These studies consistently show notable improvements in deformation capacity and ductility. However, translating experimental observations into simplified analytical formulations suitable for design and assessment remains a challenging task. One of the main sources of

difficulty arises from the lack of consistency in ductility definitions adopted in experimental research. Ductility is variously expressed using curvature-based, displacement-based, or energy-based measures, often with different criteria for defining yield and ultimate states. This variability restricts the direct comparability of experimental results and complicates their use in evaluating code-based predictions.

In order to provide a practical framework for engineering applications, seismic design codes adopt simplified representations of confinement effects and deformation capacity. The Turkish Seismic Code (TSC 2018) includes provisions for evaluating the influence of FRP confinement on reinforced concrete columns using a simplified approach. Within the code framework, ductility enhancement is not expressed by an explicit ductility factor. Instead, the effects of FRP confinement are represented indirectly by increasing the compressive strength and ultimate compressive strain of concrete. These modified material properties are then used to determine deformation limits and plastic hinge rotation capacities. While this methodology ensures consistency and ease of application in engineering practice, the extent to which it reflects the ductility behavior observed in experimental studies -particularly for FRP-confined columns- requires systematic evaluation.

This thesis examines the ductility behavior of FRP-confined rectangular reinforced concrete columns within the framework of TSC 2018. The focus is placed on rectangular cross-sections, which are common in existing building stock and frequently encountered in strengthening applications. The study is based on a comprehensive experimental database compiled from the literature, including reinforced concrete columns tested under combined axial load and cyclic lateral loading conditions representative of seismic effects. The database includes a wide range of material properties, axial load ratios, and confinement levels enabling a comprehensive evaluation of the parameters influencing ductility behavior.

One of the main challenges addressed in this study is the inconsistency in ultimate lateral deflection definitions adopted in experimental research. To enable a meaningful comparison, experimental results reported in the literature were reinterpreted using a unified displacement-based framework. Yield and ultimate displacement limits were redefined according to consistent criteria, and displacement-based ductility ratios were determined for each test specimen. This approach ensured that experimental ductility values were expressed in a consistent manner and could be directly compared with code-based predictions.

By applying the material models and deformation capacity formulations prescribed in TSC 2018, displacement capacities and corresponding ductility ratios were calculated for each column in the experimental database. The experimentally derived ductility values were then compared with those obtained from the code-based calculations. This comparative evaluation allowed for a systematic assessment of the accuracy and conservatism of the TSC 2018 approach in representing the ductility behavior of FRP-confined rectangular reinforced concrete columns.

The results show that TSC 2018 provides conservative estimates of displacement-based ductility capacity. Although this conservative tendency contributes to safety, it may also result in strengthening designs that do not fully utilize the deformation capacity observed in experimental studies. The level of conservatism varied on key parameters such as axial load ratio, confinement effectiveness, and detailing characteristics affecting the confined concrete response. In certain cases, experimental results demonstrated significantly higher ductility capacities than those predicted by

the code, revealing potential limitations in the simplified analytical representation adopted in TSC 2018.

Overall, this study provides a quantitative evaluation of how effectively the current Turkish Seismic Code represents the displacement-based ductility behavior of FRP-confined rectangular reinforced concrete columns. By adopting a consistent comparison framework and focusing on experimentally observed deformation capacities, the research clarifies the strengths and limitations of the existing code provisions. The findings contribute to a more informed use of FRP confinement within performance-based seismic assessment and may support future efforts to refine code-based approaches for evaluating ductility in strengthened reinforced concrete columns.





1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Betonarme yapıların deprem etkileri altındaki performansının değerlendirilmesinde, taşıyıcı elemanların dayanım düzeylerinin yanı sıra şekildeğiştirme kapasiteleri ve buna bağlı süneklikleri de belirleyici bir rol oynamaktadır. Deprem sırasında oluşan tersinir-tekrarlı yükler altında, belirli düzeyde inelastik şekildeğiştirmelere izin verilmesi, elemanların ani dayanım kayıpları geliştirmeden yük taşıma kapasitesini sürdürebilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu bağlamda kolonlar, hem düşey yükleri taşımaları hem de deprem etkileri altında yatay yük taleplerini karşılamaları nedeniyle, yapı performansının değerlendirilmesinde kritik taşıyıcı elemanlar arasında yer almaktadır.

Mevcut betonarme yapı stokunda, özellikle enine donatı düzenlemeleri ve beton çekirdeğinin yeterli miktarda sargılanmaması gibi nedenlerle kolonların sünek davranış kapasitesinin sınırlı kaldığı durumlarla karşılaşlabilmektedir. Bu tür durumlarda kolon davranışının iyileştirilmesine yönelik güçlendirme uygulamaları mühendislik pratiğinde önemli bir yer tutmaktadır. Lifli polimer ile sargılama, beton çekirdeği üzerinde ek yanal basınç oluşturarak betonun eksenel basınç altındaki davranışını iyileştirmesi ve belirgin bir dayanım kaybı yaşanmaksızın şekildeğiştirme kapasitesini artırması nedeniyle, kolonların sünek davranış geliştirmesine yönelik yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Şekil 1.1’de yetersiz enine donatı, düşük beton dayanımı ve yetersiz detaylandırma gibi sebeplerle hasar görmüş kolonlar gösterilmektedir (İlki ve diğ., 2008).

Lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonların deprem etkileri altındaki davranışı, literatürde çok sayıda deneysel çalışma kapsamında incelenmiştir. Bu çalışmalarda, farklı kesit geometrileri, beton dayanımları, eksenel yük düzeyleri ve sargılama detayları için kolonların şekildeğiştirme davranışında belirgin iyileşmeler gözlemlendiği rapor edilmiştir. Ancak deneysel çalışmalarda sünekliğin tanımlanmasında kullanılan ölçütler, sınır durum kabulleri ve değerlendirme esasları arasında farklılıklar

bulunması, elde edilen sonuçların doğrudan karşılaştırılmasını ve yönetmelik temelli yaklaşımlar ile ilişkilendirilmesini güçleştirmektedir.



Şekil 1.1 : Yetersiz enine donatı, düşük beton dayanımı ve yetersiz detaylandırma gibi sebeplerle hasar görmüş kolonlar (İlki ve diğ., 2008).

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018), lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonların değerlendirilmesine yönelik belirli varsayımlar ve hesap esasları tanımlamaktadır. Yönetmelik yaklaşımında, lifli polimer ile sargılamanın kolon davranışı üzerindeki etkisi, doğrudan bir süneklik katsayısı tanımı yerine, betonun basınç dayanımı ve nihai birim kısalması gibi malzeme özelliklerinin değiştirilmesi yoluyla dolaylı olarak dikkate alınmaktadır. Bu yaklaşım, farklı uygulamalar için ortak bir değerlendirme çerçevesi sunmakta ve hesapların tutarlı biçimde yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu yaklaşımın deneysel çalışmalarda gözlenen süneklik düzeylerini hangi ölçüde yansıttığının incelenmesi önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, lifli polimer ile sargılanmış dikdörtgen kesitli betonarme kolonların süneklik davranışının, literatürde yer alan deneysel veriler esas alınarak değerlendirilmesi ve bu davranışın Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) kapsamında kullanılan hesap yaklaşımları ile karşılaştırılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda, eksenel yük ve tersinir-tekrarlı yatay yükler altında test edilmiş kolonlara ait deneysel çalışmalar derlenmiş; deneysel sonuçlardan elde edilen süneklik göstergeleri, yönetmelik esaslarına göre hesaplanan şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme temelli süneklik değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Çalışma kapsamında yapılan karşılaştırmalar sonucunda, TBDY (2018)'de lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonlar için kullanılan hesap yaklaşımının, deneysel çalışmalarda gözlenen süneklik düzeylerine kıyasla güvenli tarafta kalan değerlendirmeler ürettiği görülmüştür. Bu yaklaşım, farklı parametreler için emniyetli

sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamakla birlikte, bazı koşullarda deneysel olarak gözlenen süneklik kapasitesinin sınırlı biçimde yansıtılmasına yol açabilmektedir. Tez, bu yönüyle mevcut yönetmelik yaklaşımının deneysel bulgular ışığında değerlendirilmesini ve lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonların süneklik davranışına ilişkin daha bilinçli bir mühendislik bakışı geliştirilmesini ve aynı zamanda TBDY (2018)'in ilgili hükümleri için bir değerlendirme niteliği taşımayı amaçlamaktadır.

1.2 Literatür

Lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonların deprem etkileri altındaki davranışı, literatürde ağırlıklı olarak deneysel çalışmalar aracılığıyla incelenmiştir. Bu çalışmalarda, güncel deprem yönetmeliklerinde öngörülen detaylandırma ve sargı koşullarını sağlamayan; düşük beton dayanımına, yetersiz enine donatı düzenine ve sınırlı süneklik kapasitesine sahip kolonlar ele alınmıştır. Deneyler çoğunlukla konsol kolon düzeninde gerçekleştirilmiş; numuneler sabit eksenel basınç yükü altında tersinir-tekrarlı yatay yerdeğiştirme çevrimleri ile yüklemeye tabi tutulmuştur. Lifli polimer sargılama uygulamaları genellikle plastik mafsal bölgesinde yapılmış; farklı sargı katman sayıları, lif türleri ve eksenel yük düzeylerinin davranış üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel değerlendirmelerde kolon davranışı esas olarak yük-yerdeğiştirme ilişkileri üzerinden incelenmiş, maksimum yerdeğiştirme düzeyi ise çevrimsel yükleme sırasında yatay yük taşıma kapasitesinde %20 azalma meydana geldiği aşama esas alınarak tanımlanmıştır.

Del Zoppo ve diğ. (2018), eski standartlara göre tasarlanmış kare kesitli betonarme kolonların lifli polimer ile sargılanması durumunda çevrimsel davranış özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada lifli polimer sargılamanın plastik mafsal bölgesinde tek kat ve iki kat olarak uygulanmasının kolon davranışı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak ele alınmış; sargı uygulanan kolonlarda akma sonrası davranışın kontrol numunesine kıyasla daha ileri yerdeğiştirme düzeylerine kadar sürdüğü gözlemlenmiştir.

İlki ve diğ. (2004), güncel yönetmeliklerde öngörülen detaylandırma koşullarını sağlamayan, düşük beton dayanımına ve yetersiz enine donatı düzenine sahip dikdörtgen kesitli betonarme kolonların lifli polimer ile sargılanması durumunu deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada farklı sargı kalınlıklarının kolon davranışı

üzerindeki etkileri değerlendirilmiş; sargı uygulanan kolonlarda akma sonrası davranışın daha ileri yerdeğiştirme düzeylerine kadar sürdüğü raporlanmıştır. Çalışma kapsamında bindirme boyu yetersiz kolon numuneleri de deneye tabi tutulmuş ancak bu kolonlar tez kapsamındaki veri setine dahil edilmemiştir.

Ye ve diğ. (2003), kare kesitli betonarme kolonların lifli polimer ile sargılanması yoluyla çevrimsel davranışlarının nasıl değiştiğini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada farklı sargı miktarlarının etkileri ele alınmış; sargı uygulanan kolonlarda kesme göçmesi yerine eğilme ağırlıklı davranışın geliştiği ve çevrimsel yükleme sırasında davranışın daha kararlı biçimde sürdüğü belirtilmiştir. Bu davranış, lifli polimer sargının beton çekirdeğin yanıl genleşmesini sınırlaması ile ilişkilendirilmiştir.

Iacobucci ve diğ. (2003), yeterli enine donatıya sahip olmayan kare kesitli betonarme kolonların lifli polimer ile sargılanması durumunu deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada farklı sargı katmanlarının yanı sıra, önceden hasar görmüş kolonların davranışı da ele alınmış; sargı uygulanan kolonlarda çevrimsel yükleme boyunca şekildeğiştirme kapasitesinin daha kararlı biçimde geliştiği raporlanmıştır. Önceden hasar gören kolon numuneleri tez kapsamında derlenen veri setine dahil edilmemiştir.

Özcan ve diğ. (2008), düşük beton dayanımına ve yetersiz enine donatı düzenine sahip, düz donatılı kare kesitli betonarme kolonların karbon lifli polimer ile sargılanması durumunda çevrimsel davranış özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada farklı sargı katmanlarının ve sargının eksenel yük altında uygulanmasının davranış üzerindeki etkileri değerlendirilmiş; sargı uygulanan kolonlarda akma sonrası davranışın daha ileri yerdeğiştirme düzeylerine kadar sürdüğü belirtilmiştir.

Memon ve Sheikh (2005), güncel yönetmeliklerde öngörülen enine donatı koşullarını sağlamayan kare kesitli betonarme kolonların cam lifli polimer ile sargılanması durumunu deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada yüksek eksenel yük düzeyleri ve farklı sargı katmanlarının çevrimsel davranış üzerindeki etkileri ele alınmış; sargı uygulanan kolonlarda yerdeğiştirme temelli süneklik davranışının farklı düzeylerde geliştiği raporlanmıştır.

Bousias ve diğ. (2004), donatı korozyonu bulunan ve güncel detaylandırma koşullarını sağlamayan dikdörtgen kesitli betonarme kolonların lifli polimer ile sargılanması durumunu deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada farklı lif malzemeleri ve korozyon

koşulları değerlendirilmiş; donatı korozyonunun, lifli polimer sargılamanın çevrimsel davranış üzerindeki etkinliğini sınırlayabildiği ortaya konulmuştur. Tez çalışması kapsamında korozyona uğramış kolon numuneleri veri setine dahil edilmemiştir.

1.3 Yöntem

Bu çalışmada, lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonların deprem etkileri altındaki davranışı, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'de tanımlanan esaslar çerçevesinde incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, yönetmelikte lifli polimer sargılamanın etkisini temsil etmek üzere benimsenen hesap yaklaşımının, deneysel çalışmalarda gözlenen yerdeğiştirme temelli süneklik davranışını ne ölçüde yansıttığını değerlendirmektir. Bu doğrultuda izlenen yöntem, öncelikle literatürdeki deneysel çalışmalar derlenerek veri setinin oluşturulması, ardından yönetmelik esaslarına dayalı kesit ve eleman düzeyi analizlerin gerçekleştirilmesi ve son olarak deneysel bulgularla karşılaştırma yapılması adımlarından oluşmaktadır.

Bu amaçla, literatürde yer alan deneysel çalışmalar arasından belirli seçim kriterleri doğrultusunda bir veri seti oluşturulmuştur. Sargılama dışında detaylandırma yetersizliği veya durabilite sorunları içeren kolonlar, elde edilecek sonuçların yalnızca sargılamanın süneklik üzerindeki etkisini yansıtabilmesi amacıyla çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır. Benzer şekilde, kesit geometrisinin etkisini sınırlamak ve sonuçların tutarlılığını artırmak amacıyla yalnızca dikdörtgen kesitli ve süneklik yetersizliği lifli polimer sargılama ile giderilmeye çalışılan betonarme kolonlar değerlendirmeye alınmıştır. Ayrıca beton basınç dayanımı belirli bir aralıkla sınırlandırılarak, yüksek dayanımlı beton sınıflarından kaynaklanabilecek sonuç dağınıklığının önüne geçilmesi hedeflenmiştir.

Belirlenen veri seti için, TBDY (2018)'de tanımlanan esaslar doğrultusunda lifli polimer sargılamanın beton davranışı üzerindeki etkisi modellenmiştir. Bu kapsamda her bir kolon için sargılı betonun basınç davranışı tanımlanmış; betonun basınç dayanımı ve nihai birim kısalma değeri esas alınarak sargılı betona ait gerilme-şekildeğiştirme modelleri oluşturulmuştur. Elde edilen bu gerilme-şekildeğiştirme davranışı ve maksimum birim kısalma değeri, sargılı kolon davranışının değerlendirilmesinde temel girdi olarak kullanılmıştır. Kesit içerisinde yer alan donatı çeliği ise, TBDY (2018)'de tanımlanan esaslara uygun olarak, Park donatı çeliği malzeme modeline dayalı gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi kullanılarak modellenmiştir.

Oluşturulan malzeme modelleri kullanılarak kolon kesitlerine ait beton ve donatı malzeme tanımları yapılmış ve kesit analizleri gerçekleştirilmiştir. Kesit analizlerinde, sargılanmış beton davranışı esas alınmış ve kesitin tamamı boyunca tam integrasyon yöntemi kullanılmıştır. Dolayısıyla gerçekleştirilen integrasyon sonucunda, kesitin doğrusal olmayan basınç ve çekme davranışı dikkate alınarak her bir eğrilik durumu için kesitin etkin ataletinin değişimi hesaba katılmıştır. Yapılan analizler sonucunda ise kolon kesitlerine ait moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiştir. Bu ilişkiler üzerinden, TBDY (2018)'de tanımlanan Göçmenin Önlenmesi performans düzeyine karşılık gelen sınır birim şekildeğiştirme değerleri esas alınarak kolon kesitlerine ait eğrilik kapasiteleri hesaplanmıştır.

Kesit düzeyinde elde edilen eğrilik kapasiteleri, temel geometrik kabuller ve dönüşüm esasları kullanılarak eleman düzeyine aktarılmıştır. Bu aşamada, kolonlar için yönetmeliğe göre izin verilen yerdeğiştirme değerleri ve buna karşılık gelen yerdeğiştirme temelli süneklik değerleri hesaplanmıştır. Böylece, lifli polimer sargılamının kolon sünekliği üzerindeki etkisi, yönetmelikte tanımlanan malzeme ve kesit davranışı kabulleri çerçevesinde dolaylı ancak tutarlı bir biçimde nicel olarak ifade edilmiştir. Bu noktada yönetmelikte yer alan dönme limit değerler için belirtilen TBDY (2018) Denklem 5.3 ve Denklem 5.6'daki bağıntı yerine temel geometrik kabuller kullanılması, yapılan karşılaştırmalı çalışmanın daha tutarlı olması için tercih edilmiştir.

Literatürde yer alan deneysel çalışmalarda deney sonuçları çoğunlukla eleman düzeyinde yerdeğiştirme esaslı göstergeler üzerinden belirtildiğinden, TBDY (2018)'e göre hesaplanan maksimum yerdeğiştirme kapasiteleri ve süneklik oranları, deneysel çalışmalarda rapor edilen yük-yerdeğiştirme ilişkilerinden türetilen eleman sünekliği göstergeleri ile karşılaştırılmıştır.

2. BETONARME KOLONLARDA SÜNEKLİK

2.1 Süneklik Kavramı

Süneklik, yapı mühendisliğinde bir elemanın veya sistemin, taşıma gücünde ani ve belirgin bir azalma meydana gelmeden inelastik şekildeğiştirmelere izin verebilme yeteneğini ifade eder. Deprem mühendisliği açısından sünek davranış, yapıların deprem etkileri altında enerjiyi tüketerek hasarı kontrollü biçimde yayabilmesine ve ani göçme mekanizmalarının geciktirilmesine olanak sağlaması nedeniyle temel bir performans hedefi olarak kabul edilmektedir.

Süneklik kavramı, deprem davranışının farklı ölçeklerde tanımlanabilmesi amacıyla malzeme, kesit, eleman ve yapı düzeylerinde ele alınmaktadır. Malzeme düzeyinde süneklik, betonarme elemanların davranışını belirleyen beton ve donatı çeliğinin birlikte oluşturduğu gerilme-şekildeğiştirme tepkisi üzerinden tanımlanır. Donatı çeliği açısından süneklik, akma gerilmesine ulaşıldıktan sonra önemli düzeyde plastik şekildeğiştirme yapabilme kapasitesi ile ilişkilidir ve bu özellik, elemanın inelastik davranış süresince yük taşıma yeteneğini korumasına olanak sağlar. Beton açısından süneklik ise, basınç altındaki ezilme davranışı ile ilişkilidir ve donatı çeliğine kıyasla daha sınırlıdır. Betonun basınç altında yanal yönde genleşme eğilimi, yeterli yanal basınç sağlanmadığı durumlarda erken ezilmeye ve gevrek davranışa yol açabilmektedir. Buna karşılık beton çekirdeğinin enine donatı veya dıştan sargılama yoluyla çevresel olarak sınırlandırılması, yanal genleşmeyi kısıtlayarak betonun daha yüksek birim kısalma değerlerine ulaşmasına ve dayanım kaybı başlamadan önce daha sünek bir tepki geliştirmesine olanak tanır. Bu bağlamda sargılama, betonun malzeme düzeyindeki sünekliğini artırarak beton ve donatı çeliğinin birlikte daha dengeli bir inelastik davranış sergilemesini sağlayan temel mekanizmalardan biri olarak öne çıkmaktadır.

Kesit düzeyinde süneklik, beton ve donatı çeliğinin birlikte çalışması sonucu ortaya çıkan moment-eğrilik ilişkisi üzerinden ifade edilir ve genellikle akma eğriliği ile ileri şekildeğiştirme düzeyine karşılık gelen eğrilik arasındaki oran olarak tanımlanır. Betonun geciken ezilmesi ile donatı çeliğinin akma sonrası plastik davranışı, kesit

davranışının daha geniş bir inelastik aralıkta gelişmesine imkan tanır. Bu nedenle beton çekirdeğinin etkin biçimde sargılanması ve donatı düzeninin uygun seçilmesi, kesit sünekliğinin geliştirilmesinde belirleyici rol oynamaktadır. Eleman düzeyinde süneklik ise, kolon veya kiriş gibi taşıyıcı elemanların uç yerdeğiştirmeleri, görelî kat ötelemeleri ya da plastik dönme kapasiteleri üzerinden değêrlendirilir. Yapı düzeyinde süneklik ise, eleman düzeyindeki sünekliklerin sistem boyunca nasıl dağıldığı, düzensizliklerin varlığı ve kapasite tasarımı ilkelerinin uygulanma derecesi ile ilişkilidir. Bu farklı düzeyler, deprem etkileri altında güvenli bir yapı davranışı elde edebilmek için birbirini tamamlayıcı nitelik taşımaktadır.

Bu genel çerçeve içinde betonarme kolonlarda sünek davranış, deprem güvenliğinin sağlanmasında özel bir öneme sahiptir. 2011 Van Depremi sonrasında yetersiz süneklik sebebiyle hasar görmüş kolon örnekleri Şekil 2.1’de verilmiştir (Tapan ve diğ., 2013). Kolonlar, taşıyıcı sistemin düşey yükleri taşıyan ve yatay yük aktarımında kritik rol oynayan elemanları olduğundan, sünek olmayan bir kolon davranışı çoğuş zaman ani ve yaygın göçmelere yol açabilmektedir. Betonarme kolonlarda süneklik; betonun basınç etkisiyle ezilmesi, boyuna donatının akması, enine donatının betonun basınç altında yanal yönde genişlemesini sınırlaması ve bu mekanizmaların tersinir-tekrarlı yükleme altında birlikte nasıl geliştiğı dikkate alınarak değêrlendirilmelidir. Bu nedenle kolon sünekliğı, yalnızca ulaşılan en büyük yerdeğıştirme düzeyi üzerinden değıl, şekildeğıştirme arttıkça taşıma kapasitesinin ne ölçüde korunabildiğı esas alınarak tanımlanmalıdır.



Şekil 2.1 : 2011 Van Depreminde yetersiz süneklik sebebiyle hasar görmüş kolonlar (Tapan ve diğ., 2013).

Deprem etkileri altında kolon davranışının tersinir-tekrarlı niteliği, sünekliğin değerlendirilmesinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Çevrimler boyunca rijitlik ve dayanımda meydana gelen azalmalar, hasarın birikimli biçimde ilerlemesi ve aynı şekilde değiştirme düzeyinde elde edilen tepkilerin çevrim sayısına bağlı olarak farklılaşması, sünek davranışın karakterini tanımlayan temel unsurlar arasında yer almaktadır. Ancak uygulamada, farklı deneysel çalışmalar ve analitik hesap sonuçları arasında karşılaştırılabilir ve tutarlı bir değerlendirme yapılabilmesi amacıyla, süneklik çoğu zaman belirli bir akma düzeyine göre tanımlanan şekilde değiştirme veya yer değiştirme kapasitesi üzerinden nicel hale getirilmektedir. Bu yaklaşım, sünek davranışın karmaşık çevrimsel doğasının, mühendislik uygulamalarında izlenebilir ve karşılaştırılabilir bir performans göstergesi ile temsil edilmesine olanak sağlamaktadır.

Bu bağlamda süneklik değerinin belirlenmesinde en kritik hususlardan biri, akma düzeyinin ve şekilde değiştirme sınırının nasıl tanımlandığıdır. Betonarme kolon davranışında akma, çoğu zaman boyuna donatının akma gerilmesine ulaşması ile ilişkilendirilmekle birlikte, deneysel ve analitik çalışmalarda akma noktası farklı yöntemlerle tanımlanabilmektedir. Yük-yer değiştirme eğrileri üzerinden rijitlik değişimine dayalı yaklaşımlar veya kesit düzeyinde moment-eğrilik ilişkisi kullanılarak belirlenen etkin akma eğriliği, bu amaçla yaygın olarak kullanılan yöntemler arasındadır. Benzer şekilde ileri şekilde değiştirme sınırı da; taşıma gücünde belirli bir azalma, betonun basınç bölgesinde ezilmenin belirginleşmesi veya çevrimsel yükleme altında dayanım kayıplarının hızlanması gibi farklı kriterlere bağlı olarak tanımlanabilmektedir. Bu tanım ve kabuller, hesaplanan süneklik değerlerini doğrudan etkilemekte ve süneklik karşılaştırmalarının yorumlanmasında belirleyici olmaktadır.

Kolon sünekliği üzerinde etkili olan başlıca parametreler arasında eksenel yük düzeyi, beton dayanımı, enine donatı düzeni, boyuna donatı oranı ve kesit geometrisi yer almaktadır. Eksenel yük düzeyinin artması, betonun basınç bölgesindeki gerilme talebini artırarak ileri şekilde değiştirme kapasitesini sınırlayabilmektedir. Enine donatı veya dıştan uygulanan sargılama, betonun basınç altında yanal yönde genişlemesini sınırlandırarak betonun daha geç ezilmesine ve boyuna donatının burkulmasının gecikmesine katkı sağlamakta; bu durum plastik mafsallık bölgesinde şekilde değiştirmelerin daha kontrollü biçimde gelişmesine olanak tanımaktadır. Kesit geometrisi ise, özellikle köşeli kesitlerde yanal sınırlandırmanın kesit çevresinde eş dağılım göstermemesi nedeniyle, süneklik kapasitesinin değerlendirilmesinde dikkate

alınması gereken önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Bu parametrelerin her biri, kesit düzeyinde elde edilen şekildeğiştirme kapasitelerinin eleman düzeyine nasıl yansıtacağını doğrudan etkilemektedir.

Bu tez kapsamında süneklik kavramı, lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonların deprem etkileri altındaki davranışını değerlendirmeye yönelik, açık biçimde tanımlanmış ve hesaplanabilir bir performans ölçütü olarak ele alınmaktadır. Çalışmada süneklik, kesit analizleri sonucunda elde edilen şekildeğiştirme kapasitelerinin eleman düzeyine aktarılmasıyla tanımlanan yerdeğiştirme temelli göstergeler üzerinden ifade edilmekte; bu göstergeler literatürde rapor edilen deneysel yük-yerdeğiştirme ilişkilerinden türetilen eleman sünekliği ölçütleri ile karşılaştırılabilmektedir. Bu yaklaşım sayesinde, betonun lifli polimer sargılama ile malzeme düzeyinde kazandığı ilave sünekliğin, kesit ve eleman davranışına nasıl yansıdığı, yönetmelik esasları ve deneysel bulgular arasında tutarlı bir değerlendirme çerçevesi içinde ele alınabilmektedir.

2.2 Sargılama Kavramı

Betonarme kolonların deprem etkileri altındaki davranışı, betonun basınç altındaki tepkisi ile doğrudan ilişkilidir. Basınç etkisi altında beton, eksenel yönde kısalırken aynı zamanda yanal yönde genişleme eğilimi gösterir. Bu yanal genişleme, betonun ezilme sürecinin hızlanmasına ve basınç bölgesinde erken dayanım kayıplarının ortaya çıkmasına neden olabilir. Betonun bu davranışının sınırlandırılması, kolonun şekildeğiştirme kapasitesinin artırılmasında temel bir rol oynamaktadır.

Sargılama, betonun basınç altında yanal yönde genişlemesinin çevresel doğrultuda sınırlandırılması yoluyla, betonun basınç davranışının değiştirilmesi esasına dayanır. Beton çekirdeğinin çevresinde genişlemeye karşı direnç gösteren bir sistem bulunduğunda, beton üzerinde ek bir yanal basınç oluşur. Bu yanal basınç, betonun ezilmesini geciktirir ve betonun daha büyük birim kısaltmalara ulaşmasına olanak tanır. Bu durum, betonun basınç altındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin değişmesine ve ileri şekildeğiştirme düzeylerinde daha kararlı bir davranış elde edilmesine katkı sağlar.

Betonarme kolonlarda sargılama etkisi, enine donatı aracılığıyla sağlanır. Etriye ve çirozlardan oluşan enine donatı sistemi, betonun basınç altında yanal yönde

genleşmesini sınırlayarak betonun daha geç ezilmesine katkı sağlar. Aynı zamanda bu sargılama, boyuna donatının burkulma eğilimini geciktirir ve plastik mafsallarda bölgede şekildeğişikliklerin daha kontrollü biçimde gelişmesine olanak tanır. Bu nedenle enine donatının düzeni, aralığı ve detaylandırılması, betonarme kolonların deprem etkileri altındaki davranışını belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır.

Sargılama etkisinin düzeyi, enine donatının beton çekirdeğini ne ölçüde çevrelediğine ve basınç altında ne zaman devreye girdiğine bağlıdır. Enine donatı aralığının sıklaştırılması, kanca detaylarının uygun biçimde düzenlenmesi ve beton çekirdeğinin sürekliliğinin sağlanması, betonun yanal genleşmesine karşı daha etkin bir sargılama oluşturur. Buna karşılık yetersiz enine donatı düzenlemeleri, betonun erken ezilmesine ve kolon davranışının gevrekleşmesine yol açabilmektedir.

Kesit geometrisi, sargılama davranışını doğrudan etkileyen bir diğer önemli parametredir. Dairesel kesitlerde betonun yanal genleşmesine karşı oluşan sargılama, kesit çevresinde daha düzgün bir biçimde dağılırken; köşeli kesitlerde bu sargılama kesit çevresinde eşit dağılmayabilir. Özellikle köşe bölgelerinde gerilme yığılmaları oluşabilmekte ve bu durum sargılama etkisinin yerel olarak azalmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle dikdörtgen kesitli kolonlarda sargılama davranışı, kesit geometrisi ve sargılamanın sürekliliği birlikte değerlendirilmelidir.

Sargılama, kolon davranışını yalnızca betonun basınç dayanımı açısından değil, aynı zamanda şekildeğiştirme kapasitesi açısından da etkiler. Beton çekirdeğinin daha uzun süre bütünlüğünü koruması, plastik mafsallarda bölgede şekildeğişikliklerin gelişmesine olanak tanır. Bu durum, deprem etkileri altında kolonların taşıma kapasitesini ani biçimde kaybetmeden davranışlarını sürdürmesine katkı sağlar. Dolayısıyla sargılama, betonarme kolonların sünek davranışının geliştirilmesinde temel bir unsur olarak ele alınmaktadır.

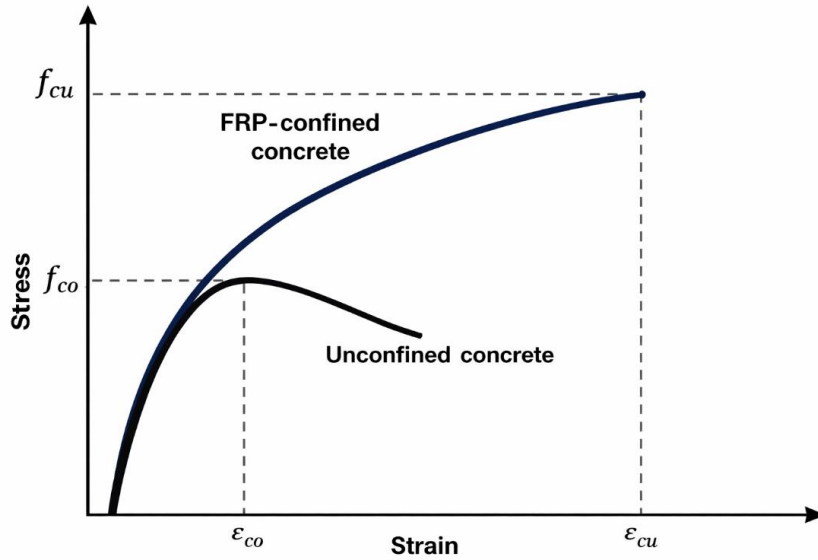
Bununla birlikte, son dönemde elde edilen deneysel bulgular, yüksek eksenel yük oranlarının, düşük nitelikli betonarme kolonlarda deformasyon kapasitesini azaltabildiğini ve gevrek eksenel göçme mekanizmalarını tetikleyebildiğini göstermiştir. Buna karşılık, yaygın olarak kullanılan analitik modellerin bu tür davranışları güvenilir biçimde temsil edemediği görülmektedir (Gündoğan ve diğ., 2025). Bu bulgular, deneysel olarak gözlenen deformasyon kapasitesinin, basitleştirilmiş birim şekildeğiştirme sınırlarına dayalı değerlendirme yaklaşımları

içerisinde doğru şekilde temsil edilmesinin önemli bir zorluk olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu tez kapsamında sargılama kavramı, betonun basınç altındaki davranışının değiştirilmesi ve buna bağlı olarak kolon kesitlerinin şekil değiştirme kapasitesinin artırılması bağlamında ele alınmaktadır. İlerleyen bölümlerde, bu genel çerçeve lifli polimer ile sargılama özelinde incelenecek; lifli polimer sargılamanın, mevcut enine donatı koşulları altında beton davranışı ve kesit kapasitesi üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak değerlendirilecektir.

2.3 Lifli Polimer Kompozit ile Sargılamanın Sünekliğe Katkısı

Lifli polimer kompozit ile sargılama, mevcut betonarme kolonların deprem etkileri altındaki davranışını iyileştirmek amacıyla kullanılan bir güçlendirme yöntemidir. Bu yöntemde, betonarme eleman kesitinin dış yüzeyine sarılan lifli polimer tabakalar aracılığıyla betonun basınç altında yanal yönde genişlemesi sınırlanmaktadır. Uygulama, betonarme elemanın mevcut taşıma mekanizmasına doğrudan müdahale etmeden, beton çekirdeğinin basınç altındaki tepkisini etkilemektedir. Bu durumu temsil eden tipik gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 2.2’de sunulmuştur (Diboune ve diğ., 2024).



Şekil 2.2 : LP ile sargılanmış betonun gerilme-şekil değiştirme davranışı (Diboune ve diğ., 2024).

Basınç etkisi altında beton, eksenel yönde kısalırken yanal yönde genişleme eğilimi gösterir. Kolon kesitini çevreleyen lifli polimer tabakalar, bu genişlemeye karşı

çevresel doğrultuda çekme gerilmeleri alarak beton üzerinde ek bir yanal basınç oluşturur. Oluşan bu basınç, betonun ezilme sürecini geciktirir ve beton çekirdeğinin daha büyük birim kısalmalara ulaşmasına olanak tanır. Bu durum, betonun basınç altındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin ileri şekildeğiştirme düzeylerine doğru uzamasına karşılık gelmektedir.

Betonun nihai birim kısalmasındaki artış, kesit düzeyinde daha büyük eğriliklerin gelişmesine imkan sağlar. Buna bağlı olarak plastik mafsallarda daha yüksek şekildeğiştirme kapasiteleri elde edilebilmektedir. Bu çerçevede TBDY (2018)'de lifli polimer sargılamanın sünekliğe katkısı, doğrudan bir süneklik katsayısının artırılması yoluyla değil, kesit davranışını belirleyen beton özelliklerinin değişmesi üzerinden ortaya çıkmaktadır.

Betonarme kolonlarda temel sargılama etkisi, enine donatı tarafından sağlanmaktadır. Lifli polimer ile yapılan sargılama, bu etkiyi dıştan tamamlayan bir güçlendirme olarak değerlendirilmelidir. Enine donatı düzenlemesinin yetersiz olduğu kolonlarda lifli polimer sargılama, betonun basınç davranışını iyileştirerek şekildeğiştirme kapasitesinin artırılmasına katkı sunabilmektedir. Bununla birlikte bu uygulama, enine donatının yerine geçen bir çözüm olarak değil, mevcut betonarme davranışı geliştiren bir müdahale niteliği taşımaktadır.

Dikdörtgen kesite sahip kolonlarda köşe bölgelerinde lifli polimer tabakalarda oluşan yerel zorlanmalar, sargılamanın beton üzerindeki etkisini sınırlayabilmektedir. Bu nedenle dikdörtgen kesitli kolonlarda lifli polimer sargılamanın katkısı, kesit geometrisi dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

Deneyisel çalışmalarda, lifli polimer sargılamanın kolonlarda hasarın yerel yoğunlaşmasını azalttığı ve hasar gelişimini daha yayılı bir biçime dönüştürdüğü rapor edilmiştir (İlki ve diğ., 2008). Sargılı ve sargısız kolonlara ait deney sonu hasar örnekleri Ek A'da sunulmuştur (bkz. Şekil A.2 ve Şekil A.3).

Bu tez kapsamında lifli polimer ile sargılamanın sünekliğe katkısı, betonun basınç davranışında meydana gelen değişimin kesit şekildeğiştirme kapasitesine yansımaları üzerinden ele alınmaktadır. Sargılı beton özellikleri kullanılarak gerçekleştirilen kesit analizlerinden elde edilen süneklik parametreleri, deney bulgularla karşılaştırılarak TBDY (2018) yaklaşımının bu davranış ne ölçüde temsil edebildiği değerlendirilmektedir.



3. TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ-2018'E GÖRE SARGILI KOLONLARDA SÜNEKLİK

3.1 Yönetmelik Yaklaşımı

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018), betonarme elemanların deprem etkileri altındaki davranışını, hedeflenen performans düzeylerine karşılık gelen şekildeğiştirme talepleri ve kapasiteleri üzerinden tanımlamaktadır. Bu çerçevede elemanların deprem performansı, dayanımın ötesinde, hasar gelişimi ile birlikte şekildeğiştirme taleplerini karşılayabilme yetenekleri esas alınarak değerlendirilmektedir. Yönetmelik yaklaşımında süneklik, bağımsız bir tasarım parametresi olarak değil; malzeme davranışı ve kesit tepkisinin doğal bir sonucu olarak ele alınmaktadır.

Bu yaklaşım doğrultusunda lifli polimer ile sargılama, betonarme kolonların deprem davranışını doğrudan tanımlayan bir süneklik büyüklüğü üzerinden değil, betonun basınç altındaki karakteristik özelliklerinin değiştirilmesi yoluyla modele dahil edilmektedir. Sargılamanın etkisi, betonun basınç dayanımı ve ileri şekildeğiştirme sınırlarının yeniden tanımlanmasıyla temsil edilmekte; bu malzeme özellikleri kullanılarak gerçekleştirilen kesit analizleri sonucunda elde edilen moment-eğrilik ilişkileri üzerinden kolonların şekildeğiştirme kapasiteleri belirlenmektedir. Böylece lifli polimer sargılamanın sünek davranışa katkısı, kesit tepkisi üzerinden eleman düzeyine dolaylı olarak yansıtılmaktadır.

3.1.1 Temel varsayımlar

TBDY (2018)'de betonarme kolonların değerlendirilmesinde kullanılan beton ve donatı çeliği malzeme modelleri, Ek 5A bölümünde tanımlanan esaslara dayanmaktadır. Yönetmelikte betonun basınç altındaki davranışı, sargısız ve sargılı durumlar için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi üzerinden tanımlanmakta; bu tanımda betonun elastik davranışı, basınç dayanımı ve nihai şekildeğiştirme kapasitesi temel alınmaktadır. Ek 5A'da verilen beton malzeme modeli, literatürde yaygın olarak kullanılan Mander beton modeli ile benzer bir teorik çerçeveye sahip olmakla birlikte,

tasarım ve değerlendirme amaçlı kullanıma yönelik olarak sadeleştirilmiş ve yönetmeliğe özgü bazı kabuller içermektedir.

Yönetmelikte sargılama etkisi, beton çekirdeği üzerinde oluşan yanıl sınırlandırmanın betonun basınç davranışını değiştirdiği kabulüne dayanmaktadır. Bu yaklaşım, betonun maruz kaldığı etkin yanıl basınç ile basınç dayanımı ve şekildeğiştirme kapasitesindeki artış arasındaki ilişkiyi tanımlayan Richart ve Mander tarafından geliştirilen yanıl sınırlandırma temelli modellere dayanmaktadır. Buna göre sargılı beton modeli, sargısız beton davranışının yatay yönde sağlanan sınırlandırma etkisi dikkate alınarak değiştirilmiş bir uzantısı olarak ele alınmakta; sargılı betonun basınç dayanımı ve nihai birim kısalması, beton çekirdeği üzerinde oluşan etkin yanıl basınca bağlı olarak artırılmaktadır.

Bu çerçevede Ek 5A kapsamında tanımlanan sargılı beton malzeme modeli, yatay donatı oranı, donatı düzeni ve sargılama etkinliğini temsil eden katsayılar esas alınarak belirlenmektedir. Yatay donatı miktarı ve etkinliği, beton çekirdeğinin yanıl yönde genleşmesine karşı sağlanan sınırlandırmayı doğrudan etkilediğinden, bu parametreler betonun basınç altındaki davranışını belirleyen temel girdiler olarak kabul edilmektedir. Sargısız ve sargılı beton davranışları arasındaki temel fark, yönetmelikte verilen temsili gerilme-şekildeğiştirme şeması ile ortaya konulmaktadır.

Bu genel sargılama yaklaşımı, lifli polimer (LP) ile sargılanmış betonarme kolonlar için de temel alınmaktadır. TBDY (2018)'de LP sargılama, beton çekirdeği üzerinde enine donatıya benzer şekilde ilave bir yanıl sınırlandırma sağlayan bir mekanizma olarak ele alınmakta; dolayısıyla LP sargılamanın beton davranışına katkısı, sargılı beton modelinde tanımlanan yanıl basınç kavramı üzerinden temsil edilmektedir. Bu bağlamda lifli polimer sargılama, sargılama etkisinin fiziksel kökenini değiştirmemekte; yalnızca bu etkinin beton çekirdeği üzerinde nasıl ve hangi büyüklükte oluştuğunu belirleyen bir sınırlandırma türü olarak modele dahil edilmektedir.

Lifli polimer tabakaların beton çevresinde sürekli bir sargı oluşturduğu ve basınç etkisi altında betonun yanıl yönde genleşme eğilimine karşı çevresel doğrultuda çekme gerilmeleri taşıdığı kabul edilmektedir. Bu çekme gerilmeleri sonucunda beton çekirdeği üzerinde etkin bir yanıl basınç oluşmakta; söz konusu yanıl basınç, betonun basınç dayanımını ve nihai birim kısalmasını artıran temel etki olarak sargılı beton

malzeme modeline yansıtılmaktadır. Bu yaklaşım, betonun yanal sınırlandırma altındaki davranışını açıklayan Richart ve Mander temelli modeller ile, lifli polimer sargılı beton davranışını inceleyen deneysel çalışmalarla uyumlu bir çerçeve sunmaktadır.

TBDY (2018)'de sargılı betonun basınç davranışı, doğrusal olmayan hesap yöntemleri için iki doğrusal (bilineer) bir gerilme-şekildeğiştirme modeli ile tanımlanmaktadır. Modelin ilk doğrusal kolu, betonun elastik ve erken inelastik davranışını temsil ederken; kırılma noktası, birim kısalmanın 0.002 değerine ulaştığı ve mevcut beton basınç dayanımının elde edildiği nokta olarak kabul edilmektedir. Bu noktadan sonra beton davranışı, lifli polimer sargılamanın sağladığı yanal basınç etkisi altında tanımlanan ikinci doğrusal kol ile temsil edilmektedir.

Lifli polimer sargılamanın sağladığı yanal basınç ve buna bağlı olarak sargılı betonun basınç dayanımındaki artış, yönetmelikte verilen bağıntılar aracılığıyla hesaplanmaktadır. Bu bağıntılar, lifli polimer tabakaların mekanik özellikleri, sargılama oranı ve kesit geometrisinin sargılama etkinliği üzerindeki etkilerini birlikte dikkate almaktadır. Kesit geometrisinin etkisi, özellikle köşeli kesitlerde yanal basıncın kesit çevresinde eşit dağılmadığı kabulüne dayanan şekil etkinlik katsayısı aracılığıyla modele dahil edilmektedir. Bu nedenle yönetmelik, lifli polimer sargılamanın etkin biçimde çalışabilmesi için kesit boyut oranlarına ve köşe yuvarlatma yarıçaplarına ilişkin sınırlamalar öngörmekte; bu koşulları, modelin geçerliliği açısından temel varsayımlar arasında kabul etmektedir.

3.1.2 Yönetmelikte süneklik kavramı

TBDY (2018)'de süneklik, betonarme elemanlar için bağımsız bir tasarım katsayısı olarak tanımlanmamakta; tasarım ve değerlendirme aşamalarında farklı biçimlerde ele alınmaktadır. Normal tasarım sürecinde sünek davranış, taşıyıcı elemanların uygun detaylandırılması, enine donatı düzenlemeleri ve belirli tasarım kabulleri aracılığıyla sağlanmakta; sünekliğin varlığı doğrudan hesaplanan bir büyüklük olarak değil, yönetmelik koşullarının sağlanması yoluyla temin edilmektedir.

Performans değerlendirmesi aşamasında ise süneklik, şekildeğiştirme kapasiteleri üzerinden açık biçimde kontrol edilmektedir. Bu kapsamda beton ve donatıya ait malzeme modelleri esas alınarak kesit düzeyinde moment-eğrilik ilişkileri elde edilmekte; akma ve ileri şekildeğiştirme sınırları tanımlanarak eleman düzeyinde izin

verilen yerdeğiştirme kapasiteleri belirlenmektedir. Elemanların deprem etkileri altındaki yeterliliği, bu kapasitelere karşılık gelen talep-kapasite karşılaştırmaları üzerinden değerlendirilmektedir.

Bu çerçevede TBDY (2018)'de sünelik, tasarım aşamasında detaylandırma ve tasarım ilkeleriyle sağlanan; performans değerlendirmesinde ise şekildeğiştirme kapasiteleri üzerinden nicel olarak kontrol edilen, performans temelli bir büyüklük olarak ele alınmaktadır.

3.2 TBDY (2018)'e Göre LP ile Sargılı Beton Modeli

TBDY (2018)'de sargılı beton davranışı, betonun basınç altındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin, yanal sınırlandırma etkisi dikkate alınarak yeniden tanımlanması esasına dayanmaktadır. Bu yaklaşımda sargılama, betonun basınç dayanımını ve nihai birim kısalmasını artıran bir mekanizma olarak ele alınmakta; sargılı beton özellikleri, kesit analizlerinde doğrudan kullanılacak şekilde malzeme modeli seviyesinde tanımlanmaktadır. Lifli polimer ile sargılama da yönetmelikte bu genel sargılı beton modelinin özel bir uygulaması olarak ele alınmaktadır.

3.2.1 Model parametreleri

TBDY (2018)'de lifli polimer (LP) ile sargılanmış betonarme kolonlar için beton malzeme özellikleri, TBDY (2018) Ek 15B'de tanımlanan esaslara göre belirlenmektedir. Yönetmelikte, LP sargılama etkisi beton çekirdeği üzerinde oluşan ilave yanal basınç üzerinden temsil edilmekte; bu etki, sargılı beton dayanımı ve nihai birim kısalmanın artırılması yoluyla beton malzeme modeline dahil edilmektedir.

LP ile sargılanmış beton için eksenel basınç dayanımı, sargısız beton dayanımı f_{cm} esas alınarak TBDY (2018) Denklem 15B.5 ile tanımlanmaktadır (denklem 3.1):

$$f_{cc} = f_{cm} \left[1 + 2.4 \left(\frac{f_l}{f_{cm}} \right) \right] \geq 1.2 f_{cm} \quad (3.1)$$

Bu bağıntıda f_{cc} , LP ile sargılanmış betonun basınç dayanımını; f_{cm} , sargılanmamış betonun mevcut basınç dayanımını; f_l ise lifli polimer sargılamanın sağladığı etkin yanal basınç miktarını temsil etmektedir. Yönetmelikte Denklem 15B.5, betonun yanal sınırlandırma altındaki basınç dayanımı artışını tanımlayan Richart temelli deneysel ilişkilerin, LP sargılamaya uyarlanmış bir ifadesi niteliğindedir.

LP sargılamının sağladığı etkin yanal basınç f_l , denklem 3.2 (TBDY (2018) Denklem 15B.6) yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$f_l = \frac{1}{2} \kappa_a \rho_f \varepsilon_f E_f \quad (3.2)$$

Burada E_f lifli polimerin elastisite modülünü, ε_f etkin lif birim uzamasını, ρ_f lifli polimer hacimsel oranını ve κ_a kesit şekil etkinlik katsayısını ifade etmektedir. TBDY (2018) Denklem 15B.6, lifli polimer tabakaların çevresel doğrultuda çekme gerilmesi taşıdığı ve bu çekme etkisinin beton çekirdeği üzerinde ortalama bir yanal basınca dönüştüğü varsayımına dayanan ince cidarlı basınç kabuğu yaklaşımı ile uyumludur.

Kesit şekil etkinlik katsayısı κ_a , LP sargılamının beton çekirdeği üzerinde oluşturduğu yanal basıncın kesit çevresinde eşit dağılmadığı gerçeğini dikkate almak amacıyla tanımlanmıştır. Bu katsayı, dikdörtgen kesitler için denklem 3.3'te verilen bağıntılarla belirlenmektedir (TBDY (2018) Denklem 15B.7):

$$\kappa_a = 1 - \frac{(b - 2r_c)^2 + (h - 2r_c)^2}{3bh} \quad (3.3)$$

Bu ifadelerde b ve h dikdörtgen kesitlerde kısa ve uzun kenar boyutlarını, eliptik kesitlerde kısa ve uzun eksen boyutlarını; r_c ise köşeli kesitlerde köşelerde yapılan yuvarlatmanın yarıçapını temsil etmektedir. Bu katsayı, etkin LP ile sargılanmış beton çekirdeği alanının, toplam kesit alanına oranını ifade eden bir indirgeme katsayısı olarak yorumlanmaktadır.

LP ile sargılanmış kolonlarda sünekliğin artırılması amacıyla, betonun maksimum basınç birim şekildeğiştirmesini de yönetmelikte ayrı bir bağıntı ile tanımlanmaktadır. Buna göre LP sargılaması uygulanmış beton maksimum basınç birim şekildeğiştirmesi ε_{cu} , denklem 3.4 ile hesaplanmaktadır (TBDY (2018) Denklem 15B.8):

$$\varepsilon_{cu} = 0.002 \left[1 + 15 \left(\frac{f_l}{f_{cm}} \right)^{0.75} \right] \quad (3.4)$$

Bu bağıntı, LP sargılamının betonun yalnızca basınç dayanımını değil, aynı zamanda ileri şekildeğiştirme kapasitesini de artırdığını kabul eden deneysel gözlemlere dayanmaktadır. Denklem 3.4 ile elde edilen nihai birim kısalma değeri, kesit analizlerinde beton malzeme modelinin ileri şekildeğiştirme sınırının tanımlanmasında kullanılmaktadır.

Bu denklemler birlikte değerlendirildiğinde, TBDY (2018)'de lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonların sünek davranışı; betonun basınç dayanımı ve nihai birim kısalmasındaki artış üzerinden, doğrudan beton malzeme modeline entegre edilmektedir. Böylece LP sargılamanın sünekliğe katkısı, ayrı bir süneklik katsayısı tanımlanmaksızın, kesit düzeyinde elde edilen şekil değiştirme kapasitelerine dolaylı olarak yansıtılmaktadır.

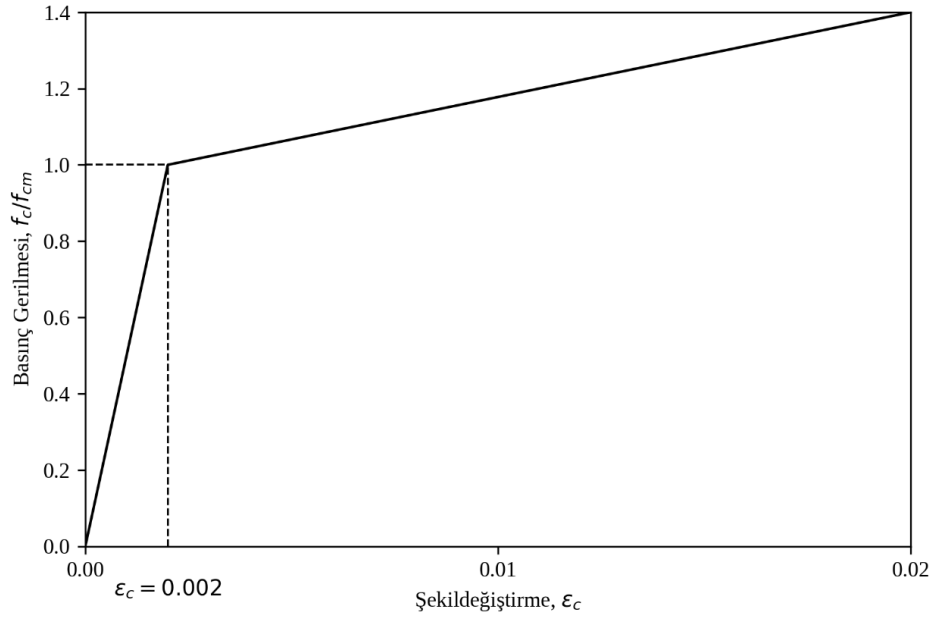
3.2.2 Gerilme-şekil değiştirme eğrisi

TBDY (2018)'de lifli polimer (LP) ile sargılanmış betonarme elemanlar için betonun basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışı, Ek 15B'de tanımlanan esaslar doğrultusunda idealize edilmektedir. Yönetmelikte LP sargılamanın etkisi, beton malzeme modeline doğrudan yansıtılmakta ve bu etki, kesit analizlerinde kullanılmak üzere temsili bir gerilme-şekil değiştirme eğrisi ile ifade edilmektedir (Şekil 3.1).

Yönetmelik kapsamında doğrusal olmayan hesap yöntemleri için LP ile sargılanmış beton için basınç davranışı, iki doğrulu (iki parçalı doğrusal) bir idealizasyon ile tanımlanmaktadır. İlk doğrusal kol, betonun elastik ve erken inelastik davranışını temsil etmekte; birim şekil değiştirmenin $\varepsilon_c = 0.002$ değerine ulaştığı noktada mevcut beton basınç dayanımının elde edildiği kabul edilmektedir. Bu nokta, LP sargılı beton için gerilme-şekil değiştirme eğrisinin kırılma noktası olarak tanımlanmaktadır (TBDY (2018), Ek 15B).

Bu noktadan sonra beton davranışı, LP sargılamanın sağladığı yanal sınırlandırma etkisi dikkate alınarak tanımlanan ikinci doğrusal kol ile temsil edilmektedir. İkinci doğrusal kol, betonun LP sargılama ile artan basınç dayanımını ve denklem 3.4 ile belirlenen nihai birim kısalma değerine kadar süren ileri şekil değiştirme kapasitesini ifade etmektedir. Böylece LP sargılamanın sünekliğe katkısı, betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisinin ileri şekil değiştirme bölgesine doğru uzaması şeklinde modele yansıtılmaktadır.

Bu temsili gerilme-şekil değiştirme eğrisi, LP ile sargılanmış betonarme kolonlar için TBDY (2018) kapsamında kullanılan beton malzeme modelinin temelini oluşturmakta ve izleyen aşamalarda gerçekleştirilen kesit analizlerinde moment-eğrilik ilişkilerinin elde edilmesinde doğrudan kullanılmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : LP ile sargılanmış beton için temsili gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.

3.2.3 Sınırlamalar

TBDY (2018)'de lifli polimer kompozitlerin kullanımı, farklı başlıklar altında farklı güçlendirme amaçları için ele alınmaktadır. Yönetmelikte LP sistemleri; uygun detaylandırma ve uygulama koşulları sağlandığında, kesme kapasitesinin artırılması, sargılama yoluyla beton davranışının iyileştirilmesi veya belirli yerel yetersizliklerin giderilmesi amacıyla kullanılabilir. Yönetmelikte Ek 15B.2 kapsamında tanımlanan LP ile sargılama modeli, özellikle kolonların eksenel basınç altındaki beton davranışını ve buna bağlı süneklik kapasitesini temsil etmeye yöneliktir. Bu çalışmada da LP sargılama, yönetmelikte tanımlandığı biçimiyle, kolonların eksenel basınç davranışını geliştiren bir müdahale olarak ele alınmıştır.

Geometrik açıdan, lifli polimer sargılamanın geçerli kabul edilebilmesi için kolon kesit oranlarına ve detaylandırmaya ilişkin belirli sınırlamalar bulunmaktadır. Özellikle köşeli kesitlerde sargılama etkinliğinin sağlanabilmesi amacıyla, köşelerin yönetmelikte tanımlanan minimum yuvarlatma yarıçapı ile yuvarlatılması gerekmektedir. Yuvarlatma yapılmayan veya yetersiz yuvarlatılmış köşelerde lifli polimer tabakalarda yerel zorlanmaların oluşabileceği ve bu durumun beton çekirdeği üzerinde oluşan etkin yanıl basıncı azaltılabileceği kabul edilmektedir. Benzer şekilde, kesit boyut oranlarının artmasıyla birlikte lifli polimer sargılamanın beton çekirdeği

üzerinde düzgün ve süreklilik gösteren bir sınırlandırma etkisi oluşturması güçleşmektedir. Bu nedenle TBDY (2018) Ek 15B.3'te, lifli polimer ile sargılama uygulamalarının uzun kenarın kısa kenara oranı 2.5'ten küçük olan kolon kesitleri için geçerli olduğu belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında da, yönetmelik yaklaşımıyla uyumlu olacak şekilde, en-boy oranı 1 ile 2 arasında değişen kolonlara ait deneysel çalışma sonuçları dikkate alınmıştır.

Malzeme modeli açısından, LP ile sargılanmış betonun basınç davranışı iki doğrulu (bilineer) bir gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi ile temsil edilmektedir. Bu sadeleştirilmiş yaklaşım, betonun sargılama etkisi altındaki gerçek doğrusal olmayan davranışını idealize edilmiş bir biçimde yansıtmakta; çevrimsel yükleme altında rijitlik ve dayanımda meydana gelen ilerleyici bozulmalar ile hasar birikimini açıkça modellememektedir. Bu nedenle hesaplanan basınç dayanımı ve nihai birim kısalma değerleri, tasarım ve performans değerlendirmeleri için güvenli tarafta kalan temsili büyüklükler olarak yorumlanmalıdır.

Ayrıca yönetmelik yaklaşımı, LP sargılamanın beton çekirdeği üzerinde oluşturduğu etkin yanal basıncın kolon boyunca sabit olduğu varsayımını benimsemektedir. Gerçekte ise bu etkinlik; sarım sayısı, lif yönlenmesi, ankraj detayları ve uygulama kalitesine bağlı olarak kolon boyunca değişkenlik gösterebilir. Bu tür yerel etkiler, TBDY (2018)'de tanımlanan beton malzeme modeli kapsamında açık biçimde temsil edilmemektedir.

Sonuç olarak TBDY (2018)'de lifli polimer ile sargılama, kolonların eksenel basınç dayanımının artırılması ve buna bağlı sünek davranışın geliştirilmesi amacıyla tanımlanmış, belirli varsayımlar altında geçerli bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır. Bu model, kesit ve eleman düzeyinde süneklik değerlendirmelerine olanak sağlamakta; ancak sonuçların yorumlanmasında, yönetmelikte benimsenen sadeleştirilmiş kabuller ve uygulama sınırları dikkate alınmalıdır.

4. LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALARIN DERLENMESİ

4.1 Literatür Çalışması Kapsamı

Bu tez kapsamında yapılan değerlendirmeler, sabit eksenel yük ve tersinir-tekrarlı yatay yükleme altında deneysel olarak test edilmiş lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonlara ait veriler esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Literatür çalışmasının amacı, kolon sünekliğinin nicel olarak karşılaştırılmasına olanak sağlayacak tutarlı bir deneysel veri setinin oluşturulmasıdır.

Bu amaç doğrultusunda literatür taraması, kolon davranışını doğrudan temsil eden ve deneysel sonuçları yeterli ayrıntı düzeyinde rapor edilen çalışmalarla sınırlandırılmıştır. Kolon geometrisi, beton ve donatıya ait malzeme özellikleri, lifli polimer sargılama düzeni, eksenel yük düzeyi ve yükleme protokolü gibi temel parametrelerin açık biçimde sunulmuş olması, çalışmaya dahil edilmenin ön koşulu olarak kabul edilmiştir. Bu bilgiler, deneysel yük-yerdeğiştirme ilişkilerinden süneklik göstergilerinin yeniden tanımlanabilmesi ve TBDY (2018) esaslarına göre gerçekleştirilen kesit analizlerinin sağlıklı biçimde yürütülebilmesi açısından gerekli görülmüştür.

Bu çerçevede oluşturulan veri seti, lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonların süneklik davranışını etkileyen temel parametrelerin birlikte değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Deneysel veriler, izleyen bölümlerde deneysel süneklik göstergilerinin tanımlanmasında ve TBDY (2018)'e göre hesaplanan süneklik parametreleri ile yapılacak karşılaştırmalarda kullanılmıştır.

4.1.1 Tarama kriterleri ve sınırlamalar

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen literatür taramasında, lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonların süneklik davranışını değerlendirmeye olanak sağlayacak deneysel çalışmalar hedeflenmiştir. Bu amaçla incelenen bilimsel çalışmalar arasından, belirlenen seçim ölçütlerini sağlayan yedi çalışma veri setine dahil edilmiştir. İncelenen çalışmaların önemli bir bölümü, karşılaştırılabilir ve temsil

edici bir değerlendirme yapılmasını güçleştiren çeşitli nedenlerle kapsam dışında bırakılmıştır.

Çalışma, mevcut yapı stokunda yaygın olarak kullanılan dikdörtgen kesitli betonarme kolonlar ile sınırlandırıldığından, dairesel kesitli numuneler kapsam dışı bırakılmıştır. Aynı zamanda yönetmelikte belirtilen en-boy oranını sağlayan çalışmalar dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, yalnızca eksenel yük altında test edilen veya değişken eksenel yük koşulları altında gerçekleştirilen deneyler de, deprem etkilerini temsil eden tersinir-tekrarlı yatay yükleme koşullarını sağlamadıkları gerekçesiyle değerlendirme dışı tutulmuştur.

Deney öncesinde halihazırda iyi düzeyde sargılanmış ve süneklik kapasitesi yüksek kolonların lifli polimer ile güçlendirilerek test edildiği çalışmalar, lifli polimer sargılamasının süneklik üzerindeki etkisinin net biçimde ayrıştırılamadığı gerekçesiyle kapsam dışında bırakılmıştır. Yüksek dayanımlı beton kullanılarak gerçekleştirilen deneyler de, mevcut betonarme yapı stokunu temsil etme düzeyi sınırlı olduğu için veri setine alınmamıştır.

Boyuna donatı bindirme boyu yetersiz olan kolonlar, korozyona uğramış kolonlar veya hasar görmüş ve sonradan onarılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler değerlendirme dışı bırakılmıştır. Bu tür çalışmalarda lifli polimer sargılamasının etkisinin, donatı detaylandırması, korozyon durumu veya onarım müdahaleleri ile birlikte ortaya çıktığı ve bu durumun süneklik davranışının doğrudan yorumlanmasını güçleştirdiği kabul edilmiştir. Aynı gerekçeyle lifli polimer sargılamaya ek olarak çelik elemanlar veya ilave enine donatı ile birlikte güçlendirilmiş kolonlar da veri setine dahil edilmemiştir.

Önüretimli lifli polimer kullanılarak gerçekleştirilen deneyler ile lifli polimer özellikleri, beton dayanımı veya donatı bilgileri gibi temel karakteristik parametreleri yeterli ayrıntı düzeyinde raporlanmamış çalışmalar da kapsam dışında bırakılmıştır. Bu tür eksikliklerin, deneysel süneklik göstergilerinin yeniden tanımlanmasını ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) esaslarına göre yapılacak kesit analizlerini güvenilir olmaktan uzaklaştıracağı değerlendirilmiştir.

Veri setine dahil edilen çalışmalarda yer alan tüm kolon numuneleri doğrudan kullanılmamıştır. Aynı çalışmada bulunan bindirmeli donatı detayı içeren, korozyona uğramış, onarılmış veya sonradan güçlendirilmiş kolonlar veri setinden çıkarılmış;

yalnızca bu tezin amacıyla uyumlu olan ve süneklik davranışı lifli polimer sargılama etkisi üzerinden değerlendirilebilen numuneler seçilmiştir. Çalışma kapsamında sargılanmamış referans kolonlar incelenmemiş, değerlendirmeler yalnızca lifli polimer ile sargılanmış kolonlar üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Bu eleme ve seçim süreci sonucunda oluşturulan veri seti, lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonların süneklik davranışını etkileyen temel parametrelerin karşılaştırılabilir ve tutarlı bir çerçeve içinde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

4.1.2 Süneklik ölçütleri

Betonarme kolonların deprem etkileri altındaki davranışının değerlendirilmesinde süneklik, elemanın taşıma gücünde belirgin bir azalma oluşmadan geliştirebildiği şekildeğiştirme kapasitesini nicel olarak ifade eden temel bir ölçüt olarak kullanılmaktadır. Literatürde süneklik kavramı, yerdeğiştirme, eğrilik veya plastik dönme gibi farklı büyüklükler üzerinden tanımlanabilmektedir. Bu tanımların tercih edilmesi, kullanılan deneysel düzen, ölçülebilen büyüklükler ve değerlendirme yaklaşımı ile ilişkilidir.

Bu tez kapsamında oluşturulan veri setinde yer alan deneysel çalışmalarda süneklik değerlendirmesi, yerdeğiştirme temelli büyüklükler üzerinden yapılmıştır. Veri setine dahil edilen çalışmalarda betonarme kolonlar, sabit eksenel yük altında tersinir-tekrarlı yatay yüklemeye maruz bırakılmış; deney süresince kolon üst noktasındaki yatay yerdeğiştirmeler ölçülerek yük-yerdeğiştirme ilişkileri elde edilmiştir. Bu çerçevede süneklik, akma durumuna karşılık gelen yerdeğiştirme ile nihai şekildeğiştirme düzeyine karşılık gelen yerdeğiştirme arasındaki oran olarak ifade edilmiştir.

Yerdeğiştirme temelli süneklik tanımlarında, maksimum yerdeğiştirme düzeyinin belirlenişi deneysel çalışmalarda farklı biçimlerde ele alınabilmektedir. Lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonlara ilişkin çalışmalarda bu sınır, kolon davranışını temsil eden farklı fiziksel göstergeler esas alınarak tanımlanmıştır. Bazı çalışmalarda maksimum yerdeğiştirme, beton basınç bölgesinde ezilmenin belirginleştiği ve kesitin ileri şekildeğiştirme kapasitesine ulaştığı sınır durum ile ilişkilendirilmiştir. Bazı çalışmalarda kolonun yatay yük taşıma kapasitesinin pik değere ulaştıktan sonra belirli bir oranda (örneğin %20) azaldığı ve post-pik davranışın belirginleştiği yerdeğiştirme düzeyi nihai sınır olarak kabul edilmiştir. Bunun yanı sıra, lifli polimer sargının

kopması veya kırılması anına karşılık gelen yerdeğiştirme değerinin nihai sınır olarak alındığı çalışmalar da bulunmaktadır. Bu farklı yaklaşımlar, lifli polimer ile sargılanmış kolonların deneysel davranışının yorumlanmasında kullanılan sınır durumların çeşitliliğini yansıtmaktadır.

Bu tez kapsamında sűneklik değerlendirmesi, deneysel çalışmalarda elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri esas alınarak yapılmış; maksimum yerdeğiştirme dűzeyleri, veri setinin tamamı için karşılaştırılabilir ve tutarlı bir değerlendirme sağlayacak biçimde ele alınmıştır. Bűylece deneysel sonuçlar, yönetmelik esaslı hesaplarla aynı dűzlemde değerlendirilebilir hale getirilmiştir.

4.2 Kullanılan Deneysel Veri Seti

Bu çalıřmada kullanılan deneysel veri seti, literatűrden seçilen 7 çalıřmaya ait 29 lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolon numunesinden oluřturulmuřtur. Veri seti, mevcut yapı stokunda yaygın olarak kullanılan dikdűrtgen kesitli kolonları kapsamaktadır. Deęerlendirmeler yalnızca lifli polimer ile sargılanmış numuneler űzerinden yűrűtűlműř; sargısız referans numuneler veri setine dahil edilmemiřtir. Veri setinde yer alan tűm temel geometri, malzeme ve sargılama bilgileri, kaynak çalıřmalarda raporlandığı řekliyle derlenmiş ve ilerleyen bűlűmlerde yapılan kesit analizlerinde doęrudan girdi olarak kullanılmıştır.

İncelenen deneysel çalıřmalarda kolonlar çoęunlukla konsol dűzeninde, sabit eksenel basınç yűkű altında tersinir-tekrarlı yatay yerdeğiřtirme çevrimleri ile denenmiştir. Tipik bir deney dűzeneęi Ek A'da sunulmuřtur (Iacobucci ve dię., 2003; bkz. řekil A.1).

4.2.1 Kesit geometrisi ve malzeme űzellikleri

Bu alışma kapsamında oluşturulan deneysel veri setinde yer alan kolonlara ait temel kesit geometrisi ve malzeme űzellikleri, literatűr çalışmalarında raporlandığı şekliyle derlenmiş ve değerlendirmeye esas alınmıştır. İncelenen kolonlar, mevcut betonarme yapı stokunda yaygın olarak karşılaşılan dikdűrtgen kesitli kolonları temsil edecek biçimde seçilmiştir.

Veri setindeki kolonlara ait kesit boyutları, beton dayanımı, donatı űzellikleri ve lifli polimer sargılamaya ilişkin temel mekanik parametrelerin aralıkları izelge 4.1'de

özetlenmiştir. Çizelgede verilen değerler, veri setine dahil edilen 29 kolon numunesi için en küçük ve en büyük değerleri göstermekte olup, veri setinin kapsadığı parametre aralığını ortaya koymaktadır. Bu sayede, ilerleyen bölümlerde gerçekleştirilen kesit analizlerinde kullanılan geometrik ve malzeme özelliklerinin hangi aralıklarda değiştiği açık biçimde izlenebilmektedir.

İncelenen 29 kolon numunesinin 22'sinde karbon esaslı, 7'sinde ise cam esaslı lifli polimer sargılama uygulanmıştır. Lifli polimer sargılamaya ilişkin tabaka sayısı, tabaka kalınlığı, elastisite modülü ve kopma birim şekildeğiştirmesi gibi temel malzeme özellikleri Çizelge 4.1'de sayısal aralıklar halinde verilmiş olup, bu bilgiler ilerleyen aşamalarda sargılı beton malzeme modellerinin oluşturulmasında ve kesit analizlerinin gerçekleştirilmesinde doğrudan girdi olarak kullanılmıştır.

Çizelge 4.1 : Veri setindeki kolonlara ait kesit geometrisi ve LP malzeme özellikleri.

Özellik	Birim	En az	En fazla
Kesit genişliği	mm	200	500
Kesit yüksekliği	mm	200	500
Köşe yuvarlatma yarıçapı	mm	16	30
Beton basınç dayanımı	MPa	11.4	44.2
Boyuna donatı oranı	-	0.008	0.040
Boyuna donatı çapı	mm	14.0	19.5
Enine donatı çapı	mm	6	10
Enine donatı aralığı	mm	150	300
LP türü	-	Karbon	Cam
LP tabaka sayısı	-	1	6
LP tabaka kalınlığı	mm	0.111	1.250
LP elastisite modülü	MPa	21346	252000
LP kopma birim şekildeğiştirmesi	-	0.0126	0.0310

Veri setinde yer alan kolon numunelerine ait etriye düzenleri ve konfigürasyonları, analitik değerlendirmede dikkate alınan enine donatı özelliklerini özetlemek amacıyla Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2 : Veri setindeki kolonlara ait etriye konfigürasyonları.

Etriye tipi	Kol sayısı	Etriye çapı (mm)	Etriye aralığı (mm)
1	2	8	150
2	2	8	200
3	2	6	200
4	3.4	9	300
5	2	10	200

4.2.2 Sargılama detayları

İncelenen kolonlarda lifli polimer sargılama, kolonların alt bölgesinde, plastik şekildeğiştirmelerin yoğunlaştığı bölgeleri kapsayacak biçimde uygulanmıştır. Sargılama düzeni ve uzunluğu çalışmadan çalışmaya farklılık göstermekle birlikte, tüm numunelerde sargılama kolon kesitini çevresel yönde saracak şekilde gerçekleştirilmiştir. Lifli polimer sargılama, bazı numunelerde kolon boyunca sürekli olarak, bazı numunelerde ise belirli genişlik ve aralıklara sahip şeritler halinde uygulanmıştır.

Kullanılan lifli polimer tabaka sayısı 1 ile 6 arasında değişmektedir. Lifli polimere ait tabaka kalınlığı, elastisite modülü ve kopma birim şekildeğiştirmesi gibi mekanik özellikler, her bir numune için literatürde raporlanan değerler esas alınarak değerlendirmeye alınmıştır.

Dikdörtgen kesitli kolonların tamamında köşe yuvarlatma uygulanmış olup, yuvarlatma yarıçapları kaynak çalışmalarda verilen değerler doğrultusunda dikkate alınmıştır. Köşe yuvarlatma uygulaması, yerel zorlanmaları sınırlayan bir detay olarak veri setinde yer almaktadır.

İncelenen numunelerde lifli polimer sargılamaya ek olarak herhangi bir çelik sargı, ilave enine donatı veya farklı bir güçlendirme yöntemi kullanılmamıştır. Bu nedenle kolon davranışı, yalnızca lifli polimer sargılamasının etkisini yansıtacak biçimde elde edilmiştir. Sözkonusu sargılama detaylarına ilişkin deneysel bilgiler Ek A’da paylaşılmıştır.

4.2.3 Yükleme ve deney koşulları

Veri setine dahil edilen kolon numuneleri, deprem etkilerini temsil edecek biçimde sabit eksenel yük altında tersinir-tekrarlı yatay yerdeğiştirme çevrimleri ile deneye tabi tutulmuştur. Deneylerde kolon davranışı, üst uçtan uygulanan yatay yerdeğiştirmeler altında ölçülen yük-yerdeğiştirme ilişkileri üzerinden izlenmiştir. Bu yaklaşım, kolonların çevrimsel davranışı, dayanım ve rijitlik değişimleri ile ileri şekildeğiştirme kapasitelerinin eleman düzeyinde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Deney düzenine, eksenel yük uygulamasına ve yükleme esaslarına ilişkin temel bilgiler Çizelge 4.3’te özetlenmiştir. Çizelgede verilen aralıklar, veri setine dahil

edilen tüm numuneler dikkate alınarak belirlenmiş olup, deney koşullarının genel çerçevesini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.3 : Yükleme ve deney koşulları.

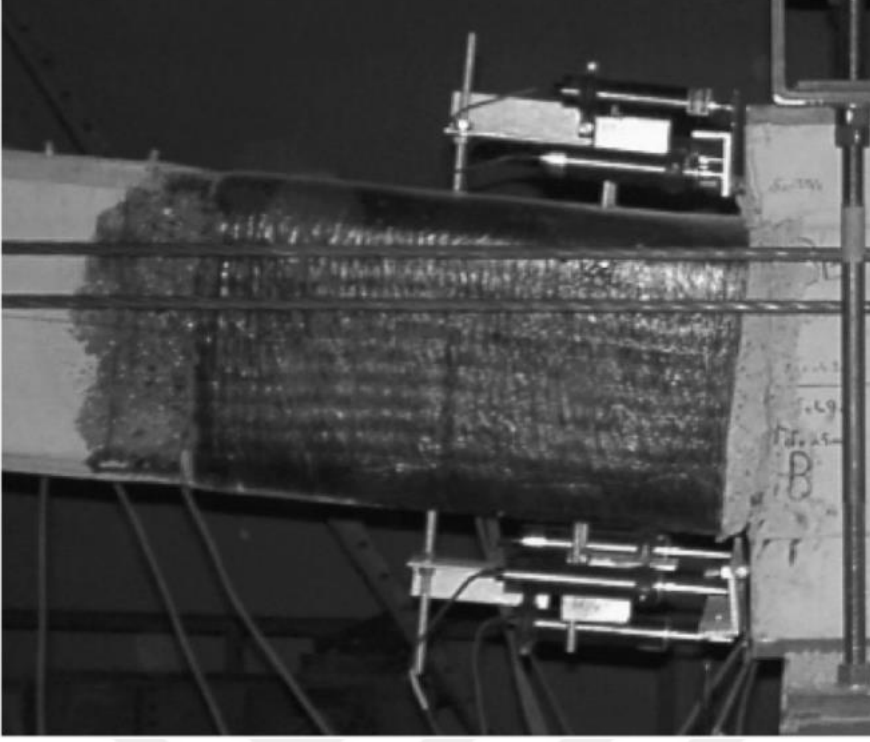
Deney koşulu	Açıklama/aralık
Deney düzeni	Konsol kolon düzeni
Yükleme türü	Tersinir-tekrarlı yatay yerdeğiştirme çevrimleri
Eksenel yük uygulaması	Sabit eksenel basınç yükü
Yatay yük uygulama noktası	Kolon üst ucu
Göçme mekanizması	Eğilme
Eksenel yük oranı	0.10 - 0.65
Kolon toplam boyu	0.60 - 2.00 m
Sargılanmış kolon boyu	0.50 - 0.61 m

4.3 Deneysel Çıktılar

Deneysel çalışmalarda kolon davranışı, sabit eksenel yük altında uygulanan tersinir-tekrarlı yatay yerdeğiştirme çevrimleri sırasında elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri üzerinden raporlanmıştır. Bu çalışmada deneysel çıktılar, kolonların maksimum yerdeğiştirme kapasiteleri ve/veya yerdeğiştirme temelli süneklikleri esas alınarak değerlendirilmiştir.

Deneysel süneklik değerleri, yük-yerdeğiştirme eğrilerinden türetilen akma ve maksimum yerdeğiştirme düzeyleri kullanılarak tanımlanmış; farklı çalışmalardaki tanım farklılıkları tutarlı bir değerlendirme çerçevesi içinde yeniden ele alınmıştır. Bu çıktılar, izleyen bölümde TBDY (2018)'e göre hesaplanan yerdeğiştirme temelli süneklik değerleri ile karşılaştırmada referans olarak kullanılmıştır. Eksenel ve çevrimsel yük altında yapılan deneyler sonucunda lifli polimer ile sargılı kolonda tipik bir hasar durumu Şekil 4.1'de verilmiştir (İlki ve diğ., 2008).

İncelenen kolonlara ait deneysel sonuçlar ve temel özellikler Ek A'da sunulmuştur.



Şekil 4.1 : Numunelerde yaygın görülen hasar durumu (İlki ve diğ., 2008).

5. ANALİTİK HESAPLAR VE ELDE EDİLEN SONUÇLARIN LİTERATÜR VERİLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonların süneklik davranışı, literatürde rapor edilen deneysel sonuçlar ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) esaslarına göre elde edilen analitik sonuçlar üzerinden karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar, kolonların deprem etkileri altındaki davranışını temsil eden yerdeğiştirme temelli süneklik büyüklükleri esas alınarak, eleman düzeyinde gerçekleştirilmiştir.

5.1 Analitik Hesap Yöntemi ve Esasları

TBDY (2018) kapsamında betonarme kolonların performansı, kesit düzeyinde tanımlanan beton ve donatıya ait birim şekildeğiştirme sınırları esas alınarak değerlendirilmektedir. Bu sınır değerler, plastik mafsallı kabulleri ve temel geometrik dönüşüm ilişkileri yardımıyla eleman düzeyindeki yerdeğiştirme kapasitelerine dönüştürülebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan yığılı plastik mafsallı kabulünde, elemanın doğrusal olmayan davranışının sınırlı bir bölgede yoğunlaştığı varsayılmıştır. Plastik mafsallı boyu L_p , TBDY (2018)'e uygun olarak, çalışan doğrultudaki kesit boyutunun yarısı olarak kabul edilmiştir.

Çalışmada, lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonların davranışı, yönetmelikte tanımlanan doğrusal olmayan malzeme modelleri kullanılarak kesit düzeyinde incelenmiştir. Bu doğrultuda, sargılı beton ve donatı çeliği için öngörülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri kullanılarak her bir kolon kesiti için moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiştir.

Kesit analizlerinde, kesit boyunca doğrusal olmayan davranışı temsil edebilmek amacıyla tam integrasyon yaklaşımı benimsenmiştir. Bu sayede, beton ve donatının hem basınç hem çekme altındaki doğrusal olmayan tepkileri dikkate alınmış ve eğrilik artışı ile birlikte kesitin etkin rijitliğinde meydana gelen değişim hesaplara

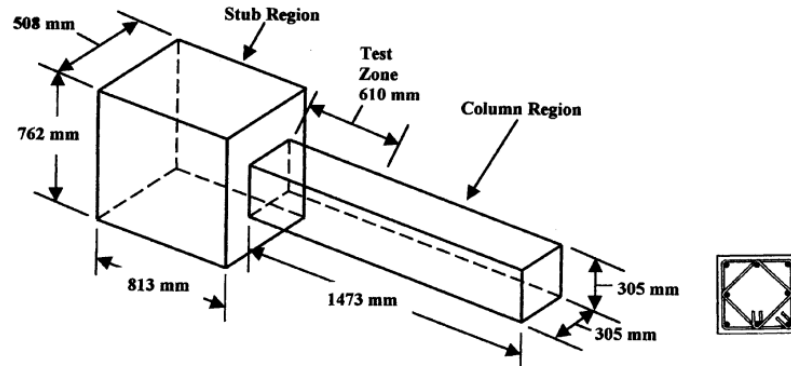
yansıtılmıştır. Elde edilen moment-eğrilik ilişkileri üzerinden kesit düzeyinde akma ve maksimum durumlara karşılık gelen eğrilik değerleri belirlenmiştir.

Maksimum eğrilik tanımında, yalnızca betonun sınır birim kısalması değil, kesitte yer alan tüm malzemelerin davranışı birlikte değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, beton veya donatıdan hangisi tanımlanan sınır birim şekildeğiştirmeye önce ulaşıyorsa, o duruma karşılık gelen eğrilik değeri kesitin nihai eğriliği olarak kabul edilmiştir. Veri seti kapsamındaki tüm kolonlar için gerçekleştirilen analitik değerlendirmelerde, sargılı betonun birim kısalma sınırına donatı çeliğinin birim uzama sınırından önce ulaştığı görülmüştür. Bu doğrultuda, tüm kesitler için bu duruma karşılık gelen eğrilik değeri maksimum eğrilik olarak esas alınmıştır.

Kesit düzeyinde elde edilen eğrilik kapasiteleri, plastik mafsal yaklaşımı ve temel geometrik dönüşüm kabulleri kullanılarak eleman düzeyine aktarılmıştır. Böylece kolonlara ait akma ve maksimum yerdeğiştirme değerleri hesaplanmış ve süneklik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu aşamada, yönetmelikte verilen dönme bağıntıları yerine, daha tutarlı bir karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla temel geometrik kabullere dayalı dönüşüm ilişkileri tercih edilmiştir.

5.2 Analitik Hesap Örneği

Bu bölümde, TBDY (2018) esaslarına göre gerçekleştirilen analitik hesap sürecinin daha açık biçimde gösterilebilmesi amacıyla, Iacobucci ve diğ. (2003) tarafından test edilen ASC-2NS numunesi üzerinden örnek bir hesap sunulmuştur. Örnek kapsamında, numuneye ait kesit geometrisi, donatı düzeni, lifli polimer özellikleri ve yükleme koşulları esas alınarak sargılı beton parametreleri hesaplanmış; bu parametreler kullanılarak SAP2000 (2024) ortamında malzeme modeli tanımlanmış ve moment-eğrilik ilişkisi elde edilmiştir. Daha sonra, elde edilen eğrilik büyüklükleri plastik mafsal kabulü ve temel geometrik dönüşüm kabulleri yardımıyla eleman düzeyindeki yerdeğiştirme büyüklüklerine dönüştürülmüş ve numunenin yer değiştirme sünekliği hesaplanmıştır. Deneydeki kolon numunesi ve kesit geometrisine ait detayları gösteren çizim Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Kolon numunesi ve kesit geometrisi (Iacobucci ve diğ., 2003).

ASC-2NS numunesine ait kesit geometrisi ile beton ve donatı çeliğine ilişkin temel malzeme özellikleri Çizelge 5.1’de sunulmuştur. Çizelgede, numunenin mevcut beton basınç dayanımı, boyuna ve enine donatı düzeni ile kesit geometrisine ait temel parametreler bir arada verilmiştir. Bu büyüklükler, kesitin tanımlanması ve analitik değerlendirme sürecinin başlangıç girdilerini oluşturmaktadır.

Çizelge 5.1 : ASC-2NS kolonuna ait kesit geometrisi ve malzeme özellikleri.

f_{cm} (MPa)	f_{ym} (MPa)	f_{ywm} (MPa)	b (mm)	h (mm)	r_c (mm)	Enine donatı			Boyuna donatı		
						n	Φ (mm)	s	n	Φ (mm)	ρ (%)
36.5	465	457	305	305	16	3.41	9.5	300	8	19.5	2.6

Numunede kullanılan lifli polimer sargılamaya ait mekanik ve geometrik özellikler ayrı olarak Çizelge 5.2’de verilmiştir. Bu kapsamda LP malzemesinin elastisite modülü, kopma birim uzaması, tabaka kalınlığı ve sargılama konfigürasyonuna ilişkin parametreler sunulmuştur. Söz konusu özellikler, TBDY (2018) kapsamında sargı etkisinin belirlenmesinde ve sargılı beton parametrelerinin hesaplanmasında doğrudan kullanılmıştır.

Çizelge 5.2 : ASC-2NS kolonuna ait LP konfigürasyonu ve malzeme özellikleri.

LP türü	E_f (MPa)	ϵ_{fu}	t_f (mm)	w_f (mm)	s_f (mm)	n_f (mm)
Karbon	76350	0.0126	1	tam sargı	-	1

ASC-2NS numunesine ait deney koşulları kapsamında, analizlerde kullanılan eksenel yük değeri $N = 1290$ kN olarak alınmıştır. Bu yük düzeyine karşılık gelen eksenel yük oranı $\nu = 0.38$ olup, bu oran eksenel yükün kesitin beton basınç kapasitesine oranı olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, kolonun serbest boyu $L_s = 1473$ mm olarak dikkate alınmış ve eleman düzeyindeki yerdeğiştirme hesaplarında geometrik parametre olarak kullanılmıştır.

Numuneye ait kesit, donatı ve lifli polimer özellikleri kullanılarak TBDY (2018) kapsamında sargılı beton davranışını tanımlayan parametreler hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda kullanılan bağıntılar ve izlenen yöntem, Bölüm 4'te detaylı olarak sunulmuştur. Bu kapsamda, lifli polimer hacimsel oranı ρ_f , kesit şekil etkinlik katsayısı κ_a , etkin yanal basınç f_l , sargılı beton basınç dayanımı f_{cc} ve maksimum basınç birim şekildeğiştirmesi ε_{cc} belirlenmiştir.

Söz konusu parametrelerin belirlenmesinde, lifli polimerin etkin birim uzaması ε_f belirleyici bir rol oynamaktadır. Etkin lifli polimer birim uzaması, sargılama basıncının büyüklüğünü doğrudan etkileyerek sargılı betonun hem dayanımını hem de nihai birim şekildeğiştirme kapasitesini kontrol etmektedir. TBDY (2018) kapsamında ε_f değeri, sünekliğin artırılmasına yönelik olarak belirli sınırlar içerisinde tanımlanmış; bu kapsamda mutlak üst sınır 0.01 olarak verilmiş ve ayrıca bu değer lifli polimerin nihai birim uzamasının ε_{fu} , %50'sini aşmaması şartı getirilmiştir.

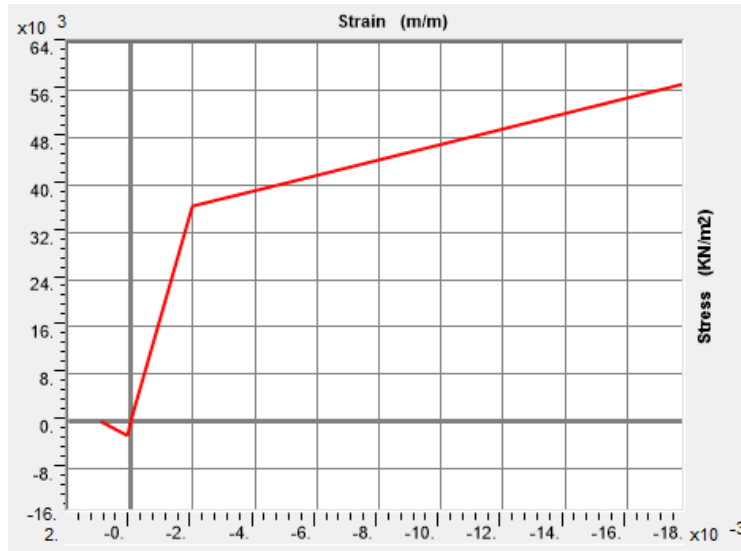
Buna karşılık, American Concrete Institute (ACI 440.2-23, 2023)'te daha sınırlayıcı bir yaklaşım benimsenmekte olup, etkin sargılama birim uzaması genellikle 0.004 ile sınırlandırılmaktadır. Bu durum, TBDY (2018)'e kıyasla daha düşük sargılama basıncı değerlerinin elde edilmesine ve dolayısıyla sargı etkisinin daha muhafazakar biçimde temsil edilmesine yol açmaktadır. Bu çalışmada incelenen numunelerin büyük ölçüde eğilme kontrollü davranış sergilediği dikkate alındığında, yapılan değerlendirmeler esas olarak eğilme davranışı ile sınırlıdır. TBDY (2018)'de kesme davranışı ayrı olarak ele alınmakta olup, eğilme deformasyon kapasitesinin değerlendirilmesinden önce kesme yetersizliklerinin giderilmesi gerekmektedir. Lifli polimerin kesme güçlendirmesi amacıyla kullanılması durumunda ise, tasarımda dikkate alınabilecek etkin birim uzama değeri 0.004 ile sınırlandırılmaktadır.

Hesaplanan parametreler, kesit analizlerinde kullanılan sargılı beton malzeme modelinin tanımlanmasında doğrudan girdi olarak kullanılmış olup, elde edilen değerler Çizelge 5.3'te sunulmuştur

Çizelge 5.3 : ASC-2NS numunesi için TBDY (2018)'e göre hesaplanan parametreler.

ρ_f	ε_f	κ_a	f_l (MPa)	ε_{cc}	f_{cc} (MPa)
0.0131	0.0063	0.466	1.47	0.0047	40.00

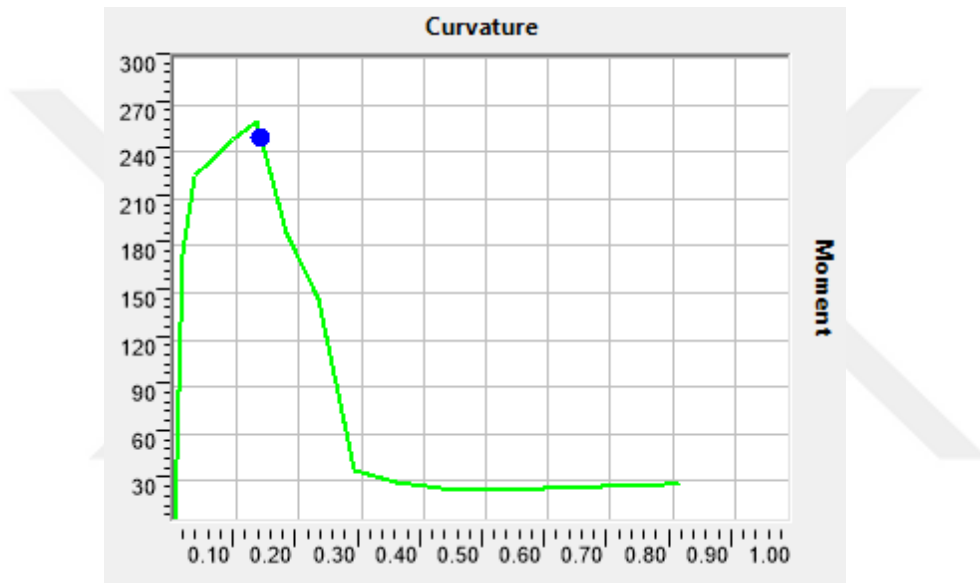
TBDY (2018) kapsamında hesaplanan sargılı beton parametreleri kullanılarak, SAP2000 (2024) ortamında kesite ait sargılı beton malzeme modeli tanımlanmıştır. Bu kapsamda, sargılı beton için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi, mevcut beton dayanımı ile lifli polimer sargısının sağladığı dayanım ve şekildeğiştirme artışını birlikte temsil edecek şekilde oluşturulmuştur. Donatı çeliği ise elastik-plastik davranışı temsil eden uygun bir malzeme modeli ile tanımlanmıştır. Tanımlanan bu malzeme modelleri kesit analizlerinde kullanılarak moment-eğrilik ilişkilerinin elde edilmesine olanak sağlamıştır. SAP2000 (2024) programından elde edilmiş, ASC-2NS numunesi için oluşturulan sargılı beton malzeme modeline ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 5.2'de sunulmuştur.



Şekil 5.2 : ASC-2NS numunesi için oluşturulan sargılı beton malzeme modeli (SAP2000, 2024).

Tanımlanan kesit geometrisi ve malzeme modelleri kullanılarak, SAP2000 (2024) ortamında kesit analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizde, kesitin doğrusal olmayan davranışı bilineer beton malzeme modeli ile temsil edilmiş ve moment-eğrilik ilişkisi tam integrasyon yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.

Moment-eğrilik analizinde, deneysel çalışmada uygulanan eksenel yük düzeyi sabit tutulmuş ve analiz bu eksenel kuvvet altında gerçekleştirilmiştir. Bu sayede elde edilen moment-eğrilik ilişkisi, deney koşullarını temsil edecek şekilde belirlenmiştir. SAP2000 (2024) programından elde edilmiş, ASC-2NS numunesine ait moment-eğrilik eğrisi Şekil 5.3'te sunulmuştur.



Şekil 5.3 : ASC-2NS numunesine ait moment-eğrilik eğrisi (SAP2000, 2024).

Elde edilen moment-eğrilik eğrisi incelenerek, kesitin akma ve nihai durumlarına karşılık gelen karakteristik büyüklükler belirlenmiştir.

Maksimum eğrilik ϕ_u ise, kesitte tanımlanan malzeme birim şekildeğiştirme sınırları esas alınarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, sargılı beton için TBDY (2018)'e göre hesaplanan maksimum basınç birim kısalma değeri ϵ_{cc} ile donatı çeliği için tanımlanan $\epsilon_s^{G\ddot{o}}$ (Göçmenin Önlenmesi) birim uzama değeri birlikte değerlendirilmiş; bu sınır değerlerden hangisine moment-eğrilik eğrisi üzerinde daha önce ulaşılıyorsa, o duruma karşılık gelen eğrilik değeri maksimum eğrilik olarak alınmıştır. İncelenen numunelerin tamamında ϵ_{cc} değerinin belirleyici olduğu görülmüş ve maksimum eğrilik bu kritere göre belirlenmiştir.

ASC-2NS numunesi için yapılan değerlendirmede, sargılı beton için TBDY (2018)'e göre hesaplanan maksimum basınç birim kısalma değeri $\varepsilon_{cc} = 0.0047$ olarak elde edilmiştir. Moment-eğrilik eğrisi incelendiğinde, kesitte nihai davranışın beton birim kısalma sınırına ulaşılması ile kontrol edildiği, diğer bir ifadeyle betonun göçme davranışını belirleyen malzeme olduğu görülmüştür. Bu duruma karşılık gelen eğrilik değeri yaklaşık $\phi_u = 0.031 \text{ m}^{-1}$ olarak belirlenmiştir.

Akma durumu ise kesit analizleri sonucunda, çekme donatısının akma gerilmesine ulaştığı noktaya karşılık gelen eğrilik değeri olarak tanımlanmış ve bu değer $\phi_y = 0.018 \text{ m}^{-1}$ olarak elde edilmiştir.

Kesit düzeyinde elde edilen akma ve maksimum eğrilik değerleri, eleman düzeyindeki yerdeğiştirme büyüklüklerine plastik mafsal yaklaşımı ve temel geometrik kabuller yardımıyla dönüştürülmüştür. Bu kapsamda plastik mafsal boyu TBDY (2018)'e uygun olarak $L_p = 0.5h$ alınmış ve plastik eğriliklerin bu bölge boyunca sabit olduğu kabul edilmiştir. Plastik eğrilik ϕ_p , hesabı denklem 5.1'de gösterilmektedir.

$$\phi_p = \phi_u - \phi_y \quad (5.1)$$

Bu eğriliğe karşılık gelen plastik dönme θ_p , ise denklem 5.2'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\theta_p = L_p \cdot \phi_p \quad (5.2)$$

Elemanın akma durumundaki elastik yerdeğiştirmesi Δ_y , denklem 5.3 kullanılarak elde edilmektedir.

$$\Delta_y = \frac{L^2}{3} \cdot \phi_y \quad (5.3)$$

Plastik yerdeğiştirme bileşeni Δ_p , ise denklem 5.4'teki bağıntı kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\Delta_p = \theta_p \cdot \left(L - \frac{L_p}{2} \right) \quad (5.4)$$

Kolon üst ucundaki toplam yerdeğiştirme Δ_c , denklem 5.5'teki gibi akma yerdeğiştirmesi ve plastik yerdeğiştirme toplanarak elde edilmektedir.

$$\Delta_c = \Delta_y + \Delta_p \quad (5.5)$$

Son olarak, yerdeğiştirme sünekliği μ_Δ , denklem 5.6'da görüldüğü gibi kolonun toplam yerdeğiştirmesinin akma yerdeğiştirmesine oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_c}{\Delta_y} \quad (5.6)$$

Tüm bu hesap adımları sonucunda ASC-2NS numunesi için yerdeğiştirme sünekliği $\mu_{\Delta} = 1.2$ olarak elde edilmiştir. Hesaplamalar sırasında elde edilen eğrilik, dönme ve yerdeğiştirme değerleri Çizelge 5.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 5.4 : ASC-2NS numunesi için hesaplanan değerler.

L_p (m)	ϕ_p (m ⁻¹)	$\theta_p^{(G\ddot{O})}$ (rad)	Δ_p (m)	Δ_y (m)	Δ_c (m)
0.15	0.013	0.002	0.003	0.013	0.016

ASC-2NS için verilen örnek hesap veri setindeki tüm kolonlar için yapılmış ve hesap sonuçları tüm detaylarıyla birlikte Ek A'da sunulmuştur.

5.3 Karşılaştırma Esasları

Deneyisel çalışmalar ile TBDY (2018) esaslarına göre elde edilen analitik sonuçlar arasında doğrudan karşılaştırma yapılabilmesi, kullanılan büyüklüklerin tanım ve kapsam bakımından uyumlu olmasını gerektirmektedir. Ancak deneyisel çalışmalarda kolon davranışı çoğunlukla sabit eksenel yük altında uygulanan tersinir-tekrarlı yatay yükleme sonucu elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri üzerinden sunulmakta; kesit düzeyindeki birim şekildeğiştirme verileri ise çoğu çalışmada raporlanmamaktadır. Bu durum, analitik ve deneyisel sonuçların doğrudan birim şekildeğiştirme düzeyinde karşılaştırılmasını sınırlamaktadır. Bu nedenle çalışmada, ortak bir değerlendirme zemini oluşturmak amacıyla yerdeğiştirme temelli süneklik parametresi esas alınmıştır. Süneklik, hem deneyisel çalışmalarda yaygın olarak raporlanan bir büyüklük olması hem de yönetmelikte tanımlanan şekildeğiştirme sınırlarının eleman düzeyindeki karşılıklarını temsil edebilmesi açısından uygun bir karşılaştırma ölçütü sunmaktadır.

Deneyisel veri setinde yer alan çalışmalarda, maksimum yerdeğiştirme, akma yerdeğiştirmesi ve süneklik değerlerinin her numune için birlikte verilmediği görülmüştür. Bu nedenle süneklik değerinin doğrudan sunulduğu çalışmalar öncelikli olarak değerlendirilmiş; süneklik değerinin verilmediği ancak maksimum

yerdeğiştirmenin mevcut olduğu durumlarda ise akma yerdeğiştirmesi, ilgili numunelere ait çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrileri üzerinden yeniden belirlenmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, tüm numuneler için karşılaştırmaya esas olacak maksimum ve akma yerdeğiştirmesi değerleri tutarlı bir şekilde elde edilmiştir.

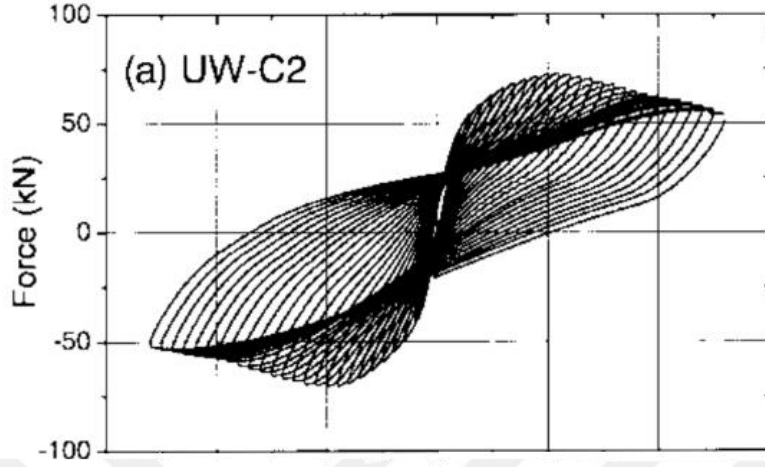
Literatürde yer alan deneysel çalışmalarda akma yerdeğiştirmesi Δ_y , bazı durumlarda doğrudan raporlanırken, bazı çalışmalarda ise açık biçimde tanımlanmamaktadır. Akma tanımının verilmediği durumlarda akma yerdeğiştirmesi, yük-yerdeğiştirme eğrisinin başlangıç elastik rijitliğini temsil eden doğru ile maksimum yatay yük değerine karşılık gelen noktanın kesişimi esas alınarak belirlenmiştir. Analitik değerlendirmelerde ise akma yerdeğiştirmesi, kesit analizleri sonucunda çekme donatısının akma gerilmesine ulaştığı eğrilik değerine karşılık gelen eleman yerdeğiştirmesi olarak tanımlanmıştır. Bu tanım, TBDY (2018) kapsamında kesit düzeyinde yapılan değerlendirme yaklaşımı ile uyumludur.

Literatürde maksimum yerdeğiştirme tanımının da çalışmalar arasında farklılık gösterdiği görölmektedir. İncelenen çalışmalarda maksimum yerdeğiştirme, çevrimsel yükleme sırasında ulaşılan maksimum yatay taşıma kapasitesinin yaklaşık yüzde yirmi azalmasına karşılık gelen yerdeğiştirme düzeyi olarak tanımlanmıştır. Bu bilgi mevcut olan çalışmalarda aynı tanım benimsenmiş ve raporlanan değerler doğrudan kullanılmıştır. Buna karşılık, bazı çalışmalarda maksimum yerdeğiştirme için farklı tanımlar yapıldığı görölmüştür. Bu tür çalışmalarda, yük-yerdeğiştirme grafikleri incelenerek maksimum yatay taşıma kapasitesinin yaklaşık yüzde yirmi azalmasına karşılık gelen yerdeğiştirme düzeyi belirlenmiş ve bu değerler kullanılarak ilenlenmiştir. Böylece tüm numunelerde sınır değerleri için ortak bir tanım sağlanmışır.

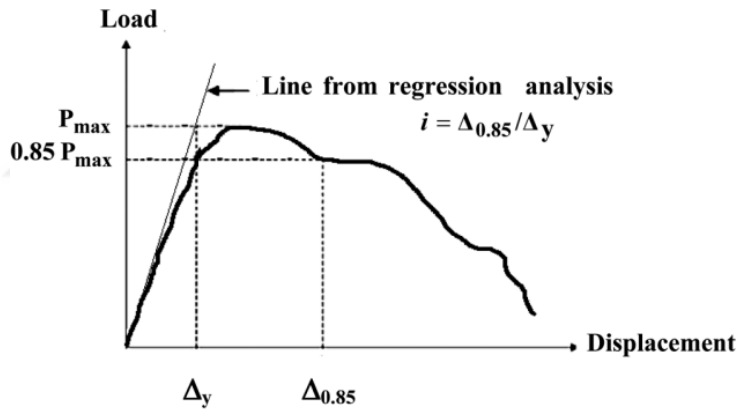
Temsili bir deneysel yük-yerdeğiştirme eğrisi üzerinde bu tanımların gösterimi şekil 5.4'te sunulmaktadır (Bousias ve diğ., 2004). Bu çalışmada maksimum yerdeğiştirme, tüm numuneler için tutarlı olacak şekilde, yatay taşıma kapasitesinin tepe değerine göre yaklaşık %20 oranında azaldığı noktaya karşılık gelen yerdeğiştirme düzeyi olarak esas alınmıştır. şekil 5.5'te de göröldüğu üzere literatürde bu nokta tepe değerinin %15 azaldığı nokta olarak da tanımlanabilmektedir (Rakhshanimehr ve diğ., 2014).

Aşağıdaki akış, tez kapsamında izlenen adımları özetlemektedir. Deneysel çalışmalardan elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri üzerinden akma ve maksimum yerdeğiştirme değerleri belirlenmiş; aynı numuneler için TBDY (2018) esaslarına göre

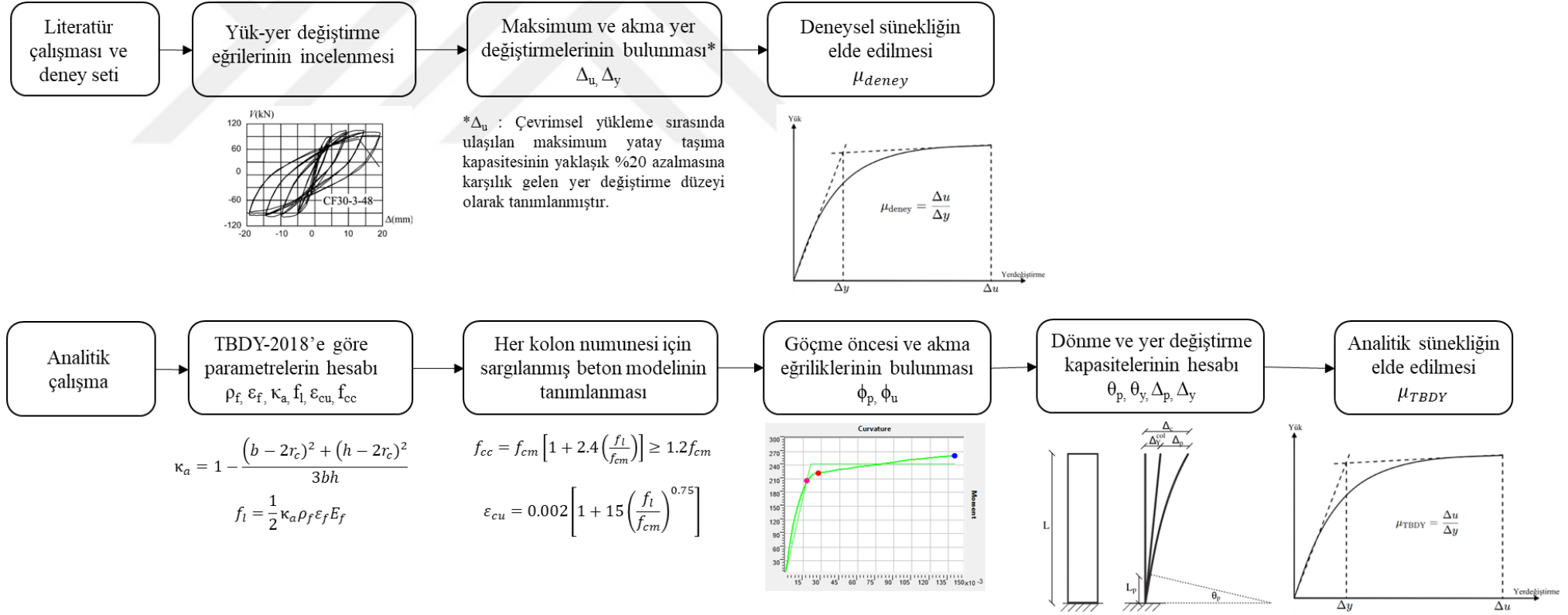
kesit analizleri yapılarak eleman düzeyinde yerdeğiştirme kapasiteleri ve süneklik değerleri hesaplanmıştır. Karşılaştırma, her bir numune için deneysel ve analitik sünekliklerin bire bir eşleştirilmesi üzerinden yürütülmüştür (Şekil 5.6).



Şekil 5.4 : Temsili bir deneysel yük-yerdeğiştirme eğrisi (Bousias ve diğ., 2004).



Şekil 5.5 : Yük-yerdeğiştirme grafiği üzerinden süneklik tanımı (Rakhshanimehr ve diğ., 2014).

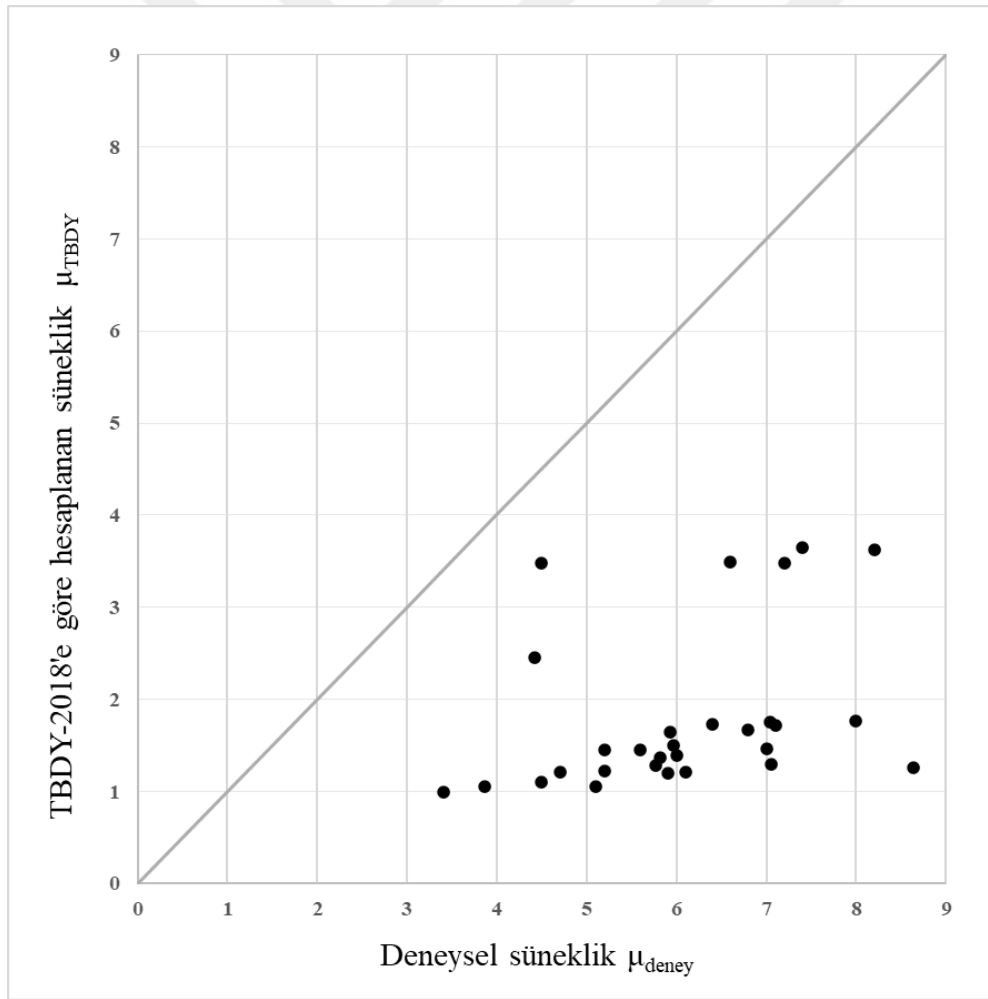


Şekil 5.6 : DeneySEL ve TBDY (2018) esaslı süneklik değerlendirme adımlarını gösteren akış şeması.

5.4 Süneklik Karşılaştırması

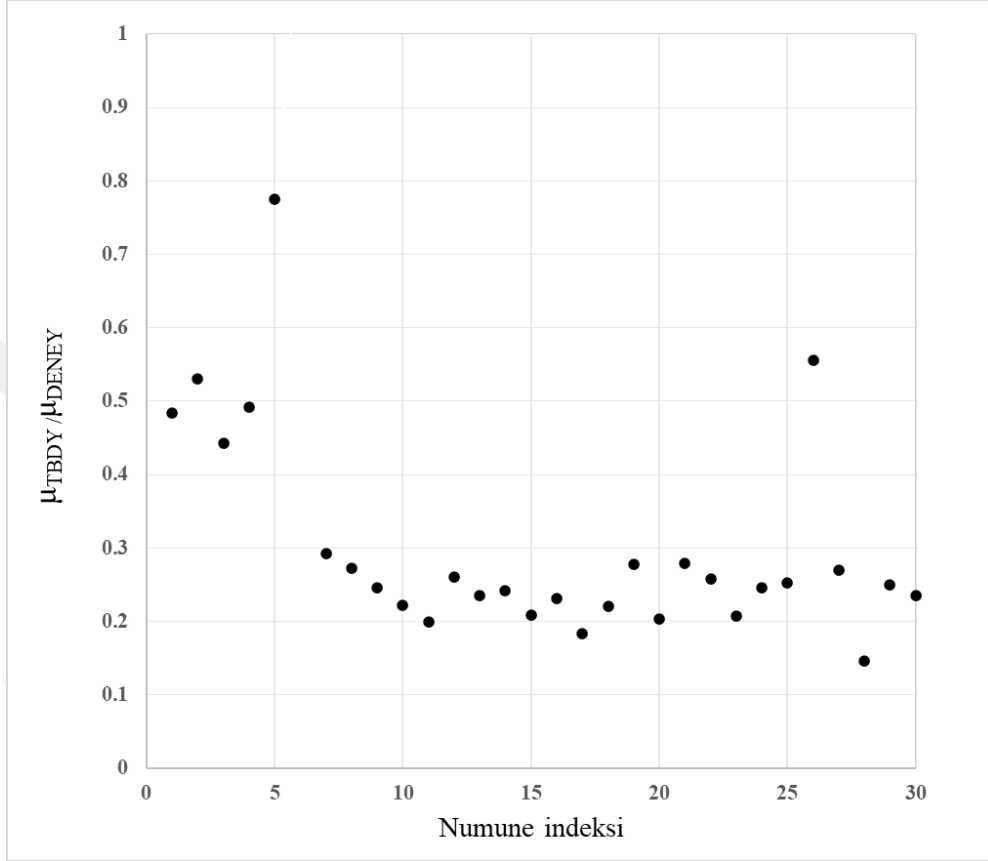
Bu bölümde, deneysel çalışmalardan elde edilen yerdeğiştirme temelli süneklik değerleri ile aynı kolonlar için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) esaslarına göre hesaplanan süneklik değerleri karşılaştırılmıştır.

Deneysel süneklik değerleri ile TBDY (2018)'e göre hesaplanan süneklik değerlerinin genel dağılımı Şekil 5.7'de sunulmaktadır. Bu şekilde, yatay ekseninde deneysel süneklik, dikey ekseninde ise TBDY (2018) esaslarına göre elde edilen süneklik değerleri yer almaktadır. Şekil üzerinde gösterilen $y = x$ doğrusu, deneysel ve analitik süneklik değerlerinin eşit olduğu durumu temsil etmektedir. Noktaların bu doğruya göre konumu, yönetmelik esaslı süneklik tahminlerinin deneysel değerlere göre göreceli düzeyini bütün veri seti için görsel olarak ortaya koymaktadır.



Şekil 5.7 : Deneysel ve TBDY (2018)'e göre hesaplanan süneklik parametrelerinin karşılaştırılması.

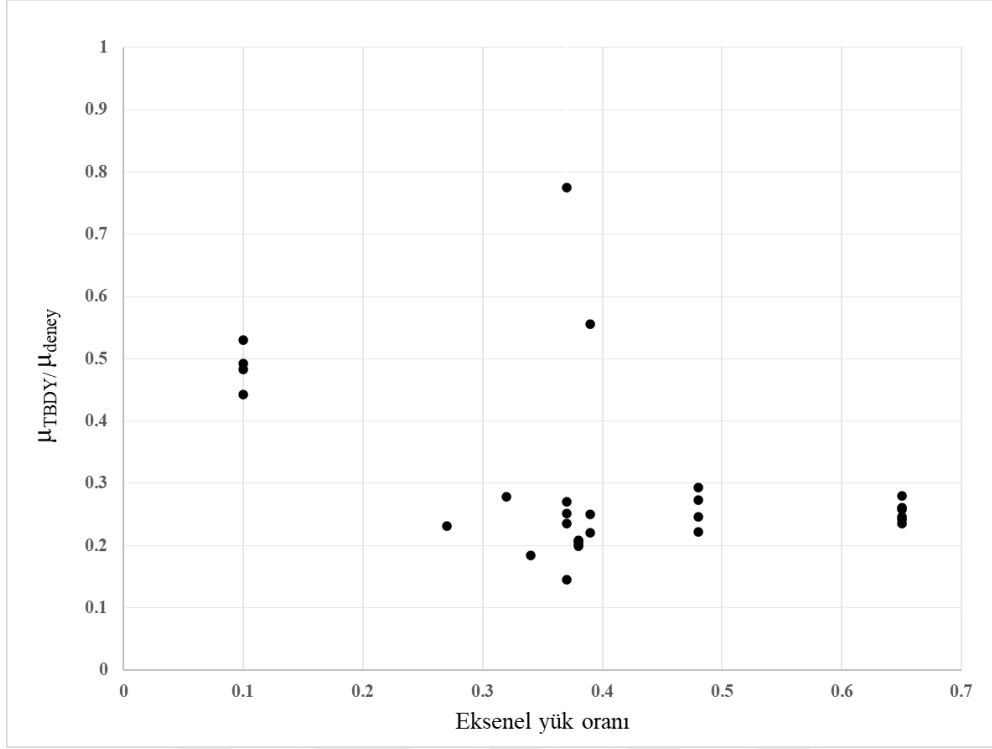
Deneysel ve analitik süneklikler arasındaki farkın büyüklüğünü ve dağılımını daha açık biçimde incelemek amacıyla, her bir numune için hesaplanan süneklik oranları μ_{TBDY}/μ_{deney} , Şekil 5.8’de verilmiştir. Bu gösterim, süneklik tahminlerinin deneysel değerlere kıyasla veri seti genelinde hangi aralıkta değiştiğini ve saçılma düzeyini izlemeye olanak sağlamaktadır.



Şekil 5.8 : TBDY (2018)’e göre hesaplanan sünekliğin deneysel sünekliğe oranının dağılımı.

Süneklik oranlarının eksenel yük düzeyine bağlı olarak nasıl değiştiğini incelemek amacıyla, μ_{TBDY}/μ_{deney} oranlarının eksenel yük oranı ile ilişkisi Şekil 5.9’da sunulmuştur. Bu grafik, farklı eksenel yük seviyelerinde elde edilen süneklik oranlarının dağılımını göstermekte ve eksenel yük düzeyinin karşılaştırma sonuçları üzerindeki etkisinin görsel olarak izlenmesine olanak tanımaktadır.

Grafiklerle sunulan karşılaştırmaların sayısal karşılıklarını özetlemek amacıyla, süneklik oranlarına ilişkin temel istatistiksel göstergeler Çizelge 5.5’de verilmiştir. Bu çizelgede, tüm veri seti için hesaplanan süneklik oranlarının ortalama, medyan ile en küçük ve en büyük değerleri sunulmuş; grafiklerde gözlenen dağılımların sayısal düzlemde de izlenebilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 5.9 : TBDY (2018)’e göre hesaplanan sünekliğin deneysel sünekliğe oranı ile eksenel yük oranı arasındaki ilişki.

Bu çalışmada TBDY (2018) esaslarına göre hesaplanan tüm kesit ve malzeme parametreleri, bu parametrelerden elde edilmiş malzeme modelleri kullanılarak SAP2000 (2024) programında gerçekleştirilen kesit analizlerinden elde edilen şekildeğiştirme büyüklükleri, kesit davranışından türetilen eleman düzeyindeki yerdeğiştirme kapasiteleri ve bunlara karşılık gelen süneklik oranları ile birlikte Ek A’da sunulmuştur.

Çizelge 5.5 : TBDY (2018)’e göre hesaplanan sünekliğin deneysel sünekliğe oranına ait istatistiksel özet.

Gösterge	μ_{TBDY}/μ_{deney}
Ortalama	0.30
Medyan	0.25
Minimum	0.15
Maksimum	0.77

Bu bölümde sunulan grafik ve çizelgeler, deneysel süneklik değerleri ile TBDY (2018) esaslarına göre hesaplanan süneklik değerleri arasındaki ilişkinin nicel olarak ortaya konulmasını hedeflemektedir. Elde edilen bulguların yorumu ve bu karşılaştırmaların yönetmelik yaklaşımı açısından değerlendirilmesi bir sonraki bölümde ele alınmaktadır.

5.5 Bulguların Değerlendirilmesi

Bu çalışmada lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonlar için deneysel olarak elde edilen süneklik değerleri ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) esaslarına göre hesaplanan süneklik değerleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar, eleman düzeyinde tanımlanan yerdeğiştirme temelli süneklik büyüklükleri üzerinden gerçekleştirilmiş ve yönetmelik yaklaşımının deneysel olarak gözlenen şekildeğiştirme kapasitesini ne ölçüde temsil edebildiği değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, TBDY (2018)'e göre hesaplanan süneklik değerlerinin, deneysel süneklik değerlerine kıyasla veri seti genelinde belirgin biçimde daha düşük kaldığını göstermektedir. İncelenen 29 numune için hesaplanan süneklik oranlarının (μ_{TBDY}/μ_{deney}) 0.15 ile 0.77 aralığında değiştiği, bu oranların ortalama 0.30 ve medyan 0.25 değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, lifli polimer ile sargılanmış kolonlarda deneysel olarak gözlenen süneklik kapasitesinin, yönetmelik esaslı hesaplarla elde edilen değerlere kıyasla tipik olarak yaklaşık 3-4 kat daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.

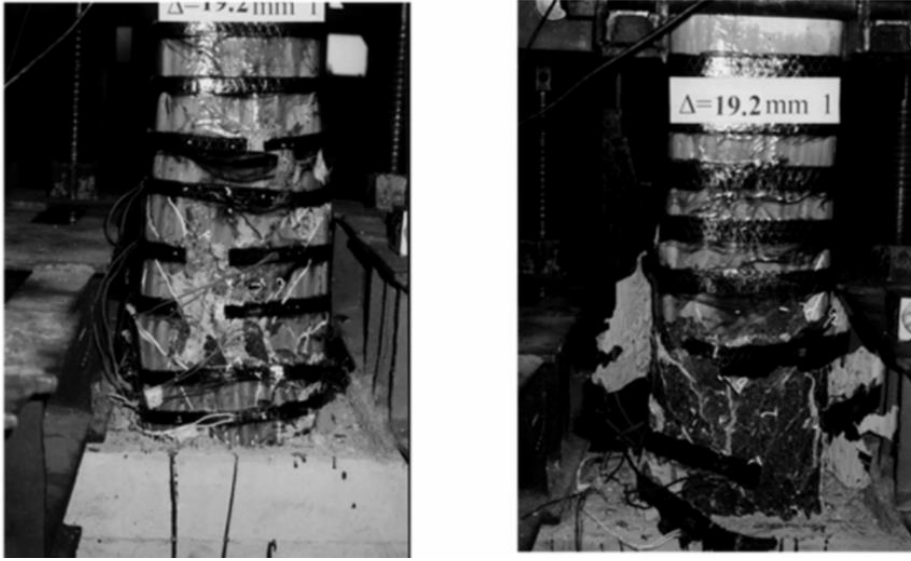
Yerdeğiştirme sünekliği oranlarının dağılımı incelendiğinde, numunelerin büyük çoğunluğunda μ_{TBDY}/μ_{deney} oranının 0.30'un altında toplandığı görülmektedir. Bu durum, TBDY (2018) yaklaşımının lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonların süneklik kapasitesini sistematik olarak güvenli tarafta temsil ettiğini göstermektedir. Yönetmelik kapsamında tanımlanan beton birim kısalma sınırlarının, deneysel çalışmalarda gözlenen ileri şekildeğiştirme düzeylerine ulaşılmadan önce devreye girmesi, bu farkın temel nedenini oluşturmaktadır.

Eksenel yük oranının etkisi incelendiğinde, düşük eksenel yük oranlarında (yaklaşık 0.10 seviyelerinde) analitik/deneysel süneklik oranının görece daha yüksek olduğu ve genellikle 0.45 ile 0.55 aralığında değiştiği görülmektedir. Eksenel yük oranının orta seviyelere (yaklaşık 0.30-0.40) artmasıyla birlikte, sonuçların daha dağınık bir dağılım gösterdiği ve değerlerin çoğunlukla 0.20-0.30 aralığında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Daha yüksek eksenel yük oranlarında (yaklaşık 0.50-0.65) ise bu oranların tekrar dar bir bantta toplandığı ve yaklaşık 0.25 civarında sabitlendiği belirlenmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, eksenel yük oranı ile analitik/deneysel süneklik oranı arasında belirgin bir monoton ilişki bulunmamaktadır. Bunun yerine, eksenel

yük düzeyinin kolonların mutlak deformasyon kapasitesini etkilediği, ancak deneysel ve yönetmelik esaslı süneklik tahminleri arasındaki göreceli farkın büyük ölçüde benzer kaldığı anlaşılmaktadır. Bu durum, TBDY (2018)'e göre elde edilen süneklik tahminlerinin muhafazakar karakterinin esas olarak kullanılan analitik yaklaşımın doğasından kaynaklandığını ve aksel yük seviyesinden büyük ölçüde bağımsız olduğunu göstermektedir.

Deneysel çalışmalarda gözlenen ileri şekil değiştirme düzeyleri, çoğu durumda belirgin beton ezilmesi, kaplama betonunun dökülmesi ve plastik mafsallarda yoğun hasar gelişimi ile birlikte ortaya çıkmaktadır. Lifli polimer ile sargılanmış kolonlarda ise hasarın daha kontrollü biçimde geliştiği, beton çekirdeğinin bütünlüğünün daha uzun süre korunduğu ve ileri yer değiştirme düzeylerinde dahi taşıma kapasitesinin sürdürülebildiği görülmektedir. Bu duruma ilişkin temsili deney sonu hasar örnekleri Şekil 5.10'da sunulmuştur.



Şekil 5.10 : Lifli polimer ile sargılanmış kolonlarda deney sonucunda görülen tipik hasar mekanizmaları (Ye ve diğ., 2003).

Literatürde FRP ile sargılanmış beton kolonlar için yapılan rehber ve model karşılaştırmaları, bu çalışmada gözlenen farklarla uyumludur. Salesa ve diğ. (2022) tarafından sunulan karşılaştırmalı değerlendirmeler, farklı rehber yaklaşımlarının FRP ile sargılanmış beton için önerdiği nihai birim kısalma ve buna bağlı süneklik tahminlerinin deneysel sonuçlara kıyasla önemli farklılıklar gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Özellikle ileri şekil değiştirme düzeylerinde, rehber esaslı tahminlerin deneysel olarak gözlenen deformasyon kapasitesini sınırlı biçimde temsil edebildiği

görülmektedir. Gedik (2024) tarafından sunulan kapsamlı veri tabanı çalışmasında da, farklı ulusal ve uluslararası rehberlerin FRP ile sargılanmış betonarme kolonlar için önerdiği dayanım ve deformasyon tahminlerinin deneysel sonuçlara göre geniş bir saçılma gösterdiği belirtilmiştir. Bu çalışmada özellikle, betonun nihai birim kısalmasına dayalı sınırların ileri şekildeğiştirme kapasitesini temsil etmede çoğu durumda kısıtlayıcı kaldığı vurgulanmaktadır.

Benzer şekilde, tam ölçekli ve deprem benzeri yükleme koşullarını içeren deneylere dayalı çalışmalar, FRP sargı etkisinin analitik modellerle temsilde belirgin farklılıklar bulunduğunu göstermektedir. Ghatte ve diğ. (2016), sabit eksenel yük altında tersinir-tekrarlı yatay yüklemeye maruz bırakılan tam ölçekli, dikdörtgen ve yetersiz detaylandırılmış betonarme kolonlar üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, farklı FRP ile sargılanmış beton gerilme-şekildeğiştirme modellerinin yerdeğiştirme kapasitesi ve süneklik tahminlerinde ciddi farklılıklara yol açtığını ortaya koymuştur. Çalışma sonuçları, kullanılan modele bağlı olarak süneklik kapasitesinin bazı durumlarda deneysel davranışa kıyasla belirgin biçimde sınırlandırılabilindiğini, bazı durumlarda ise deneysel davranışın güvensiz biçimde temsil edilebildiğini göstermektedir. Bu bulgular, çevrimsel kolon davranışında süneklik tahminlerinin büyük ölçüde kullanılan sargılanmış beton modeline ve kabul edilen nihai beton birim şekildeğiştirme değerine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca Quispe ve diğ. (2022), orta ve büyük ölçekli dikdörtgen kolon deneylerine dayalı karşılaştırmalarında, uluslararası kılavuzların nihai beton birim şekildeğiştirmesini sistematik olarak düşük tahmin ettiğini vurgulamıştır.

Elde edilen sonuçlar ışığında, süneklik oranları ile eksenel yük düzeyi birlikte değerlendirildiğinde, farklı eksenel yük oranlarında süneklik oranlarının belirli bir saçılma gösterdiği; ancak veri seti genelinde belirgin bir doğrusal ilişki kurulamadığı görülmektedir. Bununla birlikte, orta ve yüksek eksenel yük düzeylerinde süneklik oranlarının daha düşük değerlerde yoğunlaşması, yönetmelik esaslı hesapların bu yük düzeylerinde deneysel olarak gözlenen şekildeğiştirme kapasitesini daha sınırlı biçimde yansıttığını göstermektedir. Bu durum, eksenel yük düzeyinin yerdeğiştirme sünekliği üzerinde etkili bir parametre olmakla birlikte, TBDY (2018) yaklaşımının genel olarak güvenli tarafta kalan karakterini değiştirmediğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular bir bütün olarak değerlendirildiğinde, TBDY (2018)'in lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonlar için benimsediği

şekildeğiştirme esaslı yaklaşımın, deneysel süneklik davranışını güvenli bir değerlendirme çerçevesi içerisinde temsil ettiği söylenebilir. Ancak bu yaklaşım, bazı durumlarda lifli polimer ile güçlendirilmiş kolonlar için deneysel olarak mevcut olan şekildeğiştirme potansiyelinin tasarım hesaplarına sınırlı ölçüde yansıtılmasına ve bunun sonucunda ekonomik olmayan güçlendirme çözümlerinin ortaya çıkmasına yol açabilmektedir. Literatürdeki benzer çalışmalarla birlikte değerlendirildiğinde, bu farkın temelinde FRP sargı etkisinin çoğu yönetmelikte betonun nihai birim kısılmasına dayalı, sınırlı ve güvenli tarafta kalan kabuller üzerinden temsil edilmesinin yattığı söylenebilir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1 Genel Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonların süneklik davranışı, literatürde rapor edilen deneysel sonuçlar ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) esaslarına göre elde edilen analitik sonuçlar karşılaştırılarak incelenmiştir. Karşılaştırmalar, eleman düzeyinde tanımlanan yerdeğiştirme temelli süneklik büyüklükleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, TBDY (2018)'e göre hesaplanan süneklik değerlerinin, deneysel olarak gözlenen süneklik kapasitesine kıyasla daha düşük kaldığını göstermektedir. İncelenen numuneler için deneysel süneklik değerlerinin, yönetmelik esaslı hesaplarla elde edilen süneklik değerlerinden tipik olarak ortalama 3-4 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, TBDY (2018) yaklaşımının lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonların süneklik davranışını genel eğilimleri itibarıyla güvenli tarafta temsil ettiğini ortaya koymaktadır.

Eksenel yük oranının etkisi incelendiğinde, analitik/deneysel süneklik oranı ile eksenel yük arasında düzenli bir ilişki bulunmadığı görülmektedir. Düşük eksenel yük seviyelerinde (0.10) bu oran 0.45-0.55 aralığında yüksek değerler alırken, 0.30-0.40 aralığında daha dağınık bir dağılım göstererek çoğunlukla 0.20-0.30 bandında yer almaktadır. Yüksek eksenel yük oranlarında (0.50-0.65) ise değerler yaklaşık 0.25 civarında toplanmaktadır. Bu durum, eksenel yükün mutlak deformasyon kapasitesini etkilediğini, ancak deneysel ve yönetmelik esaslı süneklik tahminleri arasındaki farkın büyük ölçüde sabit kaldığını göstermektedir. Dolayısıyla, TBDY (2018)'e göre elde edilen süneklik tahminlerinin muhafazakar karakterinin analitik yaklaşımın doğasından kaynaklandığı ve eksenel yük oranından büyük ölçüde bağımsız olduğu anlaşılmaktadır.

Son olarak, süneklik oranlarının dağılımı incelendiğinde, yalnızca sınırlı sayıda numunede yönetmelik esaslı süneklik değerlerinin deneysel değerlere yaklaştığı görülmüştür.

6.2 Yönetmeliğin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada TBDY (2018)'e göre yapılan değerlendirmelerde, kolonların süneklik kapasiteleri yönetmelikte tanımlanan limit birim şekildeğiştirme değerleri esas alınarak belirlenmiştir. Analitik süneklik hesapları, bu limit değerlere karşılık gelen kesit eğrilikleri üzerinden türetilen eleman düzeyindeki yerdeğiştirme kapasitelerine dayanmaktadır. Buna karşılık, literatürde yer alan deneysel çalışmalarda süneklik, kolonların çevrimsel yükleme altında ulaştığı maksimum yatay taşıma kapasitesinin yaklaşık yüzde yirmi azalmasına karşılık gelen yerdeğiştirme düzeyi esas alınarak tanımlanmaktadır.

İki yaklaşım arasındaki fark, deneysel ve analitik süneklik değerleri arasında gözlenen ayrışmanın temel nedenlerinden biridir. Yönetmelikte tanımlanan limit şekildeğiştirme değerleri, kolonun dayanım kaybı yaşamadan önceki güvenli davranış bölgesini temsil etmekte; deneysel çalışmalarda ise kolonların bu limitlerin ötesinde, belirgin dayanım kaybı gerçekleşene kadar şekildeğiştirmeye devam edebildiği görülmektedir. Dolayısıyla, TBDY (2018) kapsamında kullanılan limit değerler ile deneysel olarak rapor edilen maksimum yerdeğiştirme düzeyleri arasında doğal bir güvenlik aralığı bulunmaktadır. Ayrıca, TBDY (2018)'e göre elde edilen süneklik değerlerinin eksenel yük seviyesinden bağımsız biçimde güvenli tarafta kaldığı görülmektedir.

Bu eğilim, farklı yönetmeliklerde lifli polimerin etkin birim uzamasına getirilen sınırlamalar ile de ilişkilendirilebilir. Örneğin, ACI 440.2-23'te etkin sargılama birim uzaması genellikle daha düşük değerlerle sınırlandırılmakta olup, bu yaklaşım sargı etkisinin daha muhafazakâr biçimde temsil edilmesine yol açmaktadır. Buna karşılık TBDY (2018) kapsamında daha yüksek etkin birim uzama değerlerine izin verilmesi, analitik olarak daha yüksek sargılama etkisinin elde edilmesine olanak tanımaktadır.

Yapılan karşılaştırmalar, söz konusu güvenlik aralığının lifli polimer ile sargılanmış kolonlarda süneklik kapasitesinin incelenen diğer etkilerden bağımsız olarak analitik sonuçların düşük öngörülmesine neden olduğunu göstermektedir. Bu durum, yönetmelik yaklaşımının güvenli değerlendirmeler yapılmasına olanak sağlamakla birlikte, bazı koşullarda deneysel olarak gözlenen şekildeğiştirme kapasitesinin tasarım hesaplarına sınırlı ölçüde yansıtılmasına ve bunun sonucunda ekonomik

olmayan sonuçlar doğurabilecek tasarım yaklaşımlarının ortaya çıkmasına yol açabilmektedir.

Bununla birlikte, TBDY (2018)'de tanımlanan birim şekildeğiştirme sınırlarının güvenli davranış bölgesini temsil ettiği, deneysel çalışmalarda ise lifli polimer ile sargılanmış kolonların bu sınırların ötesinde de kararlı çevrimsel deformasyonlar sergileyebildiği görülmektedir. Bu durum, yönetmelik sınırları ile deneysel olarak gözlenen yerdeğiştirme kapasiteleri arasında belirli bir güvenlik payı bulunduğunu göstermektedir. Her ne kadar bu muhafazakar yaklaşım deterministik açıdan güvenli bir değerlendirme sağlasa da, güvenilirlik açısından yeterliliğinin dikkatle ele alınması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında incelenen veri setinde güvenli olmayan bir tahmine rastlanmamış olmakla birlikte, gözlenen sapma düzeyi söz konusu güvenlik payının yalnızca deneysel belirsizlikleri karşılamanın ötesine geçebileceğini göstermektedir. Öte yandan, mevcut deneysel veri tabanının numune sayısı ve temsil edilen göçme mekanizmaları açısından sınırlı olduğu, ayrıca farklı deneysel çalışmalarda kullanılan test düzenekleri, sınır koşulları ve ölçüm yöntemlerindeki farklılıkların sonuçları etkileyebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle, elde edilen muhafazakar eğilimin güvenilirlik açısından yorumlanmasında bu hususların dikkate alınması gerekmektedir.

6.3 Gelecek Çalışmalar için Öneriler

Bu tez çalışmasında lifli polimer ile sargılanmış betonarme kolonların süneklik davranışı, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) esasları çerçevesinde değerlendirilmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı ulusal ve uluslararası deprem yönetmeliklerinde lifli polimer ile sargılanmış betonarme elemanlar için benimsenen yaklaşımların karşılaştırmalı olarak incelenmesi yararlı olacaktır. Bu kapsamda, farklı yönetmeliklerde kullanılan malzeme modelleri, şekildeğiştirme sınırları ve süneklik değerlendirme esaslarının olumlu ve sınırlı yönlerinin ortaya konulması; elde edilecek bulgular ışığında, deneysel gözlemleri daha etkin biçimde temsil edebilecek alternatif veya iyileştirilmiş bir yaklaşımın önerilmesi, literatüre ve uygulamaya önemli katkı sağlayabilir.

Bunun yanı sıra, bu çalışmada kullanılan deneysel veri tabanı belirli lifli polimer türleri ile sınırlıdır. Gelecekte, farklı lifli polimer malzemelerinin kullanıldığı deneysel çalışmaların veri tabanına dahil edilmesi ve bu malzemelerin sargılama etkinliklerinin

karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi önerilmektedir. Bu tür bir genişletme, lifli polimer malzemelerin mekanik özelliklerinin süneklik davranışı üzerindeki etkilerinin daha kapsamlı biçimde incelenmesine olanak sağlayacaktır.

Ayrıca, bu tez kapsamında yapılan değerlendirmeler eleman düzeyi ile sınırlı tutulmuştur. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, lifli polimer ile güçlendirilmiş kolonların yer aldığı yapı sistemleri dikkate alınarak, doğrusal olmayan analizlerin yapılması önerilmektedir. Bu tür çalışmalar, lifli polimer sargılama yönteminin yapı sistemi düzeyindeki etkinliğinin, uygulanabilirliğinin ve ekonomik fizibilitesinin değerlendirilmesine olanak sağlayacak; elde edilecek sonuçlar, güçlendirme stratejilerinin performansa dayalı tasarım yaklaşımları çerçevesinde daha sağlıklı biçimde ele alınmasına katkı sunacaktır.

KAYNAKLAR

- American Concrete Institute (ACI)** (2023). *Design and Construction of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI PRC-440.2-23)*.
- Bousias, S.N., Triantafillou, T.C., Fardis, M.N., Spathis, L. & O'Regan, B.A.** (2004). Fiber-reinforced polymer retrofitting of rectangular RC columns with or without corrosion. *ACI Structural Journal* 101(4):512-520.
- Castro Quispe, V.J., de Diego Villalón, A., Martínez de Mingo, S., Echevarría Giménez, L., & Gutiérrez Jiménez, J.P.** (2022). Review of the key parameters of the international calculation guidelines for non-circular RC columns confined with CFRP composites. Comparison with medium and large-scale tests. *Engineering Structures*, 273.
- Del Zoppo, M., Di Ludovico, M., Balsamo, A. & Prota, A.** (2017). Ductility improvement of existing RC columns strengthened with CFRP. *Fourth Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures*, Zürich, Switzerland.
- Diboune, N., Mohammed, B., & Sendjasni, S.** (2024). *Design-oriented stress-strain model for short concrete columns wrapped with FRP sheets*. Studies in Engineering and Exact Sciences, 5(2).
- Gedik, O.** (2024). Comparison and Enhancement of Design Procedures for Guideline Expressions to Predict the Compressive Capacity of FRP-Wrapped Concrete Members. *Arabian Journal for Science and Engineering* 49, 13559-13576.
- Ghatte, H.F., Comert, M., Demir, C., & Ilki, A.** (2016). Evaluation of FRP Confinement Models for Substandard Rectangular RC Columns Based on Full-Scale Reversed Cyclic Lateral Loading Tests in Strong and Weak Directions. *Polymers*, 8(9), 323.
- Gundogan, S., Demir, U., Turan, O. T., & Ilki, A.** (2025). *Impact of high axial stress on seismic behavior of substandard reinforced concrete columns*. Structures, 77, 109117.
- Iacobucci, R.D., Sheikh, S.A. & Bayrak, O.** (2003). Retrofit of square concrete columns with carbon fiber-reinforced polymer of seismic resistance. *ACI Structural Journal* 100(6):785-794.
- İlki, A., Demir, C., Bedirhanoglu, İ., & Kumbasar, N.** (2009). Seismic Retrofit of Brittle and Low Strength RC Columns Using Fiber Reinforced Polymer and Cementitious Composites. *Advances in Structural Engineering*, 12, 325 - 347.

- İlki, A., Peker, Ö., Karamuk, E., Demir, C., & Kumbasar, N.** (2008). FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(2), 169-188.
- İlki, A., Tezcan, A., Koc, V. & Kumbasar, N.** (2004). Seismic retrofit of non-ductile rectangular re-inforced concrete columns by CFRP jacketing. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R.** (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804-1826.
- Memon, M.S. & Sheikh, S.A.** (2005). Seismic resistance of square concrete columns retrofitted with glass fiber-reinforced polymer. *ACI Structural Journal* 102(5):774.
- Özcan, O., Binici, B. & Özcebe, G.** (2008). Improving seismic performance of deficient reinforced concrete columns using carbon fiber-reinforced polymers. *Engineering Structures* 30:1632-1646.
- Özcan, O., Binici, B. & Özcebe, G.** (2010). Investigation of FRP strengthening design rules for in-sufficient RC columns. *Technical Journey*: 21(105):1425-1444.
- Park, R., & Paulay, T.** (1975). *Reinforced Concrete Structures*. John Wiley & Sons.
- Rakhshanimehr, M., Esfahani M. R., Kianoush M. R., Mohammadzadeh B. A., & Mousavi S. R.** (2014). Flexural ductility of reinforced concrete beams with lap-spliced bars. *Canadian Journal of Civil Engineering* 41(7): 594-604.
- Salesa, A., Esteban, L., & Barris, C.** (2022). Confinement of FRP concrete columns: Review of design guidelines and comparison with experimental results. *Materiales De Construcción*, 72(345).
- SAP2000** (Version 26.1.0) [Computer software]. (2024). Berkeley, CA: Computers and Structures Inc.
- Tapan, M., Cömert, M., Demir, C., Sayan, Y., Orakçal, K. & İlki, A.** (2013). Failures of Structures During the October 23, 2011 Tabanlı (Van) and November 9, 2011 Edremit (Van) Earthquakes in Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 34: 606-628.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği** (2018). *Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı (AFAD)*, Ankara, Türkiye.
- Ye, L.P., Zhang, K., Zhao, S.H. & Feng, P.** (2003). Experimental study on seismic strengthening of RC columns with wrapped CFRP sheets. *Construction and Building Materials* 17(6-7):499-506.

EKLER

EK A: Çalışma Kapsamında İncelenen Kolonlara Ait Geometrik, Malzeme ve Hesap Parametreleri



EK A

Çizelge A.1 : Literatürdeki kolon numunelerinin kesit geometrisi.

İlgili çalışma	Kolon numarası	f_{cm} (MPa)	f_{ym} (MPa)	f_{ywm} (MPa)	b (mm)	h (mm)	r_c (mm)	Enine donatı			Boyuna donatı		
								n	Φ (mm)	s	n	Φ (mm)	ρ
DelZoppo2017	F1	14.9	420	420	300	300	25	2	8	150	6	18	1.7%
DelZoppo2017	F2	16	420	420	300	300	25	2	8	150	6	18	1.7%
DelZoppo2017	F3	29.1	420	420	300	300	25	2	8	150	6	18	1.7%
DelZoppo2017	F4	33.3	420	420	300	300	25	2	8	150	6	18	1.7%
İlki2004	R-C-C-3	11.4	336	383	200	300	25	2	8	200	4	14	1.0%
Ye2003	CF30-1-48	25.84	396	331	200	200	20	2	6	200	8	16	4.0%
Ye2003	CF30-2-48	25.84	396	331.	200	200	20	2	6	200	8	16	4.0%
Ye2003	CF30-3-48	25.84	396	331	200	200	20	2	6	200	8	16	4.0%
Ye2003	CF30-4-48	25.84	396	331	200	200	20	2	6	200	8	16	4.0%
Iacobucci2003	ASC-2NS	36.5	465	457	305	305	16	3.41	9.5	300	8	19.5	2.6%
Iacobucci2003	ASC-3NS	36.9	465	457	305	305	16	3.41	9.5	300	8	19.5	2.6%
Iacobucci2003	ASC-4NS	36.9	465	457	305	305	16	3.41	9.5	300	8	19.5	2.6%
Iacobucci2003	ASC-5NS	37	465	457	305	305	16	3.41	9.5	300	8	19.5	2.6%
Iacobucci2003	ASC-6NS	37	465	457	305	305	16	3.41	9.5	300	8	19.5	2.6%
Ozcan2008	S-NL-1-27	19.4	287	287	350	350	30	2	10	200	8	18	1.7%
Ozcan2008	S-UL-1-34	14	287	287	350	350	30	2	10	200	8	18	1.7%

Çizelge A.1 (devam) : Literatürdeki kolon numunelerinin kesit geometrisi.

İlgili çalışma	Kolon numarası	f_{cm} (MPa)	f_{ym} (MPa)	f_{ywm} (MPa)	b (mm)	h (mm)	r_c (mm)	Enine donatı			Boyuna donatı		
								n	Φ (mm)	s	n	Φ (mm)	ρ
Ozcan2008	S-NL-2-39	11.4	287	287	350	350	30	2	10	200	8	18	1.7%
Ozcan2008	S-UL-2-32	15.6	287	287	350	350	30	2	10	200	8	18	1.7%
Memon2005	ASG-2NSS	42.5	465	457	305	305	16	3.41	9.5	300	8	19.5	2.6%
Memon2005	ASG-3NSS	42.7	465	457	305	305	16	3.41	9.5	300	8	19.5	2.6%
Memon2005	ASG-4NSS	43.3	465	457	305	305	16	3.41	9.5	300	8	19.5	2.6%
Memon2005	ASG-5NSS	43.7	465	457	305	305	16	3.41	9.5	300	8	19.5	2.6%
Memon2005	ASG-6NSS	44.2	465	457	305	305	16	3.41	9.5	300	8	19.5	2.6%
Bousias2004	US-C2	18.1	559.5	286	250	500	30	2	8	200	4	18	0.8%
Bousias2004	US-C5	17.9	559.5	286	250	500	30	2	8	200	4	18	0.8%
Bousias2004	US-G5	18.7	559.5	286	250	500	30	2	8	200	4	18	0.8%
Bousias2004	UW-C2	18.1	559.5	286	500	250	30	2	8	200	4	18	0.8%
Bousias2004	UW-C5	17.9	559.5	286	500	250	30	2	8	200	4	18	0.8%
Bousias2004	UW-G5	18.7	559.5	286	500	250	30	2	8	200	4	18	0.8%

Çizelge A.2 : Lifli polimer özellikleri.

İlgili Çalışma	Kolon Numarası	Lifli Polimer Türü	E_f (MPa)	ϵ_{fu}	t_f (mm)	w_f (mm)	s_f (mm)	n_f (mm)
DelZoppo2017	F1	Karbon	230000	0.013	0.33	tam sargı	-	1
DelZoppo2017	F2	Karbon	252000	0.019	0.33	tam sargı	-	1
DelZoppo2017	F3	Karbon	230000	0.013	0.33	tam sargı	-	2
DelZoppo2017	F4	Karbon	252000	0.019	0.33	tam sargı	-	2
İlki2004	R-C-C-3	Karbon	230000	0.015	0.165	tam sargı	-	3
Ye2003	CF30-1-48	Karbon	235000	0.0149	0.111	15	60	1
Ye2003	CF30-2-48	Karbon	235000	0.0149	0.111	23	60	1
Ye2003	CF30-3-48	Karbon	235000	0.0149	0.111	35	60	1
Ye2003	CF30-4-48	Karbon	235000	0.0149	0.111	60	60	1
Iacobucci2003	ASC-2NS	Karbon	76350	0.0126	1	tam sargı	-	1
Iacobucci2003	ASC-3NS	Karbon	76350	0.0126	1	tam sargı	-	2
Iacobucci2003	ASC-4NS	Karbon	76350	0.0126	1	tam sargı	-	1
Iacobucci2003	ASC-5NS	Karbon	76350	0.0126	1	tam sargı	-	3
Iacobucci2003	ASC-6NS	Karbon	76350	0.0126	1	tam sargı	-	2
Ozcan2008	S-NL-1-27	Karbon	230000	0.015	0.165	tam sargı	-	1
Ozcan2008	S-UL-1-34	Karbon	230000	0.015	0.165	tam sargı	-	1
Ozcan2008	S-NL-2-39	Karbon	230000	0.015	0.165	tam sargı	-	2
Ozcan2008	S-UL-2-32	Karbon	230000	0.015	0.165	tam sargı	-	2
Memon2005	ASG-2NSS	Cam	21346	0.0242	1.25	tam sargı	-	2
Memon2005	ASG-3NSS	Cam	21346	0.0242	1.25	tam sargı	-	4
Memon2005	ASG-4NSS	Cam	21346	0.0242	1.25	tam sargı	-	2
Memon2005	ASG-5NSS	Cam	21346	0.0242	1.25	tam sargı	-	1

Çizelge A.2 (devam) : Lifli polimer özellikleri.

İlgili Çalışma	Kolon Numarası	Lifli Polimer Türü	E_f (MPa)	ϵ_{fu}	t_f (mm)	w_f (mm)	s_f (mm)	n_f (mm)
Memon2005	ASG-6NSS	Cam	21346	0.0242	1.25	tam sargı	-	6
Bousias2004	US-C2	Karbon	230000	0.0150	0.13	tam sargı	-	2
Bousias2004	US-C5	Karbon	230000	0.0150	0.13	tam sargı	-	5
Bousias2004	US-G5	Cam	70000	0.0310	0.17	tam sargı	-	5
Bousias2004	UW-C2	Karbon	230000	0.0150	0.13	tam sargı	-	2
Bousias2004	UW-C5	Karbon	230000	0.0150	0.13	tam sargı	-	5
Bousias2004	UW-G5	Cam	70000	0.0310	0.17	tam sargı	-	5

Çizelge A.3 : Deneysel çalışma ve süneklik oranları.

İlgili çalışma	Kolon numarası	Kolon boyu (mm)	Sarılı bölge boyu (mm)	Eksenel yük oranı	Süneklik oranı
DelZoppo2017	F1	1500	500	0.1	7.2
DelZoppo2017	F2	1500	500	0.1	6.6
DelZoppo2017	F3	1500	500	0.1	8.2
DelZoppo2017	F4	1500	500	0.1	7.4
İlki2004	R-C-C-3	1500	500	0.37	4.5
Ye2003	CF30-1-48	600	600	0.48	3.41
Ye2003	CF30-2-48	600	600	0.48	3.87
Ye2003	CF30-3-48	600	600	0.48	4.5
Ye2003	CF30-4-48	600	600	0.48	5.77
Iacobucci2003	ASC-2NS	1473	610	0.38	6.1
Iacobucci2003	ASC-3NS	1473	610	0.65	5.6
Iacobucci2003	ASC-4NS	1473	610	0.65	5.2
Iacobucci2003	ASC-5NS	1473	610	0.65	7.1
Iacobucci2003	ASC-6NS	1473	610	0.38	7
Ozcan2008	S-NL-1-27	2000	500	0.27	6.0
Ozcan2008	S-UL-1-34	2000	500	0.34	7.1
Ozcan2008	S-NL-2-39	2000	500	0.39	8.0
Ozcan2008	S-UL-2-32	2000	500	0.32	5.9
Memon2005	ASG-2NSS	1473	610	0.38	5.9
Memon2005	ASG-3NSS	1473	610	0.65	5.2
Memon2005	ASG-4NSS	1473	610	0.65	4.7
Memon2005	ASG-5NSS	1473	610	0.38	5.1
Memon2005	ASG-6NSS	1473	610	0.65	6.8
Bousias2004	US-C2	1600	610	0.37	6.0
Bousias2004	US-C5	1600	610	0.39	4.4
Bousias2004	US-G5	1600	610	0.37	6.4
Bousias2004	UW-C2	1600	610	0.37	8.6
Bousias2004	UW-C5	1600	610	0.39	7.0
Bousias2004	UW-G5	1600	610	0.37	5.8

Çizelge A.4 : TBDY (2018)'e göre hesaplanan parametreler.

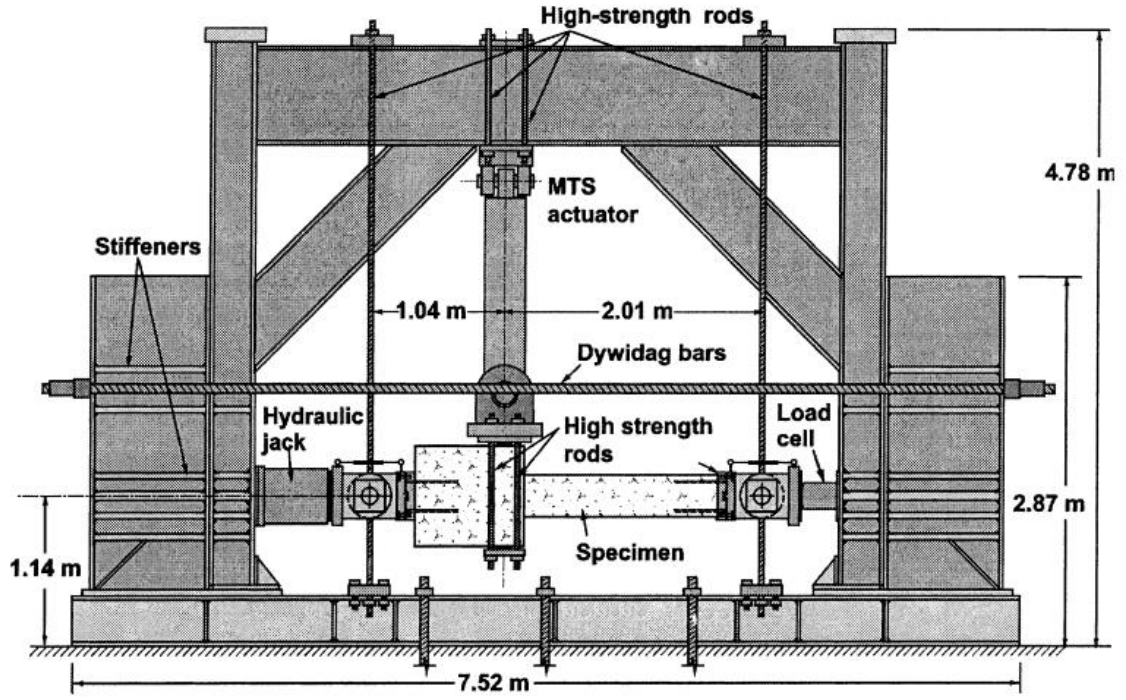
İlgili çalışma	Kolon numarası	ρ_f	ε_f	κ_a	f_l (MPa)	ε_{cc}	f_{cc} (MPa)
DelZoppo2017	F1	0.0044	0.0065	0.537	1.77	0.0081	19.1
DelZoppo2017	F2	0.0044	0.0095	0.537	2.83	0.0102	22.8
DelZoppo2017	F3	0.0088	0.0065	0.537	3.53	0.0082	37.6
DelZoppo2017	F4	0.0088	0.0095	0.537	5.66	0.0099	46.9
İlki2004	R-C-C-3	0.0083	0.0075	0.528	3.76	0.0150	20.4
Ye2003	CF30-1-48	0.0006	0.0074	0.573	0.28	0.0030	26.5
Ye2003	CF30-2-48	0.0009	0.0074	0.573	0.43	0.0034	26.9
Ye2003	CF30-3-48	0.0013	0.0074	0.573	0.65	0.0039	27.4
Ye2003	CF30-4-48	0.0022	0.0074	0.573	1.11	0.0048	28.5
Iacobucci2003	ASC-2NS	0.0131	0.0063	0.466	1.47	0.0047	40.0
Iacobucci2003	ASC-3NS	0.0262	0.0063	0.466	2.94	0.0065	44.0
Iacobucci2003	ASC-4NS	0.0131	0.0063	0.466	1.47	0.0047	40.4
Iacobucci2003	ASC-5NS	0.0393	0.0063	0.466	4.41	0.0081	47.6
Iacobucci2003	ASC-6NS	0.0262	0.0063	0.466	2.94	0.0065	44.1
Ozcan2008	S-NL-1-27	0.0019	0.0075	0.542	0.88	0.0050	21.5
Ozcan2008	S-UL-1-34	0.0019	0.0075	0.542	0.88	0.0058	16.1
Ozcan2008	S-NL-2-39	0.0038	0.0075	0.542	1.76	0.0094	15.6
Ozcan2008	S-UL-2-32	0.0038	0.0075	0.542	1.76	0.0079	19.8
Memon2005	ASG-2NSS	0.0328	0.0100	0.466	1.63	0.0046	46.4
Memon2005	ASG-3NSS	0.0656	0.0100	0.466	3.26	0.0064	50.5
Memon2005	ASG-4NSS	0.0328	0.0100	0.466	1.63	0.0046	47.2
Memon2005	ASG-5NSS	0.0164	0.0100	0.466	0.82	0.0035	45.7
Memon2005	ASG-6NSS	0.0984	0.0100	0.466	4.89	0.0078	55.9
Bousias2004	US-C2	0.0031	0.0075	0.387	1.04	0.0055	20.6
Bousias2004	US-C5	0.0078	0.0075	0.387	2.61	0.0091	24.2
Bousias2004	US-G5	0.0102	0.0100	0.387	1.38	0.0063	22.0
Bousias2004	UW-C2	0.0031	0.0075	0.387	1.04	0.0055	20.6
Bousias2004	UW-C5	0.0078	0.0075	0.387	2.61	0.0091	24.2
Bousias2004	UW-G5	0.0102	0.0100	0.387	1.38	0.0063	22.0

Çizelge A.5 : Kesit analizi ve yerdeğiştirme hesabı.

İlgili alışma	Kolon numarası	Kesit analizi			Yerdeğiştirme hesabı					
		ϕ_y (m ⁻¹)	ϕ_u (m ⁻¹)	ϕ_p (m ⁻¹)	L_p (m)	θ_p (rad)	Δ_p (m)	Δ_y (m)	Δ_{kolon} (m)	Süneklik oranı
DelZoppo2017	F1	0.015	0.179	0.131	0.15	0.020	0.028	0.011	0.039	3.5
DelZoppo2017	F2	0.015	0.244	0.131	0.15	0.020	0.028	0.011	0.039	3.5
DelZoppo2017	F3	0.014	0.189	0.131	0.15	0.020	0.028	0.011	0.039	3.6
DelZoppo2017	F4	0.014	0.244	0.131	0.15	0.020	0.028	0.011	0.039	3.6
İlki2004	R-C-C-3	0.017	0.164	0.147	0.15	0.022	0.032	0.013	0.044	3.5
Ye2003	CF30-1-48	0.025	0.025	0.000	0.10	0.000	0.000	0.003	0.003	1.0
Ye2003	CF30-2-48	0.025	0.029	0.003	0.10	0.000	0.000	0.003	0.003	1.1
Ye2003	CF30-3-48	0.025	0.031	0.006	0.10	0.001	0.000	0.003	0.003	1.1
Ye2003	CF30-4-48	0.026	0.041	0.016	0.10	0.002	0.001	0.003	0.004	1.3
Iacobucci2003	ASC-2NS	0.018	0.031	0.013	0.15	0.002	0.003	0.013	0.016	1.2
Iacobucci2003	ASC-3NS	0.012	0.031	0.019	0.15	0.003	0.004	0.009	0.013	1.5
Iacobucci2003	ASC-4NS	0.012	0.022	0.010	0.15	0.001	0.002	0.009	0.011	1.2
Iacobucci2003	ASC-5NS	0.012	0.043	0.030	0.15	0.005	0.006	0.009	0.015	1.7
Iacobucci2003	ASC-6NS	0.018	0.046	0.028	0.15	0.004	0.006	0.013	0.019	1.5
Ozcan2008	S-NL-1-27	0.013	0.032	0.019	0.18	0.003	0.006	0.017	0.023	1.4
Ozcan2008	S-UL-1-34	0.015	0.032	0.017	0.18	0.003	0.006	0.019	0.025	1.3

Çizelge A.5 (devam) : Kesit analizi ve yerdeğiştirme hesabı.

İlgili çalışma	Kolon numarası	Kesit analizi			Yerdeğiştirme hesabı					
		ϕ_y (m ⁻¹)	ϕ_u (m ⁻¹)	ϕ_p (m ⁻¹)	L_p (m)	θ_p (rad)	Δ_p (m)	Δ_y (m)	Δ_{kolon} (m)	Süneklik oranı
Ozcan2008	S-NL-2-39	0.013	0.054	0.041	0.18	0.007	0.014	0.018	0.032	1.8
Ozcan2008	S-UL-2-32	0.014	0.050	0.036	0.18	0.006	0.012	0.019	0.031	1.6
Memon2005	ASG-2NSS	0.018	0.030	0.012	0.15	0.002	0.003	0.013	0.015	1.2
Memon2005	ASG-3NSS	0.012	0.031	0.019	0.15	0.003	0.004	0.009	0.013	1.5
Memon2005	ASG-4NSS	0.012	0.021	0.009	0.15	0.001	0.002	0.009	0.011	1.2
Memon2005	ASG-5NSS	0.018	0.021	0.003	0.15	0.001	0.001	0.013	0.014	1.1
Memon2005	ASG-6NSS	0.012	0.040	0.028	0.15	0.004	0.006	0.009	0.015	1.7
Bousias2004	US-C2	0.011	0.024	0.013	0.25	0.003	0.005	0.009	0.014	1.5
Bousias2004	US-C5	0.011	0.047	0.036	0.25	0.009	0.013	0.009	0.022	2.5
Bousias2004	US-G5	0.011	0.030	0.019	0.25	0.005	0.007	0.009	0.016	1.7
Bousias2004	UW-C2	0.022	0.048	0.026	0.13	0.003	0.005	0.019	0.024	1.3
Bousias2004	UW-C5	0.022	0.094	0.072	0.13	0.009	0.014	0.018	0.032	1.8
Bousias2004	UW-G5	0.022	0.059	0.036	0.13	0.005	0.007	0.019	0.026	1.4



Şekil A.1 : Çevrimsel yükleme için deney düzeneği (Iacobucci ve diğ., 2003).



Şekil A.2 : Lifli polimer ile sargılanmamış kolonlara ait deney sonunda gözlenen hasar durumu (İlki ve diğ., 2008).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil A.3 : Lifli polimer ile sargılanmış kolonlarda hasarın gelişimi (İlki ve diğ., 2008).



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Gönül ANDIRIR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2023, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2023 yılından itibaren Arup Mühendislik'te Yapı Mühendisi olarak çalışıyor.
- 2022-2023 yılları arasında Tübitak Star Bursiyeri olarak “Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Yeni Bir Performans Hedefi: Onarılabilir Hasar ve Yönetmeliklere Uygun İnşa Edilmiş Yapılar için Yenilikçi Onarım Yöntemleri” projesinde stajyerlik yaptı.
- 2021 yılında “Levazım-Dolmabahçe Tüneli” projesinde saha stajını tamamladı.

YAYINLAR:

- Shegay, A. V., Kusunoki, K., İlki, A., Tajiri, S., Maeda, M., Demir, C., Aydogdu, H. H., Atasever, K., Halici, O., Asai, T., Raouffard, M. M., Liu, H., Monical, J., Sugimoto, K., Cinar, T., Dogan, F., Demir, U., Nakamura, A., Yoon, R., Onishi, N., Goksu, C., Orakcal, K., Yazgan, U., Lus, H., Tura, C., Gullu, M. F., Unal, G., Yenidogan, C. & **Andirir, G.** 2024. Performance of RC Buildings in the 2023 Turkey-Syria Earthquakes. *NZSEE Annual Conference 2024*, New Zealand Society for Earthquake Engineering, New Zealand.
- Tajiri, S., Yang, J., Maeda, H., Liu, A., Shegay, A. V., Asai, M., Raouffard, M. M., Sugimoto, K., Cinar, T., Dogan, U., Demir, C., Demir, H. H., Aydogdu, K., Atasever, O., Halici, K., Nakamura, R., Yoon, H., Kusunoki, A., İlki, A., Goksu, C., Orakcal, K., Lus, H., Tura, C., Gullu, M. F., Unal, G., Yenidogan, C. & **Andirir, G.** 2024. Japanese and Turkish Joint Detailed Survey of RC Buildings Damaged by the 2023 Turkey Earthquake. *18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE 2024)*, June 30 - July 5, 2024, Milan, Italy.