



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**BETONARME KOLONLARDA EKSENEL YÜK
ORANI VE BURULMA MOMENTİNİN,
EĞİLME DAYANIMINA ETKİSİ**

Salih CENGİZ

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Salih CENGİZ tarafından hazırlanan “BETONARME KOLONLARDA EKSENEL YÜK ORANI VE BURULMA MOMENTİNİN, EĞİLME DAYANIMINA ETKİSİ” adlı tez çalışması 25/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ahmet YAKUT
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

.....

Danışman

Prof. Dr. Mehmet KAMANLI
Konya Teknik Üniversitesi

.....

Üye

Prof. Dr. Barış BİNİCİ
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

.....

Üye

Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL
Konya Teknik Üniversitesi

.....

Üye

Doç. Dr. Tolga YILMAZ
Konya Teknik Üniversitesi

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması KTÜN-BAP tarafından 221104022 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Salih CENGİZ

15.05.2025

ÖZET

DOKTORA TEZİ

BETONARME KOLONLARDA EKSENEL YÜK ORANI VE BURULMA MOMENTİNİN, EĞİLME DAYANIMINA ETKİSİ

Salih CENGİZ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet KAMANLI

2025, 163 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mehmet KAMANLI

Prof. Dr. Ahmet YAKUT

Prof. Dr. Barış BİNİCİ

Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL

Doç. Dr. Tolga YILMAZ

Deprem kuşağında yer alan ülkemizdeki binaların çok büyük kısmı betonarme taşıyıcı sistem ile inşa edilmiştir. Binaların depreme dayanıklı olması için betonarme elemanlarla ilgili çok sayıda deneysel ve analitik çalışmalar yapılmakta ve deprem yönetmelikleri bu çalışmalar neticesinde güncellenmektedir. Binalardaki en önemli yapı elemanlarından biri kolonlardır. Betonarme kolonların farklı etkiler altındaki davranışının incelenmesi, deprem kuşağında yer alan binaların emniyeti için oldukça önemlidir. Mevcut yapı stoğunun yaklaşık üçte biri 2000 yılı öncesi inşa edilen ülkemizdeki binaların çoğunda burulma düzensizliği bulunmaktadır. Özellikle 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinde birçok binada burulmaya bağlı göçmenin meydana geldiği tespit edilmiştir. Betonarme kolonların burulma etkisindeki davranışının incelenmesi, bunun sonucunda uygun güçlendirme tekniklerinin hazırlanması, can ve mal kayıplarının önlenmesi bakımından oldukça önemlidir. Bu çalışmada 10 adet betonarme kolonun, farklı eksenel yük ve burulma etkilerindeki eğilme davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın değişkenlerini eksenel yük oranı, eksenel dönme/yatay ötelenme oranı ve enine donatı aralığı oluşturmaktadır. Çalışmadan elde edilen veriler ışığında kolonlara ait yük-deplasman, zarf eğrisi, eğilme momenti-eğrilik, burulma momenti-dönme, rijitlik ve kümülatif tüketilen enerji grafikleri çizilmiştir. Deney esnasında kolonlarda meydana gelen hasarlar incelenmiş, plastik mafsallık bölgeleri ölçülmüş ve çalışmanın değişkenlerine bağlı olarak yeni bir plastik mafsallık modeli önerilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak betonarme kolonlara ait eksenel yük-burulma momenti-eğilme momentini içerecek yeni bir üçlü etkileşim modeli sunulmuştur. Hem plastik mafsallık modeli hem de üçlü etkileşim modeli literatürdeki diğer modeller ile kıyaslanarak etkinliği tartışılmıştır. Kolonlarda meydana gelen plastik dönme değerleri ile TBDY-2018'deki plastik dönme sınır değerleri karşılaştırılarak burulma etkisinin önemi açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Betonarme kolon, burulma, deneysel çalışma, eksenel yük

ABSTRACT

PhD THESIS

THE EFFECT OF AXIAL LOAD RATIO AND TORSIONAL MOMENT ON THE FLEXURAL CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS

Salih CENGİZ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Mehmet KAMANLI

2025, 163 Pages

Jury

**Advisor Prof. Dr. Mehmet KAMANLI
Prof. Dr. Ahmet YAKUT
Prof. Dr. Barış BİNİCİ
Assoc. Prof. Dr. Alptuğ ÜNAL
Assoc. Prof. Dr. Tolga YILMAZ**

In our country, which is located in an earthquake zone, a large majority of buildings have been constructed with reinforced concrete load-bearing systems. To ensure that buildings are earthquake-resistant, numerous experimental and analytical studies related to reinforced concrete elements are being conducted, and earthquake regulations are updated as a result of these studies. One of the most important structural elements in buildings is columns. Investigating the behavior of reinforced concrete columns under different effects is crucial for the safety of buildings located in earthquake zones. Approximately one-third of the existing building stock in our country, most of which was built before the year 2000, has torsional irregularities. It has been determined that many buildings experienced torsional collapse during the earthquakes in Kahramanmaraş on February 6, 2023. Examining the behavior of reinforced concrete columns under torsional effects and preparing appropriate strengthening techniques as a result is very important for preventing loss of life and property. In this study, the bending behaviors of 10 reinforced concrete columns under different axial loads and torsional effects were experimentally investigated. The variables of the study include axial load ratio, axial rotation/lateral displacement ratio, and transverse reinforcement spacing. Based on the data obtained from the study, load-displacement, envelope curve, bending moment-curvature, torsional moment-rotation, stiffness, and cumulative energy consumption graphs for the columns were drawn. The damages that occurred in the columns during the experiment were examined, plastic hinge regions were measured, and a new plastic hinge model was proposed based on the variables of the study. Using the obtained data, a new triple interaction model that includes axial load-torsional moment-bending moment for reinforced concrete columns was presented. Both the plastic hinge model and the triple interaction model were discussed in terms of their effectiveness by comparing them with other models in the literature. The plastic rotation values that occurred in the columns were compared with the plastic rotation limit values in TBDY-2018 to evaluate the torsional effect.

Keywords: Reinforced concrete column, torsion, experimental study, axial load

ÖNSÖZ

Son büyük yıkıcı deprem olan 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinde çok sayıda vatandaşımız vefat etmiş, büyük ekonomik kayıplar meydana gelmiş, ülkemizin sosyo-kültürel yapısında değişiklikler olmuştur. Depremlerin felakete dönüşmesinin en büyük nedenlerinden biri de depreme dayanıksız yapıların inşa edilmesidir. Bunun önüne geçilmesi için öncelikle yapı elemanlarının deprem etkisi altında yeterli dayanıma, sünekliğe ve rijitliğe sahip olması gerekir. Gelişen teknoloji ve artan bilgi birikimi sayesinde her geçen gün yapılan bilimsel çalışmalar ile yapı elemanlarının çeşitli yükler altındaki davranışı daha da iyileştirilmektedir. Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen bu tez çalışması ile betonarme kolonların farklı eksenel yük, burulma ve eğilme altındaki davranışı araştırılmıştır.

Bu doktora tezinin hazırlanma sürecinde katkıda bulunan tüm akademisyenlere, araştırmacılara, kurumlara ve aileme en derin şükranlarımı sunarım. Çalışmanın her aşamasında bilimsel rehberliği, değerli yorumları ve akademik desteği ile katkı sağlayan danışmanım Prof. Dr. Mehmet KAMANLI'ya müteşekkirim. Deneysel çalışmanın planlanması, uygulanması, verilerin işlenmesi ve sonuçların yorumlanması aşamalarında her türlü bilgi ve deneyimini sonuna kadar paylaşan, tez çalışmamın her aşamasında yanımda olan Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL'a sonsuz teşekkürlerimi arz ederim. Arş. Gör. Abdulkadir SOLAK'a, İnş. Yük. Müh. Oğuz Kağan KESKİN'e ve İnş. Müh. Mehmet Emin YİĞİT'e deneylerin yapılmasındaki yardımlarından dolayı şükranlarımı sunarım. Deneylerin tasarımı ve veri toplama süreçlerindeki titiz çalışmaları, bu araştırmanın deneysel kısmının güvenilirliğini sağlamıştır. Teorik çerçevenin oluşturulması ve analizlerin derinleştirilmesinde değerli görüşleriyle katkıda bulunan Prof. Dr. Barış BİNİCİ'ye ve Prof. Dr. Mahmut Sami DÖNDÜREN'e teşekkür ederim. Numune üretim sürecinde teknik destek sağlayan Öğr. Gör. Dr. Mustafa Selami MUSLU'ya ve deneylerde kullanılan otomasyon sisteminin hazırlanmasını sağlayan Öğr. Gör. Dr. Ali Sait ÖZER'e teşekkür ederim. Ayrıca, deneysel düzeneğin kurulumu ve optimizasyonu konusunda desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Mustafa Tolga ÇÖĞÜRCÜ'ye ve teknik katkılarından dolayı İnş Müh. Mehmet USLU'ya teşekkür ederim. Deneysel çalışmada kullanılan otomasyon sisteminin laboratuvara kazandırılmasında desteklerini esirgemeyen Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Dekanı Prof. Dr. Ali KÖKEN'e teşekkür ederim. Endüstriyel iş birliği kapsamında, deney numunelerinin imalatını gerçekleştiren Presan Prefabrik Şti.'ye, deneysel ekipmanların tasarım ve üretiminde katkı sağlayan Güneydere Çelik Konstrüksiyon Şti. ve Hidroliksan Ltd. Şti.'ye müteşekkirim. Son olarak, bu uzun ve zorlu akademik yolculuk boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen eşime en içten şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmanın, inşaat mühendisliği alanındaki bilimsel birikime katkı sağlamasını ve gelecekte yapılacak araştırmalara ışık tutmasını temenni ederim.

Salih CENGİZ
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı	5
1.2. Tezin Önemi	6
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
2.1. Burulmanın Tarihi.....	7
2.2. Betonarme Kolonların Burulma Davranışı ile İlgili Yapılan Çalışmalar	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM	34
3.1. Betonarme Kolonların Tasarımı	34
3.2. Deney Numunelerinin Üretimi ve Malzeme Özellikleri.....	37
3.2. Deney Düzeneği	40
3.3. Yükleme Protokolü.....	43
3.3. Ölçümlerin Değerlendirilmesi.....	48
3.3.1. Yük-deplasman grafiklerinin oluşturulması	48
3.3.2. Eğilme momenti-Eğrilik grafiklerinin oluşturulması.....	49
3.3.3. Burulma momenti-dönme grafiklerinin oluşturulması.....	49
3.3.4. Enerji tüketim grafiklerinin oluşturulması	49
3.3.5. Rijitlik grafiklerinin oluşturulması.....	50
3.3.6. Elemanların süneklik katsayılarının hesabı	50
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	51
4.1. Deney Sonuçları.....	52
4.1.1. T1-N10-S8.....	52
4.1.2. T1-N20-S8.....	59
4.1.3. T1-N30-S8.....	66

4.1.4. T1-N40-S8.....	73
4.1.5. T2-N20-S8.....	80
4.1.6. T1-N30-S16.....	87
4.1.7. T0-N20-S8.....	94
4.1.8. T0-N30-S8.....	101
4.1.9. M0-N20-S8.....	108
4.1.10. M0-N30-S8.....	115
4.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	122
4.2.1. Eksenel yük oranının kolon davranışına etkisi.....	123
4.2.2. Burulmanın kolon davranışına etkisi.....	126
4.2.3. Enine donatı aralığının kolon davranışına etkisi	129
4.3. Plastik Mafsal Boyu Hesabı.....	131
4.3.1 DeneySEL veriler ve parametreler.....	131
4.3.2. Ampirik model geliştirilmesi.....	132
4.3.3. Regresyon analizi ve katsayıların belirlenmesi	133
4.3.4. Modelin doğrulanması.....	134
4.4. Etkileşim Modeli.....	136
4.5. Kolonların Plastik Dönme Limitleri.....	137
4.6. Tartışma.....	139
4.6.1. Yük taşıma kapasitelerinin değerlendirilmesi	140
4.6.2. Çatlakların değerlendirilmesi	140
4.6.3. Eksenel yük etkisinin değerlendirilmesi	140
4.6.4. Burulmanın etkisinin değerlendirilmesi	141
4.6.5. Enine donatı etkisinin değerlendirilmesi.....	141
4.6.6. Plastik mafsal boyu modellerinin karşılaştırmalı analizi	142
4.6.7. Etkileşim modellerinin karşılaştırmalı analizi.....	144
4.6.8. Plastik dönme limitlerinin karşılaştırılması.....	148
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	150
5.1. Sonuçlar.....	151
5.2. Öneriler	153
KAYNAKLAR.....	155
EK-1.....	162

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_c	: Kolon kesit alanı (mm^2)
b	: Kolon kesit genişliği (mm)
B420C	: Akma dayanımı 420 MPa olan donatı
cm	: Santimetre
C25	: 28 günlük silindir basınç dayanımı 25 MPa olan beton sınıfı
d_b	: Boyuna donatı çapı (mm)
f_{ck}	: Beton karakteristik basınç dayanımı (N/mm^2)
F	: Kolon üstündeki kiriş uçlarına uygulanan kuvvet (kN)
h	: Kolon kesit uzunluğu (mm)
H	: Kolon yüksekliği (mm)
kN	: Kilo Newton
L_p	: Plastik mafsallık uzunluğu (mm)
L_s	: Kesme açıklığı (m)
m	: Metre
mm	: Milimetre
M	: Eğilme momenti (kN.m)
M_0	: Salt eğilme kapasitesi (kN.m)
M_w	: Moment büyüklüğü (N.m)
n	: Eksenel yük oranı
N	: Eksenel yük (kN)
r	: Eksenel dönme/yatay ötelenme oranı
R_e	: Donatı akma dayanımı (N/mm^2)
R_m	: Donatı çekme dayanımı (N/mm^2)
s	: Enine donatı aralığı (mm)
T	: Burulma momenti (kN.m)
T_0	: Salt burulma kapasitesi (kN.m)
θ	: Eksenel dönme (rad)
θ_p	: Plastik dönme (rad)
Δ	: Yatay ötelenme oranı
Φ	: Donatı çapı (mm)
φ	: Eğrilik (rad/m)
φ_u	: Göçme öncesi eğrilik (rad/m)
φ_y	: Akmadaki eğrilik (rad/m)
μ	: Süneklik katsayısı
ρ	: Donatı oranı
3B	: Üç boyutlu

Kısaltmalar

ABYYHY	: Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
ACI	: American Concrete Institute
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
ASCE	: American Society of Civil Engineers
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TDY	: Türk Deprem Yönetmeliği
T0	: Burulma/Eğilme oranının 0 olduğunu (Salt Eğilme)
T1	: Burulma/Eğilme oranının 1 olduğunu
T2	: Burulma/Eğilme oranının 2 olduğunu
M0	: Burulma/Eğilme oranının ∞ olduğunu (Salt Burulma)
N10	: Eksenel yük oranının 0.10 olduğunu
N20	: Eksenel yük oranının 0.20 olduğunu
N30	: Eksenel yük oranının 0.30 olduğunu
N40	: Eksenel yük oranının 0.40 olduğunu
S8	: Enine donatı aralığının 80 mm olduğunu
S16	: Enine donatı aralığının 160 mm olduğunu ifade etmektedir.

1. GİRİŞ

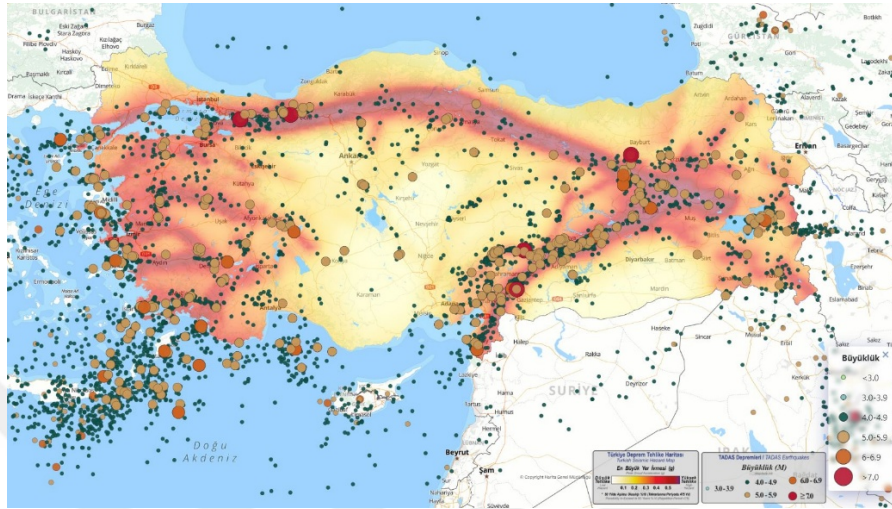
Depremler, yer kabuğu içerisinde biriken tektonik gerilimin, fay hatları boyunca bir kırılma ile ani olarak açığa çıkması sonucu meydana gelen doğal olaylardır. Bu süreçte, kırılma noktasında biriken elastik enerji sismik dalgalar şeklinde çevreye yayılır ve yeryüzünde titreşimler oluşturur. Bu olgu, ilk olarak Reid (1910) tarafından geliştirilen elastik geri sekme kuramı ile açıklanmış; yer kabuğunun elastik özellikleri nedeniyle gerilme altında enerji biriktirdiği ve bu birikimin kayma direncini aştığında ani bir boşalma ile kırılma meydana getirdiği ortaya konmuştur. Depremler genellikle tektonik levha sınırlarında gözlenmekte olup, büyüklükleri moment magnitudü (M_w) gibi ölçütlerle ifade edilmektedir. Depremler sadece yer hareketi oluşturmakla kalmaz, aynı zamanda zemin özelliklerini etkileyerek sıvılaşma, oturma, taşıma gücü kaybı gibi mühendislik açısından kritik sonuçlara da yol açabilir.

Türkiye gibi aktif tektonik kuşaklar üzerinde yer alan ülkelerde, depremler hem can hem de mal kayıplarına yol açmakta ve yapı stokunun güvenliğini doğrudan tehdit etmektedir. Bu nedenle inşaat mühendisliğinde, yapıların depreme karşı dayanıklı olarak tasarlanması ve bu amaçla yapı elemanlarının (kolon, kiriş, perde gibi) sismik davranışlarının doğru şekilde modellenmesi hayati önem taşır. Betonarme sistemlerin deprem yükleri altındaki davranışı, plastikleşme kapasiteleri, süneklik düzeyleri ve enerji yutma yetenekleriyle yakından ilişkilidir. Bu kapsamda, yapı elemanlarının taşıma gücü sınırlarının yanı sıra, plastik dönme kapasiteleri gibi parametrelerin belirlenmesi, performans dayalı tasarım anlayışı çerçevesinde yapı güvenliğinin sağlanması açısından önem arz etmektedir (Celep, 2019).

Arap, Afrika ve Avrasya levhalarının hareketi nedeniyle Anadolu levhasında tektonik faaliyetler oluşmaktadır. Bu tektonik faaliyetlerin sonucunda Türkiye’de çok sayıda büyük depremler meydana gelmektedir (1992 Erzincan Depremi, $M_w = 6.8$; 1996 Adana-Ceyhan Depremi, $M_w = 6.3$; 1999 Adapazarı-İzmit Depremi, $M_w = 7.4$; 1999 Düzce Depremi, $M_w = 7.2$; 2002 Afyon-Sultandağı Depremi, $M_w = 6.5$; 2003 Bingöl Depremi, $M_w = 6.4$; 2010 Elazığ Depremi, $M_w = 6.0$; 2011 Van Depremi, $M_w = 7.2$; 2011 Simav Depremi, $M_w = 5.7$; 2019 Sivrice Depremi, $M_w = 5.2$; 2020 Seferihisar (İzmir) Depremi, $M_w = 6.6$; 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) Depremi, $M_w = 7.7$; 2023 Elbistan (Kahramanmaraş) Depremi, $M_w = 7.6$; 2023 Yayladağı (Hatay) Depremi, $M_w = 6.4$) (AFAD, 2023; Koçer ve Ünal, 2023) (Şekil 1.1).

Türkiye’deki binaların altyapı değerlendirmesi yapıldığında, betonarme binalar için en önemli yıl 1997’dir. Bu tarihten önce inşa edilen binalarda etriye sıklaştırması, hazır beton kullanımı, nervürlü donatı kullanımı, güçlü kolon-zayıf kiriş gibi modern taşıyıcı sistem koşullarına dikkat edilmemiştir (ABYYHY, 1975; İlki ve Celep, 2012). Türkiye’de 1997 yılında

Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik yayınlanmış ve 1998 yılında yürürlüğe girmiştir (ABYYHY, 1998). 2007 yılında Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (TDY, 2007) olarak güncellenmiştir. Son olarak bina tasarımında ciddi değişiklikler yapılarak 2018 yılında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) yürürlüğe girmiştir.

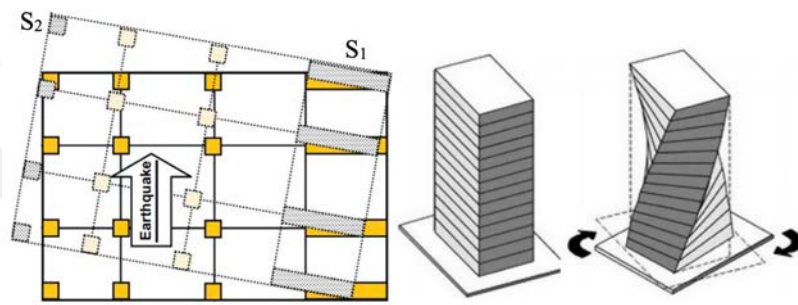


Şekil 1.1. Türkiye’de son 30 yılda meydana gelen büyük depremler (AFAD, 2024)

Türkiye’deki konutların %12.6’sı 1980 yılı öncesi, %30.9’u 1981-2000, %19.3’ü 2001-2010, %28.1’i ise 2011-2021 yılları arasında inşa edilmiştir (TÜİK, 2022). Açıkça görüleceği üzere Türkiye’deki konutların büyük bölümü 1997 yılı öncesinde inşa edilmiştir. Bununla birlikte Türkiye’de yaşayan insanların %90’dan fazlası deprem riskinin büyük olduğu yerleşim yerlerinde yaşamaktadır (Öcal ve İnce, 2012). Dolayısıyla hem binaların yapım yılı ve koşulları hem de insanların yaşadığı bölgedeki deprem riskinin büyüklüğü düşünüldüğünde, tehlikenin boyutu daha iyi anlaşılmaktadır.

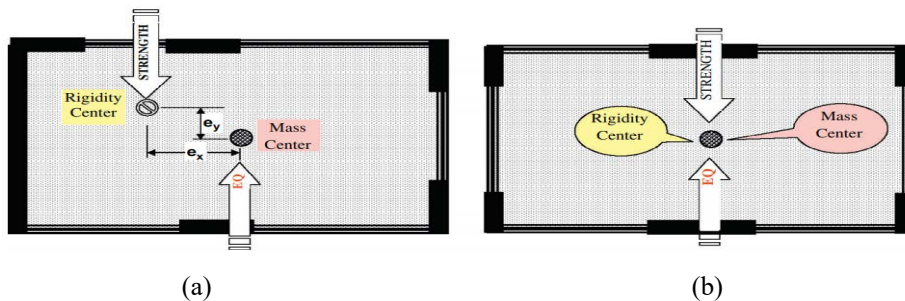
(ASCE/SEI, 2017) Artan mimari çeşitlilik ve işlevsel gereksinimlerle birlikte birçok düzensiz yapı ortaya çıkmıştır. Deprem meydana geldiği zaman özellikle düzensiz yapılarıdaki köşe kolonları basınç, eğilme, kesme ve burulma etkilerine maruz kalır. Burulma etkisinin dahil edilmesiyle bir yapısal elemanın yük taşıma kapasitesi, basınç, eğilme ve kesme yükü kombinasyonuna maruz kaldığından daha düşük olabilir (Nie ve diğ., 2012). Fakat ne Türkiye (TBDY, 2018), ne Amerika (ASCE/SEI, 2017) ne de Avrupa (Eurocode-8, 2005) yönetmeliği, basınç-eğilme-kesme etkileri ile birlikte burulma etkisinin olduğu betonarme bir kolon için tasarım veya hesaplama yöntemleri sunmamaktadır. Çelik donatılı betonarme kolonların burulma kapasitesinin hesaplanmasına ilişkin bilgilere sadece Japon Şartnamelerinde yer verilmiştir (Gourley ve diğ., 2008).

Yapılar üzerinde düzensizlikler oluşturan uygulamalar, daha karmaşık bir yapısal sistem davranışına yol açar. Çeşitli yük modelleri altında, düzensiz yapılar üzerinde beklenmedik etkiler gözlemlenebilir. Deprem yükleri düzensiz yapılarda, mevcut etkilere ilave olarak kesme ve burulma gibi etkilere neden olur. Bu nedenle yapısal düzensizlikler binaların sismik performansını önemli ölçüde düşürmektedir. Şekil 1.2’de görüldüğü üzere, bazı düşey taşıyıcı elemanlar (S1) sadece dönme hareketi yaparken, bazıları (S2) ise hem dönme hem de ötelenme yapmaktadır. Dolayısıyla kolonlar üzerinde hem eğilme hem de burulma momentleri oluşmakta ve karmaşık bir yük etkisi meydana gelmektedir. Bu durum, elemanların tasarımı yapılırken kullanılan hesap modellerinde dikkate alınmamakta ve gerçek davranışın oluşturabileceği tehlikeler göz ardı edilmektedir.



Şekil 1.2. Düzensiz yapılardaki burulma etkisi (Gokdemir vd., 2013)

Deprem yükü, yapının kütle merkezine etki etmektedir. Bununla birlikte yapı, deprem yüküne rijitlik merkezi denilen bir noktada karşı koyar. Burulma problemleri, kütle merkezi ile rijitlik merkezi aynı yerde bulunmadığında ortaya çıkar. Yapı, kütle merkezi ile rijitlik merkezi arasındaki mesafeden dolayı, rijitlik merkezi etrafında dönmeye zorlanır ve büyük burulma momentlerine maruz kalmaktadır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Binalarda burulmanın oluşması (a) Düzensiz yapı, (b) düzenli yapı (Gokdemir vd., 2013)

Son büyük ve yıkıcı deprem olan 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş depremlerinin ardından, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yapılan hasar tespit çalışmaları sonucunda 227.027 binanın acil yıkılacak, ağır hasarlı ve yıkık olduğu

ifade edilmiştir. Yapılan incelemeler sonucu göçen binaların büyük kısmınının 1975 yönetmeliğine göre projelendirildiği ve 1990-1997 tarihleri arasında inşa edildiği anlaşılmıştır. İnşaat Mühendisleri Odası'nın 14.02.2023 tarihinde yayınladığı “İnşaat Mühendisleri Odası 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Pazarcık ve Elbistan Depremleri Ön Değerlendirme Raporu” adlı çalışmada, “*Taşıyıcı sistemde rijitliğin düzensiz dağılımından kaynaklanan büyük burulma tesirlerinin sonucunda göçmeler olduğu göçme görüntülerinden anlaşılabilmektedir. Perde gibi daha rijit düşey taşıyıcı elemanların bir tarafta yığılı olması, çerçeve süreksizliklerinin var olması burulma düzensizliğini yaratan unsurlardır.*” ifadesine rastlanmıştır (İMO, 2023). Rapordaki ifadede binalardaki düzensizliklerden kaynaklı burulma etkilerinin, dolayısıyla burulma hasarlarının oluştuğu ve buna bağlı olarak göçmelerin meydana geldiği anlaşılmaktadır.

Betonarme yapıların tasarımı yapılırken, yapıya gelen yükler hesaplanır ve bu yükleri taşıyacak elemanlar boyutlandırılır. Betonarmenin ortaya çıktığı ilk yıllarda boyutlandırma yapılırken *Taşıma Gücü Yöntemi* kullanılmaktaydı. Bu yöntemde elemanların gerçek davranışı dikkate alınmakta ve buna göre tasarım yapılmaktadır. XX. yy'ın başında çelik için yapılan hesaplarda *Elastisite Teorisi* kullanıldığından, betonarme için yapılan hesaplarda da bu teorenin kullanımı yaygınlaşmış ve *Emniyet Gerilmeleri Yöntemi* kullanılmaya başlanmıştır. *Emniyet Gerilmeleri Yöntemi*'nde malzemeler doğrusal elastik kabul edilmekte ve buna göre tasarım yapılmaktaydı. Bu durum ise beton gibi heterojen ve elastoplastik bir malzemenin davranışını tam olarak yansıtmamaktadır. 1930'lu yıllarda yapılmaya başlanan araştırmalar sonucu *Emniyet Gerilmeleri Yöntemi*'nin betonarme elemanlar için güvenilir olmadığı anlaşılmıştır. Bunun sonucunda betonarme yapı tasarımı yapılırken bu yöntemden vazgeçilmiş ve *Taşıma Gücü Yöntemi*'ne tekrar dönmüştür. Bu sayede çok daha sağlam betonarme yapılar inşa edilebilmiştir (Ersoy, 2016). Tüm bu gelişmeler, betonarme elemanların doğru tasarımı için, elemanların gerçek davranışının iyi bilinmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Betonarme elemanların davranışını açıklamak üzere çok sayıda deneysel ve analitik çalışma yapılmaktadır. Elastoplastik ve kompozit özellikteki betonarmenin çeşitli yükler altındaki davranışını incelemek için özellikle deneysel çalışmalar büyük önem arz etmektedir. Araştırmacılar betonarme elemanların tipine bağlı olarak farklı deneysel çalışmalar yapmaktadır. Örneğin kirişler için eğilme-burulma-kesme deneyleri, kolonlar ve perdeler için eksenel yük-eğilme deneyleri gibi deneyler yapılmaktadır. Gelişen teknoloji ile elemanlara çok daha kompleks yükler verilmeye başlanmış ve daha gerçekçi sonuçlar elde edilmeye başlanmıştır. Altyapı imkanları, bütçe, teknoloji gibi birçok unsur, deneysel çalışmaların kapasitesini ve içeriğini doğrudan etkilemektedir. Dünya genelinde birçok yapı mekaniği laboratuvarında, betonarme elemanlara genellikle bir veya iki yük verilerek deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Bu durum,

statik yükler altındaki elemanların davranışını tespit etmek için yeterli olsa da deprem gibi dinamik ve karmaşık bir etki altındaki elemanların davranışı için yeterli olmamaktadır. Fakat altyapı imkanlarının yetersizliği dolayısıyla betonarme elemanlar üzerinde salt eğilme, salt burulma, salt eksenel yük, eğilme-kesme, eksenel yük-eğilme, eksenel yük-burulma gibi bir veya iki etki uygulanarak davranış açıklanmaya çalışılmaktadır. Özellikle betonarme kolonlarda tüm yük etkilerinin (eksenel yük, eğilme, burulma, kesme) aynı anda davranışa etkisinin incelenmesi, yapı güvenliği bakımından oldukça önemlidir.

Tüm bu değerlendirmeler ışığında, eksenel yük-eğilme-burulma etkisindeki betonarme kolonların davranışını araştırmak için bu tez çalışması yapılmıştır. 10 adet tam ölçekli betonarme kolon, tersinir-tekrarlanır yükler altında deneysel olarak test edilmiştir. Yeni oluşturulan düzenek ile deney süresince eksenel yük sabite yakın olarak kolonlara uygulanmıştır (± 20 kN). Kolonlarda eksenel yük oranı (0.1, 0.2, 0.3, 0.4), eksenel dönme/yatay ötelenme oranı (θ/Δ) (1, 2) ve enine donatı aralığı (8, 16 mm) çalışmanın değişkenlerini oluşturmaktadır. Elde edilen veriler ile betonarme kolonlara ait yük-deplasman, burulma-dönme, enerji tüketim ve rijitlik grafikleri oluşturulmuş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Deney sırasında oluşan çatlaklar elemanlar üzerinde işaretlenmiş ve elemanlara verilen yüklerin oluşturduğu hasarlar değerlendirilmiştir.

1.1. Tezin Amacı

Betonarme elemanların burulma davranışı ile ilgili çalışmalar XX. yy'ın ortalarına kadar elastisite teorisine göre hesaplanırken, 1960'lı yıllardan itibaren yapılan bir dizi deneysel çalışma ile bu hesaplamanın hatalı olduğu ortaya konmuştur (Ersoy, 1975; Ersoy ve diğ., 2019; Ersoy ve Ferguson, 1968; Hsu, 1968; Kemp ve diğ., 1961). Bu sonuçlar dikkate alınarak betonarme yapı elemanlarının hesabı artık *Elastisite Teorisi*'e göre değil, betonarmenin gerçek davranışı dikkate alınarak yapılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmalarda betonarme eleman olarak çoğunlukla eksenel yük taşımayan giriş elemanlar kullanılmıştır. Birkaç çalışma dışında betonarme kolonların burulma davranışı ile ilgili literatürde pek fazla çalışma bulunmamaktadır.

Ülkemizde 1970'li yılların başından itibaren, düzensiz ve yeterli dayanıma sahip olmayan malzemelerin kullanıldığı taşıyıcı sisteme sahip betonarme binalar hızla inşa edilmeye başlanmıştır. Deprem kuşağında yer alan ülkemizde bu sorun özellikle 1999 Düzce depremi ile daha net anlaşılmıştır (Bruneau, 2002; Naeim ve Marshall, 2000). Deprem etkisindeki düzensiz taşıyıcı sisteme sahip binalarda ortaya çıkan burulma momenti, özellikle düşey taşıyıcı elemanlarda ciddi problem oluşturmaktadır. Deprem yönetmeliklerinde bu durum ile ilgili ilk

hükümler, 1998 yılında yayınlanan Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik'te (ABYYHY, 1998) verilmiştir. Bu hükümler, betonarme kolonların veya perdelerin burulmaya karşı tasarımının nasıl yapılacağı ile ilgili değildir. *AI* türü *Burulma Düzensizliği* olarak adlandırılan bir koşulun gerçekleşmesi durumunda, deprem hesabında kullanılacak yöntemin seçilmesi ile ilgilidir. Deneysel çalışmalarla burulma davranışı tam olarak ortaya konulmamış betonarme kolonların, deprem yönetmeliklerindeki burulma düzensizliği ile ilgili hükümlerde hesabının nasıl yapılacağının ifade edilmemesi şaşırtıcı değildir. Dolayısıyla yürürlükte olan TBDY-2018'de dahi bu konu yer almamaktadır.

Depremlerde yıkılan binaların yıkım mekanizması incelendiğinde, burulma düzensizliğinin etkisi göz ardı edilemeyecek seviyededir. Betonarme kolonların burulma davranışının tam olarak anlaşılması için bir dizi deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu husus hem yeni yapılacak binalardaki düzensizlik durumları için bir hesap modeli oluşturacak hem de mevcut burulma düzensizliğine sahip binalar için etkin güçlendirme yöntemleri sunacaktır. Son dönemlerde betonarme kolonlarla ilgili burulma çalışmalarında artış olsa da eksenel yük seviyesinin bir değişken olarak çalışmalarda kullanılmaması, davranışın açıklanması hususunda boşluklar oluşturmaktadır. Dolayısıyla betonarme kolonların burulma davranışının incelenmesi ve anlaşılması için bu tez çalışması yapılmıştır. Çalışmada; değişik eksenel yük, eğilme momenti ve burulma momenti etkisindeki betonarme kolonların davranışının açıklanması amaçlanmıştır.

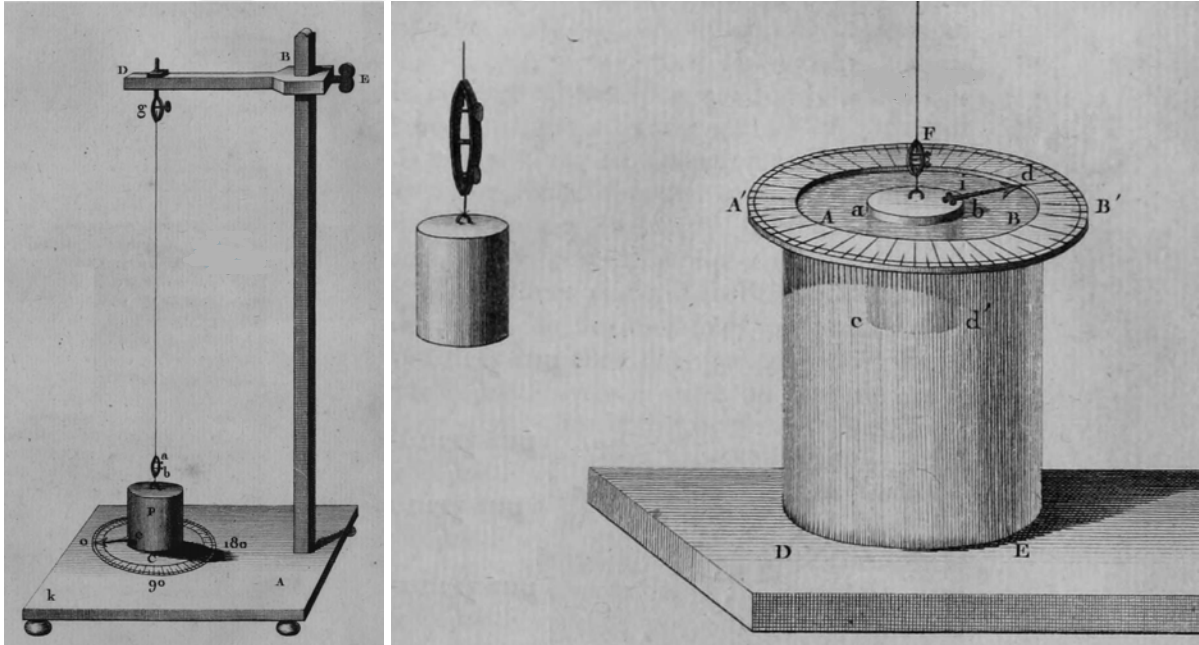
1.2. Tezin Önemi

Amaçlanan bu betonarme davranışı sayesinde iki önemli durum belirlenmiş olacaktır. Birincisi, yeni yapılacak betonarme binalarda *AI* türü *Burulma Düzensizliği*'ne sahip binaların kolonları için deprem yönetmeliğinde yeni bir hesap yönteminin kaynağı oluşturulacaktır. İkinci ise mevcut *AI* türü *Burulma Düzensizliği*'ne sahip betonarme binaların kolonları için uygun bir güçlendirme yönteminin kaynağı oluşturulacaktır. Her ne kadar betonarme kolonlarda burulma ile ilgili tasarım hesabı veya güçlendirme yapılırken kesme etkisi dikkate alınsa da iki kavram birbiri ile aynı değildir. Bu hesap ve güçlendirme yöntemlerinde çeşitli kabuller yapılmaktadır. Davranışın tam olarak bilinmemesi bu kabulleri makul kılmakta; fakat tam olarak gerçeği yansıtmamaktadır. Dolayısıyla betonarme kolonların değişik eksenel yük, eğilme momenti ve burulma momenti etkisindeki davranışının incelenmesi ile gerçeğe daha yakın davranışın bilinmesinin ve buna bağlı tasarım ve güçlendirme yöntemlerinin araştırılmasının önü açılacaktır. TBDY-2018'de betonarme kolonların plastik mafsallık uzunluğu ve plastik dönme limitleri ile ilgili hükümlerin güncellenmesi için bir kaynak oluşturacaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Burulmanın Tarihi

Sanayi devriminin başlaması ve gelişmesi ile birçok makine ve alet üretilmiştir. Bu makine ve aletlerin çeşitli fiziksel etkilere dayanıklı olması için çalışmalar da aynı oranda artmıştır. Bunlardan biri de XVIII. yy'ın sonlarına doğru ünlü Fransız fizikçi Charles Augustin de Coulomb, elastik dairesel bir telin burulma momenti ile burulma açısı arasındaki ilişkiyi açıklamasıdır (Coulomb, 1784). Coulomb bu açıklamayı, ucuna ağırlıkları farklı silindirik bir metale, farklı kalınlık ve özellikteki metal tellerin belirli bir açıya kadar döndürülmesinden sonra serbest bırakılarak geri dönme davranışlarını inceleyerek yapmıştır (Şekil 2.1). Bu deneylerde, tüm metal teller için eğer dönme açısı çok büyük değilse, burulma kuvvetinin dönme açısıyla orantılı olduğu sonucuna ulaşmış ve Denklem 2.1 ile gösterilen formülü ortaya koymuştur. Formülde T , M , a ve n sırasıyla burulma momenti, metal silindirin kütlesi, dönme açısı (radyan) ve burulma rijitliğini ifade etmektedir.



Şekil 2.1. Coulomb'un burulma deneylerinde kullandığı düzenek (Coulomb, 1784)

$$T = \sqrt{\frac{Ma^2}{2n}} \pi \quad (2.1)$$

Burulma ile ilgili yapılan bu çalışmadan yaklaşık 40 yıl sonra ünlü Fransız fizikçi Claude Louis Navier, elastik sınırlar içinde kalan cisimlerin burulması ile ilgili genel diferansiyel denklemler geliştirmiştir (Navier, 1826). Navier, söz konusu formülleri türetirken altı varsayımda bulunmuştur:

- Lineer elastik malzeme: Malzemenin Hooke kanununa uyduğu ve gerilme ile şekil değiştirme arasında doğrusal bir ilişki olduğu varsayılır.
- Küçük deformasyonlar: Malzemenin deformasyonlarının çok küçük olduğu ve geometrik doğrusallığın geçerli olduğu kabul edilir.
- Homojen ve izotropik malzeme: Malzemenin tüm noktalarında aynı özelliklere sahip olduğu ve malzemenin her yönde aynı davranış gösterdiği varsayılır.
- Çubuk boyunca sabit kesit: Çubuğun boyu boyunca kesitin şekli ve boyutunun değişmediği varsayılır.
- Pürüzsüz burulma: Çubuk boyunca herhangi bir kesitteki tüm noktalar, aynı açıyla döner. Bu durum, çarpılmanın olmadığı anlamına gelir.
- Kesitin orta düzlemi boyunca gerilmelerin olmadığı varsayımı: Bu varsayım, çubuktaki gerilmelerin büyük bir kısmının kesitin kenarlarında yoğunlaştığını varsayar.

Daha sonra Saint-Venant, dairesel cisimlerde burulma nedeniyle oluşan dönme açısının hesaplanması için bir formül türetmiştir (Denklem 2.2) (Saint-Venant, 1855). Söz konusu formülü türetirken, cismin burulmadan önce düzlem olan kesitlerinin burulmadan sonra da düzlem kaldığını varsaymıştır.

$$\theta = \frac{TL}{GJ} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2'deki θ cismin dönme açısını, T burulma momentini, L uzunluğunu, G kayma modülünü ve J kesitin polar atalet momentini ifade etmektedir.

Saint Venant, çarpılma burulmasında kesitin deneysel ve teorik olarak incelenmesi gerektiğini belirtmiş ve çarpılma altında oluşan gerilmelerin belirli bir formülasyonla hesaplanabileceğini vurgulamıştır (Saint-Venant, 1855). Bu ifadeler, yaklaşık bir asır sonra *Vlasov Teorisi* adını alacak ve dairesel olmayan elemanlarda burulma sonucunda kesitlerde çarpılma kavramının temelini oluşturacaktır (Vlasov, 1959).

1890 yılında Bach, Saint-Venant tarafından önerilen tüm burulma durumlarını sunmuş ve bunları teorik olarak yorumlamıştır. Bach çok sayıda dökme demir ve sert kurşun çubuğu burulma altında test etmiştir (Şekil 2.2). Önerilen teori ve deney arasındaki sonuçları kullanan Bach, dairesel, halka, dikdörtgen, eşkenar üçgen ve düzgün altıgen kesitlere sahip çubuklarda Saint-Venant burulması için kayma gerilmesini kontrol etmek için basit bir denklem geliştirmiştir (Denklem 2.3-2.5) (Bach, 1890; Kurrer, 2008; Valencia, 2018). Denklem 2.3 bir kesitte oluşabilecek burulma momenti miktarını vermekte ve M_d burulma momentini, φ kesite bağlı bir katsayıyı (daire ve elips için 2, dikdörtgen için 8/3), k_d kesitin atalet momentini ve b kesit daire ise yarıçapını, elips ise kısa yarıçapını, dikdörtgen ise kısa kenar uzunluğunu ifade etmektedir. Denklem 2.4 ve 2.5 ise bir kesitte oluşan burulma momenti ile o kesitte oluşan kayma gerilmesi arasındaki ilişkiyi kesit cinsine bağlı olarak göstermektedir. Denklem 2.4 dikdörtgen kesitler için, Denklem 2.5 ise dairesel kesitler için kullanılmaktadır. Denklemlerdeki τ kayma gerilmesini, r dikdörtgen için kısa kenar uzunluğunu, daire için yarıçapı, elips için kısa yarıçapı ifade etmektedir.



Şekil 2.2. Bach'ın burulma deneylerinde bazı kullandığı numuneler (Bach, 1890)

$$M_d \leq \varphi k_d \frac{\Theta}{b} \quad (2.3)$$

$$M_d = \tau \frac{\Theta_1 + \Theta_2}{r} \quad (2.4)$$

$$M_d = \tau \frac{\pi}{2} r^3 \quad (2.5)$$

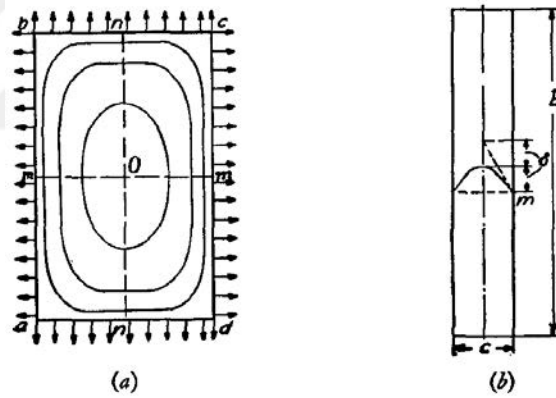
Yapısal elemanların burulma dayanımı, ilk olarak 1905 yılında Timoshenko tarafından araştırılmıştır (Denklem 2.6-2.7) (Timoshenko, 1905, 1948a, 1948b). Denklem 2.6'daki τ_{max} kesitte oluşan en büyük kayma gerilmesini, M_t burulma momentini ve d dairesel kesitin çapını

ifade etmektedir. Denklem 2.7’de ise α kesitin uzun kenarının kısa kenarına oranına bağlı bir katsayıyı, b kesitin uzun kenarını ve c kesitin kısa kenarını ifade etmektedir.

$$\tau_{max} = \frac{16M_t}{\pi d^3} \quad (\text{Dairesel kesitlerde oluşan en büyük kayma gerilmesi}) \quad (2.6)$$

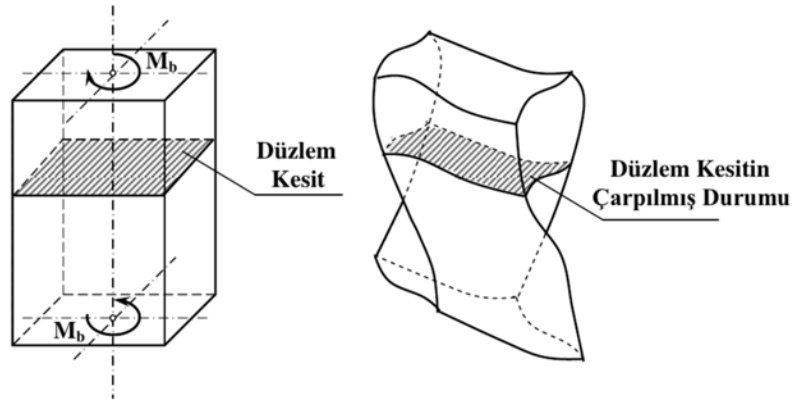
$$\tau_{max} = \frac{M_t}{\alpha b c^2} \quad (\text{Dikdörtgen kesitlerde oluşan en büyük kayma gerilmesi}) \quad (2.7)$$

Timoshenko bu araştırmalar sonucunda aynı çevre boyunca farklı kayma gerilmeleri oluşturduğunu açıklamıştır. Şekil 2.3’te Timoshenko tarafından hazırlanan, dikdörtgen kesitli cisimlerde burulma nedeniyle oluşan kayma gerilmesi dağılımı gösterilmiştir. Şekil 2.3 (a) incelendiğinde, en büyük kayma gerilmesinin m-m noktalarında olduğu, kesitin köşe noktalarında ise kayma gerilmelerinin oluşmadığı görülmektedir. Hemen ifade etmek gerekir ki bu durum, *Elastisite Teorisi*’ne göre yapılan hesapların bir sonucudur.



Şekil 2.3. Dikdörtgen kesitli elemanlarda oluşan kayma gerilmesi dağılımı (Timoshenko, 1948b)

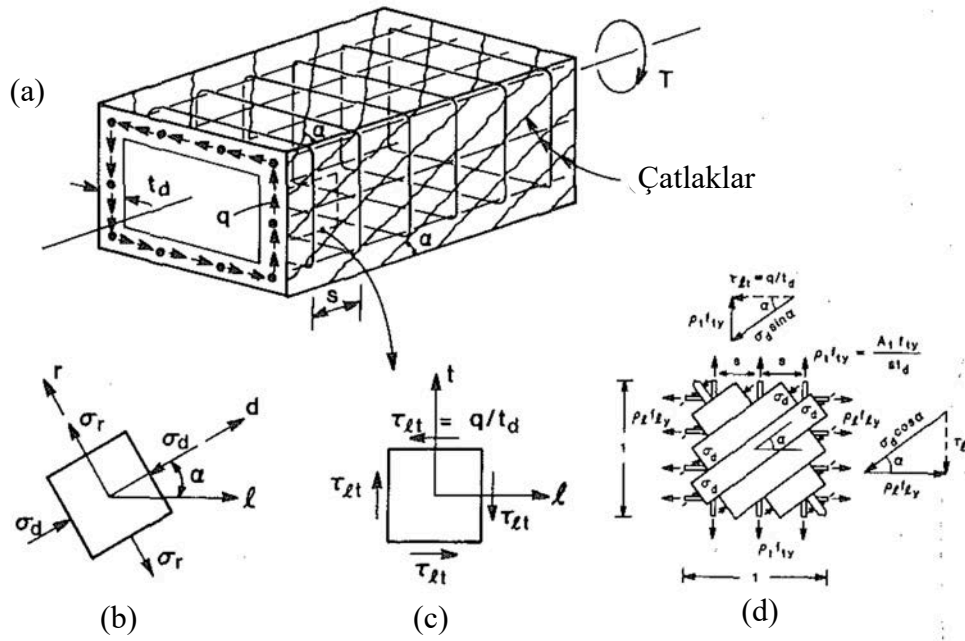
Sonuç olarak düzlemsel kesitler, belirli bir çevre üzerindeki noktalarda değişen gerilme nedeniyle düzlemsel kalmamaktadır (Şekil 2.4). Dolayısıyla bu durum, 1826 yılında Navier tarafından dikkate alınan varsayımlara aykırı olmaktadır.



Şekil 2.4. Dikdörtgen kesitli elemanların burulmasında çarpılma oluşumu

Burulma ile ilgili yapılan ilk çalışmalarda cisimler elastik olarak kabul edilmekte ve hesaplar buna göre yapılmaktaydı. Betonarmenin elastik bir malzeme olmamasından dolayı bu hesapların yanlış sonuçlar verdiği, betonarmenin gerçek davranışının anlaşılması için deneysel çalışmaların yapılmasının zorunlu olduğu kısa bir süre sonra anlaşılmıştır. Rausch, betonarmede burulmayı inceleyen ilk araştırmacılardandır. 1929'da Rausch, burulmaya yönelik uzay kafes benzetmesini sunduğu tezini yayınlamıştır. Rausch, *Uzay Kafes Kiriş* modeline dayalı olarak betonarme elemanların burulmaya karşı direncini tahmin etmek için bir denklem sunmuştur (Denklem 2.8). Bu yöntem, mevcut burulma tasarım hükümlerinin temelini oluşturmaktadır (Hsu ve Mo, 1985; Rausch, 1929). Denklem 2.8'deki A_{ot} etriye kesit alanını, s etriye aralığını, T uygulanan burulma momentini, σ_{sw} etriyedeki gerilmeyi (taşıma gücünde $\sigma_{sw}=f_{ywd}$) ve A_e burulma için çekirdek alanını ifade etmektedir. Şekil 2.5'te Rausch tarafından önerilen *Uzay Kafes Kiriş* modeli verilmiştir. Bu modelde donatı çekme elemanlarını, asal basınç yönündeki beton ise beton elemanlarını oluşturmaktadır. Burada basınç çubuklarının eğimi 45° olacak şekilde bir varsayım yapılmıştır.

$$\frac{A_{ot}}{s} = \frac{T}{2A_e\sigma_{sw}} \quad (2.8)$$

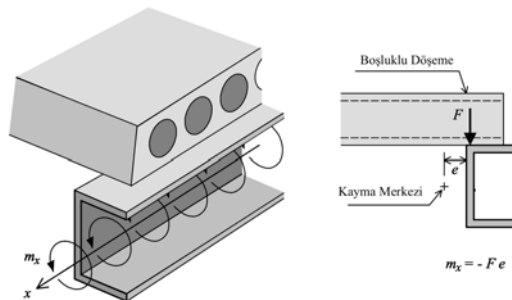


Şekil 2.5. Betonarme elemanlarda burulma sonucu oluşan gerilmeler, a) genel görüntü, b) d-r koordinatındaki kesme bölgesi, c) l-t koordinatındaki kesme bölgesi, d) kesme bölgesindeki kafes modeli (Hsu, 1990)

XX. yy.'ın ikinci yarısının başlarında daha fazla araştırmacı betonarmede burulmayı incelemeye başlamıştır. 1940 yılında, V.Z. Vlasov, kısıtlanmış eğilmenin dahil olduğu bir burulma teorisi geliştirdi (Vlasov, 1959). Bu teoriye ayrıca *Çarpılma Burulması (Warping Torsion)* denir. Vlasov'un teorisinde burulma, cismin eksenı boyunca sabit değildir (Şekil 2.6). Kiriş kesitinin dönmesi ile ilgili türettiği formül Denklem 2.9-10'da gösterilmiştir. Denklemlerde m_x eksen boyunca kirişte oluşan burulma momentini GI_t burulma rijitliğini, EC_w çarpılma rijitliğini, C_w çarpılma katsayısını ve ψ çarpılma fonksiyonunu ifade etmektedir.

$$m_x = EC_w \frac{d^4 \varphi}{dx^4} - GI_t \frac{d^2 \varphi}{dx^2} \quad (2.9)$$

$$C_w = \int_0^A \Psi^2 dA \quad (2.10)$$

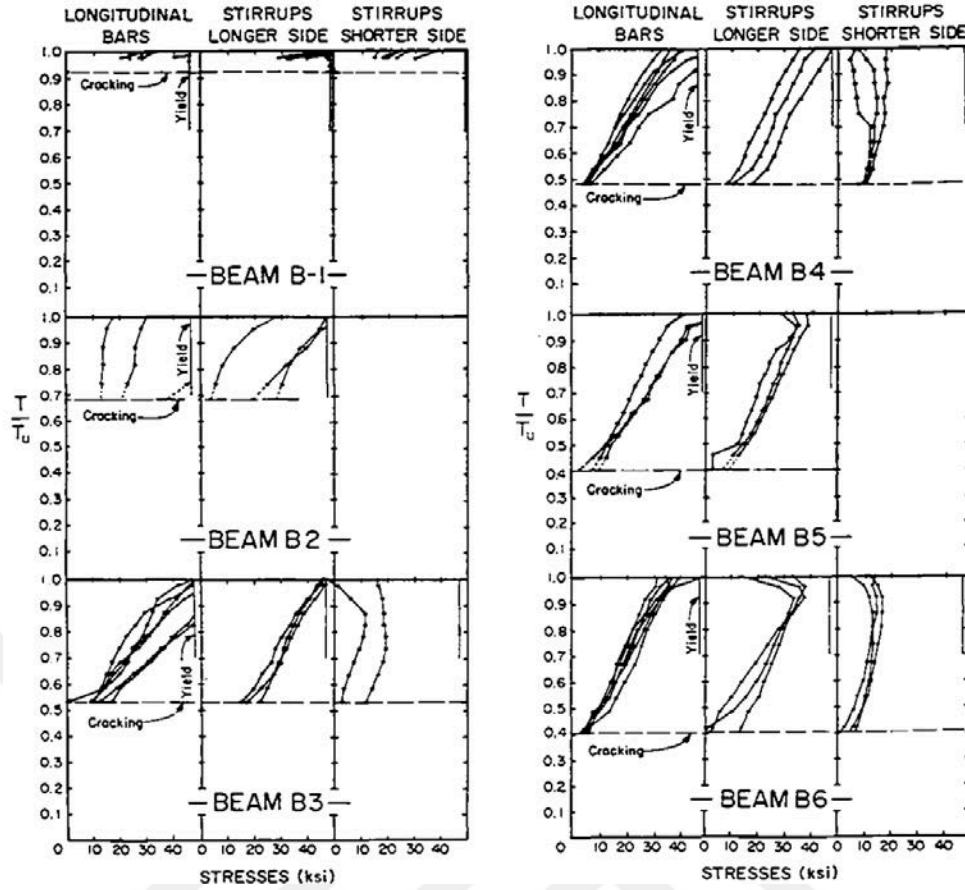


Şekil 2.6. İnce cidarlı açık kesitlerde oluşan burulmaya bir örnek (Hoogenboom, 2006)

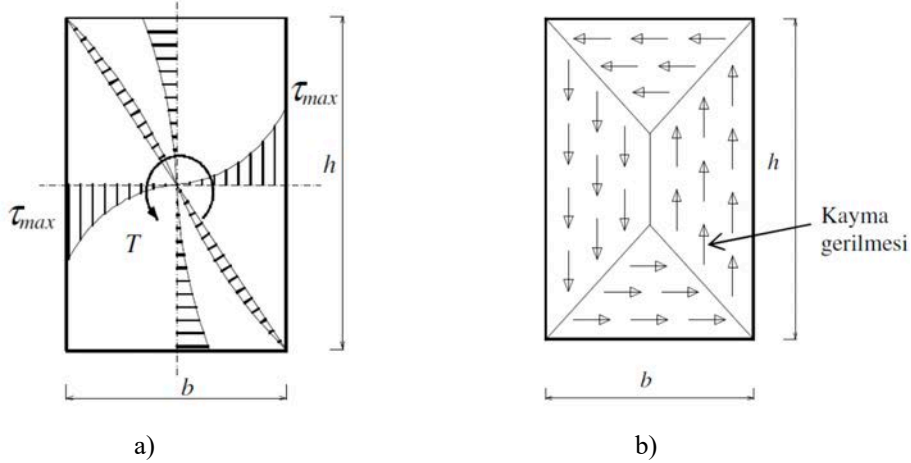
1959'da Lessig, burulma hasar mekanizması için eğik eğilme teorisini önermek için denge denklemlerini kullanmıştır. Bu teori, burulma altındaki bir kirişin eğik bir hasar yüzeyine sahip olacağını varsaymaktadır. Lessig iki hasar modu önermiştir. Birinci modda kirişin üst yüzüne yakın bölgesinde basınç oluşurken, ikinci modda yan yüz boyunca bir basınç bölgesi oluşmaktadır (Elfgren, 1971; Lessig, 1959). 1962'de Yudin, Lessig'in önerdiği eğik eğilme teorisinin üç bilinmeyi belireyemediğini fark etmiştir: boyuna donatı alanı, enine donatı ve basınç bölgesinin derinliği. Bunu çözmek için Yudin üç denge denklemi önermiştir: basınç bölgesinin merkezinden geçen ve kirişin uzunlamasına eksenine paralel bir eksen etrafındaki momentlerin dengesi, basınç bölgesinin merkezinden geçen ve uzunlamasına eksenine dik bir eksen etrafındaki momentlerin dengesi ve basınç bölgesine dik doğrultudaki kuvvetlerin dengesi (Elfgren, 1971; Yudin, 1962). Lessig ise analizinde yalnızca iki denklem kullanmıştır: elemanın eksen etrafındaki momentlerin dengesi ve basınç bölgesine dik doğrultudaki kuvvetlerin dengesi (Elfgren, 1971).

1958'de Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), Gordon P. Fisher başkanlığında burulma üzerine bir komite yetkilendirmiştir. 1966'da Komite Philadelphia'da bir sempozyum düzenlemiş ve orada sunulan makaleler, birkaç diğer ilgili makaleyle birlikte 1968'de özel bir sempozyum cildinde yayınlanmıştır (ACI SP-18, 1968). Bu, altmışlı yılların ortalarındaki çalışmaların iyi bir incelemesini sunmaktadır (Elfgren, 1971). Söz konusu sempozyumda Hsu tarafından betonarme elemanlar üzerinde yapılan burulma deneyleri büyük ilgi görmüştür (Ersoy ve diğ., 2019). Deney sonuçları, burulmaya maruz betonarme elemanlarda daha önce *Elastisite Teorisi*'ne göre hesaplanan kesme gerilmelerle uyuşmadığını göstermiştir (Hsu, 1968). Şekil 2.7'de Hsu tarafından yapılan deneylerde kullanılan betonarme kirişlere ait grafikler verilmiştir. Bu grafiklerde düşey eksen kirişlerde oluşan T/T_u değerlerini gösterirken, yatay eksen donatılarda oluşan gerilmeleri göstermektedir. Burada T kirişe uygulanan burulma momentini, T_u ise kirişin burulma dayanımını ifade etmektedir.

Şekil 2.7 incelendiğinde, burulmadan dolayı kesitte oluşan gerilmeler, *Elastisite Teorisi*'nden elde edilen gerilme dağılımına uymadığı, uzun ve kısa kenarlar boyunca sabit kaldığı görülmektedir (Şekil 2.8). Bu sebeple burulma etkisindeki betonarme elemanlarda oluşan kesme gerilmeleri için elastisite teorisi yerine plastisite teorisinden elde edilen değerlerin daha doğru sonuçlar verdiği anlaşılmıştır.



Şekil 2.7. Hsu tarafından yapılan deneylerdeki kirişlerin donatılarında oluşan gerilmeler (Hsu, 1968)



Şekil 2.8. Dikdörtgen kesitli betonarme elemanlarda burulma nedeni ile oluşan kesme gerilmeleri; a) Elastisite teorisine göre, b) plastisite teorisine göre (Ersoy ve diğ., 2019)

Betonarme elemanlarda burulma tek başına meydana gelmemekte, burulma ile birlikte kesme, eğilme gibi diğer etkiler de oluşmaktadır. Dolayısıyla salt burulma etkisindeki betonarme elemanların davranışı, yapı sisteminde yer alan elemanların davranışından oldukça farklı olacağı açıktır. Bu konu ile ilgili yapılan ilk ve en önemli çalışmalardan birini, Chalmers Teknoloji Üniversitesi'nde 1971 yılında doktora tezini sunan Elfgren yapmıştır. Elfgren, birleşik kesme,

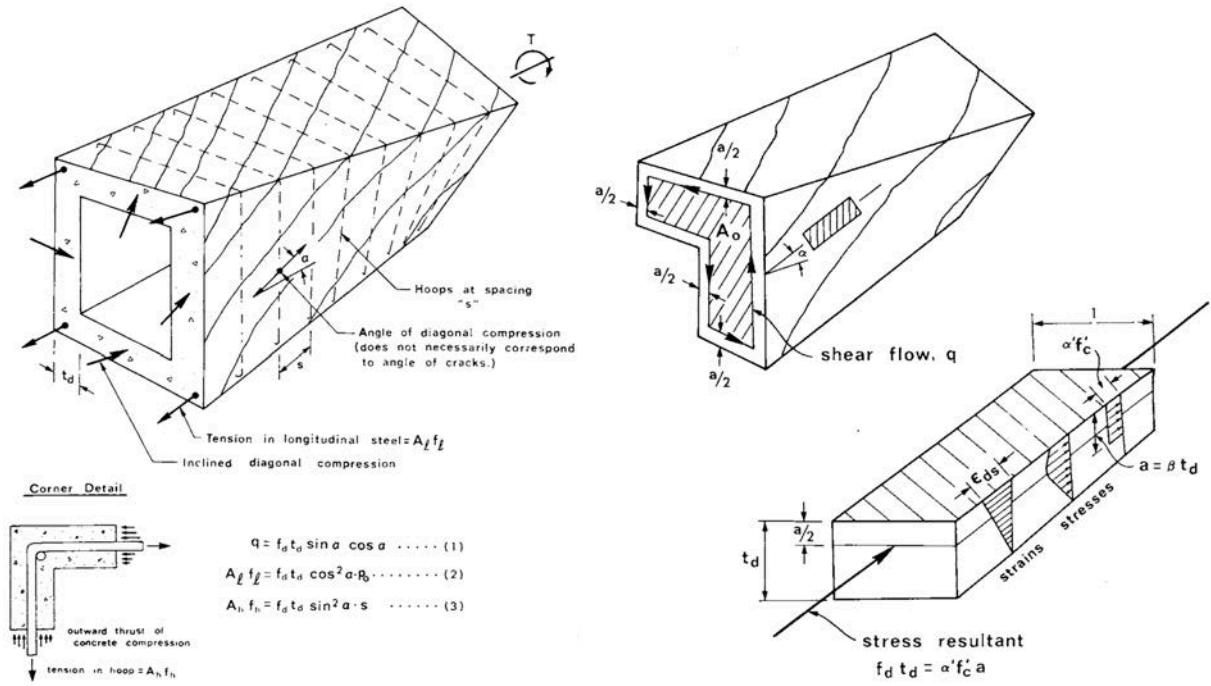
eğilme ve burulma altındaki elemanların kapasitesini belirlemek için bir yöntem geliştirmiştir (Denklem 2.11-2.13) (Elfgren, 1971). Betonarme kirişlerin kapasitesini tahmin etmek için kafes kiriş analojisi kullanarak bir etkileşim yüzeyi çizmek için kullanılabilecek bir etkileşim denklemi oluşturmuştur. Bu model burulma momenti, kesme kuvveti ve eğilme momentine maruz kalan betonarme kirişlerin dayanımını doğru bir şekilde tahmin etmektedir. Denklem 2.11-2.13'teki M eğilme momentini, M_o^t salt eğilme dayanımını, T burulma momentini, T_o^t salt burulma dayanımını, V kesme kuvvetini V_o^t salt kesme dayanımını, r basınç donatısının dayanımının çekme donatısının dayanımına oranını, b' kısa kenar doğrultusundaki boyuna donatılar arasındaki mesafeyi, h' ise uzun kenar doğrultusundaki boyuna donatılar arasındaki mesafeyi ifade etmektedir.

$$\frac{M}{M_o^t} + \left(\frac{T}{T_o^t}\right)^2 r + \left(\frac{V}{V_o^t}\right)^2 r = 1 \quad (\text{Burulmanın ve eğilmenin olduğu durum}) \quad (2.11)$$

$$\frac{M}{M_o^t} \left(\frac{-1}{r}\right) + \left(\frac{T}{T_o^t}\right)^2 + \left(\frac{V}{V_o^t}\right)^2 = 1 \quad (\text{Burulmanın ve küçük bir eğilmenin olduğu durum}) \quad (2.12)$$

$$\left(\frac{T}{T_o^t}\right)^2 \frac{2r}{r+1} + \left(\frac{V}{V_o^t}\right)^2 \frac{2r}{r+1} + \frac{TV}{T_o V_o} \frac{2r}{r+1} \frac{2}{\sqrt{1+b'/h'}} = 1 \quad (\text{Büyük burulma ve kesmenin olduğu durum}) \quad (2.13)$$

Mitchell ve Collins 1974 yılında betonarmede burulmayı incelemek için başka bir yaklaşım getirmiştir. Salt burulma altındaki kirişler için *Basınç Alanları Teorisi*'ni (*Compression Field Theory (CFT)*) sunmuşlardır. Teorik modellerini önermek için denge denklemlerini, deformasyonların geometrisini ve beton ile çeliğin gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini dikkate almışlardır (Mitchell ve Collins, 1974). Yaklaşımlarının temeli bir kafes kiriş modelidir. Bu modelde, çatlak oluşuktan sonra betonun gerilme taşımayacağı, bu nedenle burulmanın betondaki diyagonal basınç alanı tarafından taşınacağı varsayılmıştır (Şekil 2.9). Betonarme elemanda oluşan kesme akışını Denklem 2.14 ile, burulma momenti ile kesme akışı arasındaki ilişkiyi ise Denklem 2.15 ile açıklamışlardır.



Şekil 2.9. Burulma nedeniyle cisimde meydana gelen basınç alanı (Mitchell ve Collins, 1974)

$$q = \sqrt{\left(\frac{A_L f_L}{p_o}\right) \left(\frac{A_h f_h}{s}\right)} \quad (2.14)$$

$$T = 2A_o q \quad (2.15)$$

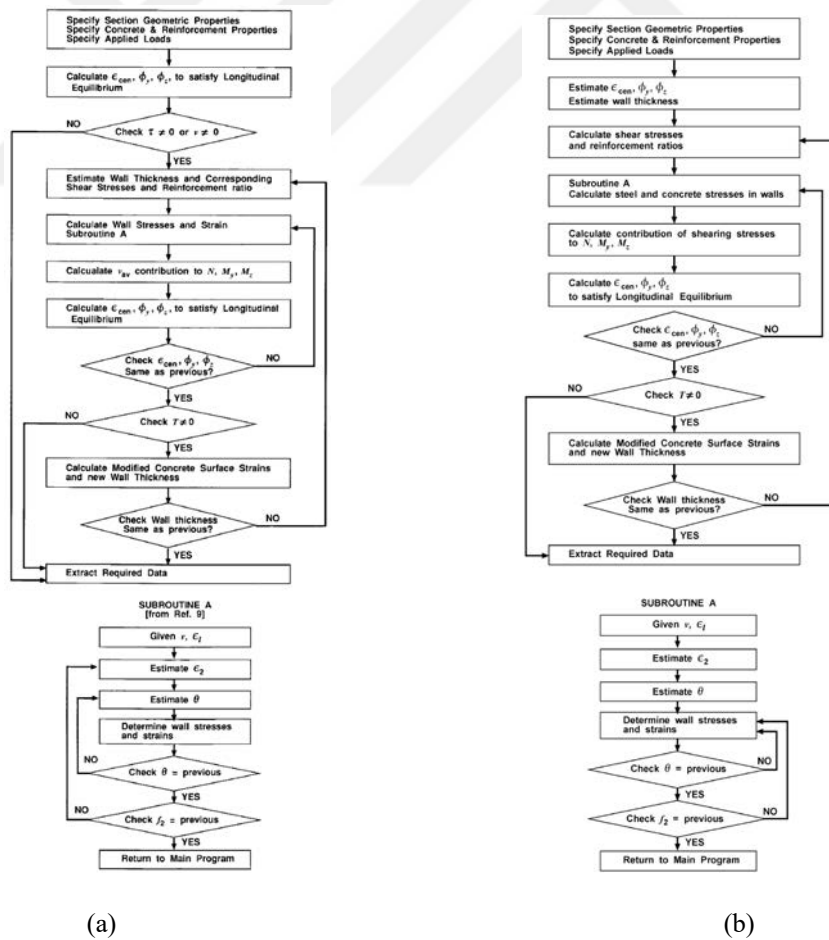
Denklem 2.14 ve 2.15'teki q kesme akışını, A_L boyuna donatı alanını, f_L boyuna donatıdaki gerilmeyi, A_h enine donatı alanını, f_h enine donatıdaki gerilmeyi, p_o kesme akışı çevresinin uzunluğunu, s enine donatı aralığını ve A_o kesme akışının alanını ifade etmektedir.

1985 yılında Hsu ve Mo, *CFT*'nin bir varyasyonunu geliştirmişler ve betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisini yumuşatarak yeni modele *Yumuşatılmış Kafes Modeli (Softened Truss Model (STM))* adını vermişlerdir (Hsu ve Mo, 1985). *STM*'de, uygunluk denklemleri ile yumuşatılmış gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, kesme ve burulmaya maruz kalan betonarme elemanların deney sonuçlarını tahmin etmede iyi sonuçlar gösteren bir teori geliştirmek için birleştirilmiştir (Hsu, 2017). *STM* önerisi yapılırken, literatürde bulunan 108 adet numunenin deney sonuçları incelenmiştir. Bu deney sonuçları üzerinde yapılan çalışma sonucu Denklem 2.16 ile gösterilen formül türetilmiştir. Formülde T_{cr} çatlama burulma momentini, A_c kesit alanını, p_c kesitin çevre uzunluğunu ve f'_c betonun silindir dayanımını ifade etmektedir.

$$T_{cr} = 2A_c \frac{1.2A_c}{p_c} (2.5\sqrt{f'_c}) \quad (2.16)$$

Denklem 2.16’da görüleceği üzere, betonarme elemanların burulma altındaki çatlama dayanımlarının hesabında donatı dikkate alınmamaktadır. Bu durum, betonarme elemanlarda çatlama oluşana kadar donatılarda herhangi bir gerilme meydana gelmediğini, yükün tamamen beton tarafından taşındığını ortaya koymaktadır. Çizelge 2.1’de, burulma ile ilgili yapılan önemli çalışmalar, kronolojik sıra ile gösterilmiştir.

1995 yılında Rahal ve Collins, birleşik burulma-kesme etkisine maruz kalan betonarme elemanların kapasitesini hesaplamak için formüller sunmuşlardır (Şekil 2.10a) (Rahal ve Collins, 1995). Aynı araştırmacılar yaklaşık 8 yıl sonra birleşik burulma-eğilme etkisine maruz kalan betonarme elemanların kapasitesi için formüller oluşturmuşlardır (Şekil 2.10b) (Rahal ve Collins, 2003).



Şekil 2.10. Rahal ve Collins’in önerdikleri betonarme elemanların burulma dayanım algoritması,
a) Kesme-Burulma (Rahal ve Collins, 1995), b) Eğilme-Burulma (Rahal ve Collins, 2003)

Çizelge 2.1. Burulma ile ilgili yapılan önemli çalışmalar

Araştırmacı	Yaptığı çalışma	Önerdiği Denklem	Yıl
Charles-Augustin de Coulomb	 Elastik dairesel bir telin burulma momenti ile burulma açısı arasındaki ilişkiyi açıklamıştır.	$T = \sqrt{\frac{Ma^2}{2n}} \pi$	1784
Claude Louis Navier	 Elastik sınırlar içinde kalan cisimlerin burulması ile ilgili genel diferansiyel denklemler geliştirmiştir.	$(\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu \nabla^2 u + F_x = 0$	1826
Saint-Venant	 Dairesel cisimlerde burulma nedeniyle oluşan dönme açısının hesaplanması için bir formül türetmiştir.	$\theta = \frac{TL}{GJ}$	1855
Carl von Bach	 Farklı kesitlerdeki elemanların dönmesi ile kayma gerilmesi arasındaki ilişkiyi kurmuştur.	$M_d = \tau \frac{\theta_1 + \theta_2}{r}$	1890
Timoshenko	 Yapı elemanlarındaki burulma momenti ile kayma gerilmesi arasındaki ilişkiyi araştırmıştır.	$\tau_{max} = \frac{M_t}{\alpha bc^2}$	1905
Ernst Rausch	 Betonarme elemanların burulmaya karşı dayanımını tahmin etmek için bir denklem sunmuştur.	$\frac{A_{ot}}{s} = \frac{T}{2A_e \sigma_{sw}}$	1929
V. Z. Vlasov	 Burulma etkisindeki betonarme elemanlarda <i>Çarpılma Burulması</i> kavramını bulmuştur.	$m_x = EC_w \frac{d^4 \varphi}{dx^4} - GI_t \frac{d^2 \varphi}{dx^2}$	1940
Uğur Ersoy	 Betonarme kirişlerde eğilme ve burulma etkilerinin ilişkisini açıklamıştır.	$\left(\frac{T}{T_0} \right)^2 + \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 = 1$	1968
Denis Mitchell	 Betonarmede <i>Basınç Alanları Teorisi</i> 'ni (<i>Compression Field Theory (CFT)</i>) sunmuştur.	$T = 2A_o q$	1974
Thomas T. Hsu	 <i>CFT</i> 'nin bir varyasyonunu olarak <i>Yumuşatılmış Kafes Modeli</i> 'ni (<i>Softened Truss Model (STM)</i>) sunmuştur.	$T_{cr} = 2A_c \frac{1.2A_c}{p_c} \left(2.5\sqrt{f'_c} \right)$	1985

XX. yy.'ın ikinci yarısından itibaren betonarmede burulma konusuna olan ilgili günümüze kadar halen devam etmektedir. 2013 yılında Amerikan Beton Enstitüsü (*American Concrete Institute (ACI)*) tarafından Dr. Kuchma başkanlığında bir komite kurularak “Yapısal Betonda Burulma Raporu” (*Report on Torsion in Structural Concrete*) isminde bir rapor yayınlanmıştır (ACI-445, 2013). Bu raporda, raporun hazırlandığı tarihe kadar betonarme elemanlar üzerinde yapılan burulma ile ilgili yayınların bir derlemesi sunulmuştur. Hem deneysel hem de analitik çalışmaların birlikte verildiği bu rapor, betonarme elemanların çeşitli yükler, mesnet şartları ve malzeme özellikleri altındaki burulma davranışı ile ilgili önemli bir kaynak oluşturmaktadır.

2.2. Betonarme Kolonların Burulma Davranışı ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Betonarme elemanların burulma davranışı ile ilgili çalışmaların büyük bölümü kirişler üzerinedir. Eksenel yük taşımayan betonarme kirişlerin davranışını anlamak, kolonlarınkine göre nispeten daha kolaydır. Literatürde betonarme kolonların burulma davranışı ile ilgili yapılan ilk çalışmalar 1960'lı yıllara dayanmaktadır. Özellikle Amerikan İnşaat Mühendisleri Derneği (*American Society of Civil Engineers (ASCE)*) öncülüğünde 1950'li yıllardan itibaren burulma konusuna olan ilgi artmış ve birçok deneysel ve teorik çalışma yapılmıştır.

Betonarme kolonların burulması ile ilgili literatürdeki ilk kaynaklardan biri Bishara ve Pair'e aittir (Bishara ve Peir, 1968). Yazarlar yaptıkları çalışmada 25 adet dikdörtgen kesitli betonarme kolona farklı oranlarda eksenel yük ve burulma momenti uygulayarak deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda betonarme kolonların salt burulma altındaki dayanımını Denklem 2.17 ile ifade etmişlerdir (Irani ve Daniali, 1993). Denklem 2.17'de T burulma momentini, f_c kolona uygulanan eksenel basıncı, f'_c beton silindir basınç dayanımını, x kolonun kısa kenar uzunluğunu, y kolonun uzun kenar uzunluğunu, x_1 kısa kenar doğrultusundaki etriye kolları arasındaki mesafeyi, x_2 köşedeki boyuna donatıların kısa kenar doğrultusundaki merkezden merkeze olan mesafesini, y_1 uzun kenar doğrultusundaki etriye kolları arasındaki mesafeyi, y_2 köşedeki boyuna donatıların uzun kenar doğrultusundaki merkezden merkeze olan mesafesini, m boyuna donatı hacminin enine donatı hacmine oranını, f_{ly} boyuna donatının akma dayanımını, f_{sy} enine donatının akma dayanımını, A_s kolon çekirdek alanını, s enine donatı aralığını ifade etmektedir.

$$T = \{0.0656f'_c x^2 (y - x/3) / (\sqrt{f'_c} + 1.313) + 0.66m(f_{ly}/f_{sy})(x_2 y_2 / x_1 y_1) + 0.33x_1 y_1 A_s f_{sy} / s\} (\sqrt{1 + 12f_c / f'_c}) \quad (2.17)$$

Aynı dönemde Hsu ve Kemp (1969) tarafından, betonarme kiriş ve kolonların burulma kapasiteleri ile ilgili formüller türetilmiştir. Bu formüller türetilirken herhangi bir deneysel çalışma yapılmamış, mevcut bilgilerden faydalanılmıştır. Kolonların burulma kapasitesi ile ilgili önerilen formül Denklem 2.18'de verilmiştir. Denklemden T_u kolonun burulma momentini kapasitesini, σ kolona uygulanan eksenel basıncı, f'_c beton silindirik basınç dayanımını, x kolonun kısa kenar uzunluğunu, y kolonun uzun kenar uzunluğunu, x_l kısa kenar doğrultusundaki etriye kolları arasındaki mesafeyi, y_l uzun kenar doğrultusundaki etriye kolları arasındaki mesafeyi, f_y enine donatının akma dayanımını, A_t kolon çekirdek alanını, s enine donatı aralığını ifade etmektedir.

$$T_u = \frac{x^2 y}{3} 2.4 \sqrt{f'_c} \left(2.5 \sqrt{1 + 10 \frac{\sigma}{f'_c}} - 1.5 \right) + \left(0.66 + 0.33 \frac{y_l}{x_l} \right) \frac{x_1 y_1 A_s f_y}{s} \quad (2.18)$$

Pandit ve Mawal (1973) 4 adet salt beton, 6 adet betonarme ile üretilmiş kolonlar üzerinde burulma deneyleri yapmışlardır. Türettikleri burulma formülünü yaptıkları deneylerin sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Literatürdeki başka burulma formülleri ile Denklem 2.19'da gösterilen kendi türettikleri formülü, yapılan deney sonuçları ile kıyaslamışlardır. Denklemden T_u kolonun burulma momentini kapasitesini, f_c kolona uygulanan eksenel basıncı, f'_c beton silindirik basınç dayanımını, x kolonun kısa kenar uzunluğunu, y kolonun uzun kenar uzunluğunu, x_l kısa kenar doğrultusundaki etriye kolları arasındaki mesafeyi, y_l uzun kenar doğrultusundaki etriye kolları arasındaki mesafeyi, f_y enine donatının akma dayanımını, A_s kolon çekirdek alanını, s enine donatı aralığını ifade etmektedir. R_1 ve R_2 bir kat sayı olup, Denklem 2.20 ve 2.21'de verilmiştir. P'_l simetrik kesit için boyuna donatılardan altta veya üstte olandan hangisi küçükse onun donatı oranını, P_s enine donatı oranını f_{ly} boyuna donatının akma dayanımını, f_{sy} enine donatının akma dayanımını ifade etmektedir.

$$T_u = \frac{x^2 y}{3} \frac{f'_c}{10} \left(\sqrt{1 + 10 \frac{f_c}{f'_c}} \right) R_1 R_2 \frac{x_1 y_1 A_s f_{sy}}{s} \quad (2.19)$$

$$R_1 = 1 - \frac{s}{y} \quad (2.20)$$

$$R_2 = \frac{2P'_l f_{ly}}{P_s f_{sy}} \quad (2.21)$$

Irani ve Daniali (1993) yaptıkları çalışmada 35 adet dikdörtgen kesitli betonarme kolon üzerinde burulma deneyi gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarını Denklem 2.17, 2.18 ve 2.19 ile karşılaştırarak yeni bir formül türetmişlerdir (Denklem 2.20). Denklemde I_1 , I_2 ve I_3 bir katsayı olup, sırasıyla Denklem 2.23, 2.24 ve 2.25'te gösterilmiştir.

$$T_u = I_1 x^2 y \frac{f'_c}{10} \left(\sqrt{1 + 10 \frac{f_{ci}}{f'_c}} \right) + I_2 I_3 \frac{x_1 y_1 A_s f_{sy}}{s} \quad (2.22)$$

$$I_1 = 1 - \frac{s}{y} \quad (2.23)$$

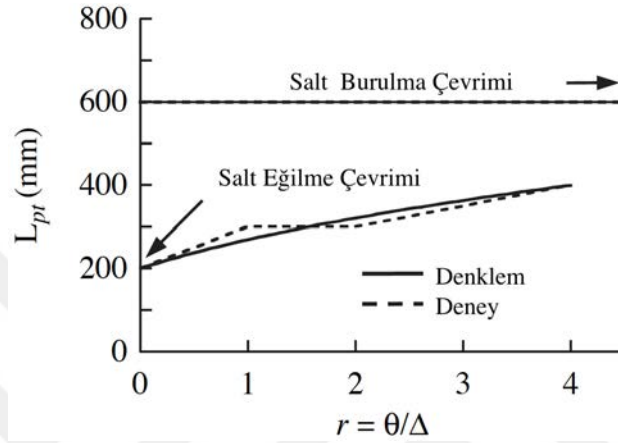
$$I_2 = 1 - \frac{s}{y} \quad (2.24)$$

$$I_3 = \frac{2P'_l f_{ly}}{P_s f_{sy}} \quad (2.25)$$

Otsuka ve diğ. (2004) 9 adet kare kolon üzerinde eksenel yük, eğilme ve burulma etkilerini kullanarak tersinir-tekrarlanır olacak şekilde deneysel çalışma yapmışlardır. Kolonlar üzerindeki eksenel yük oranı 0.10 seviyesindedir. Çalışmanın değişkeni olarak eğilme momentinin burulma momentine oranı ile 2 farklı enine donatı aralığı seçilmiştir. Deneysel çalışma sonucu olarak enine donatı aralığı arttıkça kırılmanın daha çok burulma modunda gerçekleştiği, enine donatıdaki çekme gerilmesinin eğilme momentinden etkilenmemesine rağmen burulma momentinden çok fazla etkilendiği, enine donatı aralığı az olan numunelerin daha çok enerji tükettiği ve daha sünek olduğu gözlemlenmiştir.

Tirasit ve Kawashima (2007) yaptıkları çalışmada 7 adet 40x40 cm kesitli betonarme kolonu çevrimsel olarak salt eğilme, salt burulma ve eğilme ile burulmanın birlikte etkidiği durumda deneye tabi tutarak, kolonların davranışını incelemişlerdir. Kolonların 6 tanesinde sabit eksenel yük varken salt burulma etkisinin olduğu 1 tanesinde ise yoktur (Yani bu eleman kiriş davranışı göstermiştir). Buradaki amaç, eksenel yükün betonarme elemanlardaki burulma davranışını nasıl etkilediğinin anlaşılmasını sağlamaktır. Diğer değişken ise eksenel dönme/yatay ötelenme oranıdır ($r=\theta/\Delta$). Bu oranlar ise 0.5-1-2-4 şeklindedir. Araştırmacılar çalışmanın sonuçlarına göre eksenel yükün, burulma dayanımını artırdığını gözlemlemişlerdir. r oranı arttıkça (yani eksenel dönme miktarı arttıkça) eğilme dayanımının ve yatay ötelenme

oranının azaldığını tespit etmişlerdir. Eğilme ve burulma birlikte etki ettiği durumda, kolondaki enine donatının daha fazla uzadığını gözlemlemişler, r oranı arttıkça plastik mafsalsal boyunun arttığını fark etmişler ve plastik mafsalsal boyunun hesaplanması için bir formül sunmuşlardır (Şekil 2.11) (Denklemler 2.26). Denklemlerde L_{pt} kolonlarda oluşan plastik mafsalsal boyunu, D kolonun kesit uzunluğunu ve r eksenel dönme/yatay ötelenme oranını ifade etmektedir. Plastik mafsalsal boyu salt eğilme etkisinde $0.5D$ değerini alırken, salt burulma etkisinde $1.5D$ değerini almaktadır.



Şekil 2.11. Tirasit ve Kawashima'nın önerdikleri kolonlardaki plastik mafsalsal boyu (Tirasit ve Kawashima, 2007)

$$L_{pt} = 0.5D(r + 1)^{0.43} \leq 1.5D \quad (2.26)$$

Deney düzeneğinde kolonlarda eğilme ve burulma etkisi meydana getiren kuvvetleri kullanarak, kolonların bu birleşik etki altındaki eğilme ve burulma rijitliklerinin, eğilme ve burulma dayanımlarının hesaplanabileceği ampirik denklemler geliştirmişlerdir (Şekil 2.12) (Denklemler 2.27-40).

$$\tilde{k}_{F1} = \frac{\tilde{F}_c}{\tilde{\Delta}_y L_{eff}} \quad (2.27)$$

$$\tilde{k}_{F2} = \frac{\tilde{F}_u - \tilde{F}_c}{(\tilde{\Delta}_u - \tilde{\Delta}_d) L_{eff}} \quad (2.28)$$

$$\tilde{k}_{T1} = \frac{\tilde{T}_c}{\tilde{\theta}_y} \quad (2.29)$$

$$\tilde{k}_{T2} = \frac{\tilde{T}_u - \tilde{T}_c}{(\tilde{\theta}_u - \tilde{\theta}_d)} \quad (2.30)$$

$$\tilde{F}_c = (e^{-0.088r}) F_c \quad (2.31)$$

$$\tilde{F}_u = 0.8\tilde{F}_c \quad (2.32)$$

$$\tilde{\Delta}_y = (1 - 0.035r)\Delta_y \quad (2.33)$$

$$\tilde{\Delta}_d = (5.03e^{-0.18r})\Delta_y \quad (2.34)$$

$$\tilde{\Delta}_u = (6.37e^{-0.18r})\Delta_y \quad (2.35)$$

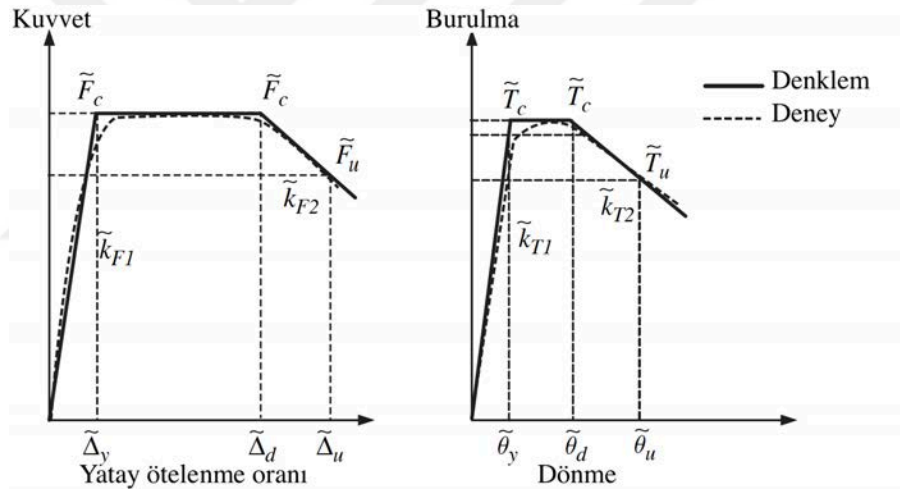
$$\tilde{T}_c = (e^{-0.42/r})T_c \quad (2.36)$$

$$\tilde{T}_u = 0.8\tilde{T}_c \quad (2.37)$$

$$\tilde{\theta}_y = (e^{-0.37/r})\theta_y \quad (2.38)$$

$$\tilde{\theta}_d = 6.29(1 - e^{-r/1.79})\theta_y \quad (2.39)$$

$$\tilde{\theta}_u = (12e^{-0.8/r})\theta_y \quad (2.40)$$



Şekil 2.12. Tirasit ve Kawashima (2007) tarafından önerilen eğilme ve burulmaya ait eğriler

Nie ve diğ. (2012) 8 adet beton ile doldurulmuş çelik tüp şeklindeki kolonun (*Concrete Filled Steel Tube Column-CFST*), salt burulma ve eksenel yük altındaki burulma davranışlarını incelemiştir. Çalışmanın parametrelerini eksenel yük seviyesi ($n=0$, $n=0.2$, $n=0.6$), kolon kesiti (dairesel- $\phi 220$ mm, dikdörtgen- 150×200 mm), çelik tüp kalınlığı (4 mm, 6 mm) ve yükleme türü (salt burulma, eksenel yüklü burulma) oluşturmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre; eksenel yük arttıkça burulma ve dönme kapasitesinin azaldığı, 4 mm tüp kalınlığına sahip kolonların çelik tüp yüzeyinde daha çok kırılma meydana geldiği, dikdörtgen kesitli kolonların uzun kenarlarının yüzeyinde daha çok burulma hasarının olduğu, $n=0.6$ olan kolonlar hariç diğer tüm kolonlardaki

yük boşaltma rijitliğinin, başlangıç rijitliğine çok yakın olduğu, eksenel yük arttıkça basınç etkisi beton tarafından karşılanırken burulma etkisinin çelik tüp tarafından karşılandığı gözlemlenmiştir.

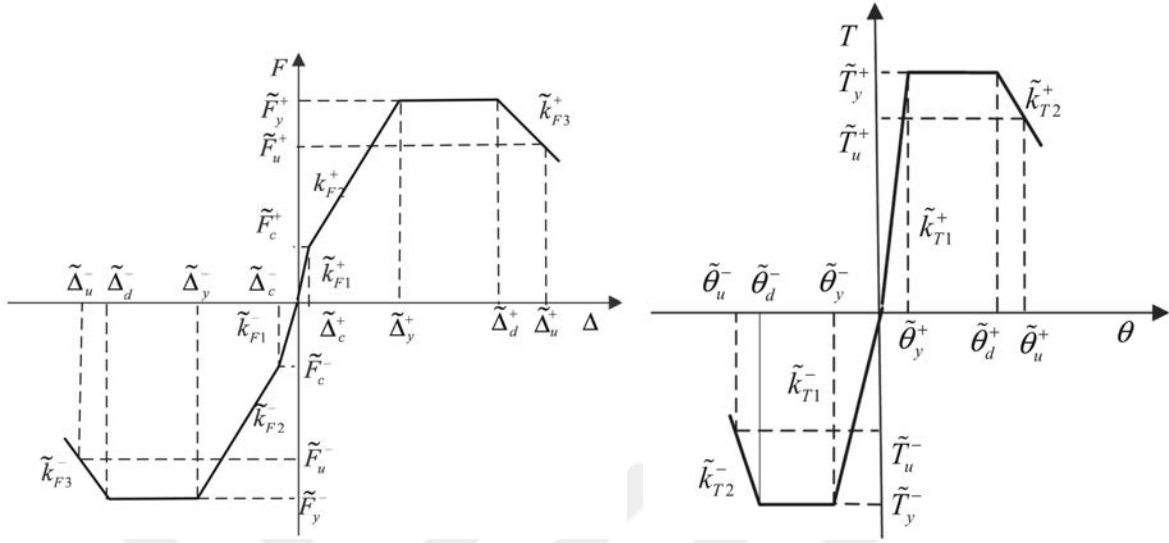
Prakash ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmada, betonarme dairesel kolonların çevrimsel eğilme ve kesme, çevrimsel salt burulma ve çeşitli seviyelerde birleşik çevrimsel eğilme, kesme ve burulma etkisinde bir dizi deneye tabi tutmuşlar ve elemanları DIANA sonlu elemanlar programı ile analiz ederek deney sonuçları ile kıyaslamışlardır. Çalışmada dikkate alınan ana değişkenler spiral donatı oranı (%0.73 ve %1.32), burulmanın eğilme momentine oranı (T/M) (0, 0.2, 0.4 ve ∞) ve kolonun kesme açıklığı oranıdır (H/D) (3 ve 6). Birleşik yükler altında kolonlar, 6 ve 3 kesme açıklığı (H/D) oranları ile 0.2 ve 0.4 burulma/eğilme momenti oranlarında test edilmiştir. Genel davranış, salt eğilme ve salt burulmaya maruz kalan hem kısa hem de uzun kolonlarda benzer sonuçlar göstermiştir. Ancak, ağır hasar bölgesinin konumu ve hasar seviyelerinin önemli ölçüde farklı olduğu görülmüştür. Eğilme ve kesme durumlarında düşük kesme açıklığı oranına ($H/D=3$) sahip kolonların alt yüzeyindeki çatlaklar çekme bölgesi boyunca daha fazla yoğunlaşırken, yüksek kesme açıklığı oranına ($H/D=6$) sahip kolonların çatlakları tüm kesit boyunca yayıldığı gözlemlenmiştir. Salt burulma durumlarında ilginç bir durum gözlemlenmiştir. Von Mises gerilme değişimlerine göre, düşük kesme açıklığı oranına ($H/D=3$) sahip kolonların, yüksek kesme açıklığı oranına ($H/D=6$) sahip kolonlara kıyasla çekirdek kesitinin yüksekliği boyunca daha az hasar bölgelerine sahip olduğu görülmüştür. Başka bir deyişle, yüksek kesme açıklığı oranına ($H/D=6$) sahip kolonlar çekirdek kesitinde dağınık hasar bölgelerine sahiptir. Ancak, düşük kesme açıklığı oranına ($H/D=3$) sahip kolonlardaki hasar seviyelerinin yüksek kesme açıklığı oranına ($H/D=6$) sahip kolonlardan daha şiddetli olduğu görülmüştür. Birleşik yüklemeye maruz kalan kolonlar, yani $T/M=0.4$, kesme açıklığı oranına daha duyarlıdır. Birleşik yükleme altındaki düşük kesme açıklığı oranına ($H/D=3$) sahip kolonlarda, eğilmeden ziyade burulmanın daha baskın olduğu görülürken, yüksek kesme açıklığı oranına ($H/D=6$) sahip kolonlar davranışta tam tersi bir eğilim göstermiştir. Enine donatı oranındaki artış, özellikle burulma içeren yükleme koşulları altındaki kolonlar için, kolonların tüm uzunluğu boyunca dış yüzeylerde ve çekirdek bölümlerinde meydana gelen hasarı önemli ölçüde azaltmıştır. Eğilme ve kesme altındaki kolonların kesme kapasitesi, kesme açıklığı oranındaki azalmayla birlikte artmıştır. Ancak hem deneylerde hem de sonlu elemanlar analizinde, kolonların nihai kesme ve nihai burulma değerlerindeki yer değiştirme ve dönme, birleşik yüklemeler altında önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir.

Mullapudi ve Ayoub (2013) yaptıkları çalışmada, karma yüklemelere maruz kalan betonarme elemanlar için üç boyutlu (3B) beton modeli önermişlerdir. Önerilen model, eksenel kuvvet, iki yönlü kesme, iki eksenli eğilme ve burulma arasındaki etkileşimi ele almak üzere

formüle edilmiştir. Kesme mekanizması, herhangi bir kesit geometrisine sahip 3B çerçeve elemanlarıyla Timoshenko kiriş yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir. Model, yapı ve kesit seviyesinde 3B denge, uyum ve malzeme yasalarını dikkate almaktadır. Çalışmanın odak noktası, farklı gerilme durumlarının elemanın genel ve yerel davranışları üzerindeki etkisinin değerlendirilmesidir. Model, 3B yükleme altındaki numunelerin nihai dayanım, sertlik, enerji dağılımı ve hasar modlarını, deneysel betonarme numunelerin sonuçları ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Deneysel çalışma olarak Prakash ve diğ. (2010) tarafından test edilen eksenel, kesme, eğilme ve burulma yüklemeleri altındaki kolonların sonuçları kullanılmıştır. Yazarların sundukları model ile referans aldıkları deney sonuçlarının yakın sonuçlar gösterdiği anlaşılmıştır.

Wang ve diğ. (2014) eksenel yük, eğilme ve burulma etkisi altındaki 20 adet dairesel kesitli betonarme kolonun davranışını incelemişlerdir. Çalışmanın değişkenlerini eksenel dönme/yatay ötelenme oranı ($r=\theta/\Delta$) (0, 0.5, 1, 2, 4, ∞), eksenel yük oranı (0.1, 0.2), boyuna donatı oranı (0.011, 0.015, 0.022) ve enine donatı aralığı (40, 50, 60 mm) oluşturmaktadır. Deney sonuçları incelendiğinde salt eğilme etkisindeki kolonda oluşan plastik mafsallık bölgesi kolonun tabanındayken (yani mesnete yakınen), salt burulma etkisindeki kolonda oluşan plastik mafsallık bölgesi kolonun ortasında oluştuğu görülmüştür. r oranı arttıkça plastik mafsallık boyu, salt eğilme ve salt burulma etkisindeki kolonlarda oluşan plastik mafsallık boyundan daha uzun olmuştur. Eğilme etkisi arttıkça kolonların nihai dönme kapasitesi azalmıştır. Enine donatının spiral şeklinde olmasından kaynaklı itme ve çekme döngülerindeki kolon davranışı birbirinden farklı olmuştur. Donatı oranının artırılması, eğilme dayanımını artırsa da aynı r oranına sahip bileşik eğilme ve burulma etkisindeki kolonların burulma dayanımına çok az katkıda bulunmuştur. Enine donatı aralığının azaltılması, kolonların burulma dayanımını, özellikle itme döngülerinin burulma dayanımını iyileştirmiş; fakat aynı r oranına sahip bileşik eğilme ve burulma altındaki kolonların eğilme dayanımına katkı sağlamamıştır. Yazarlar, Tirasit ve Kawashima (2007) tarafından sunulan Şekil 12 ve Denklem 2.27-40'daki gibi deney düzeneğinde kolonlarda eğilme ve burulma etkisi meydana getiren kuvvetleri kullanarak, kolonların bu birleşik etki altındaki eğilme ve burulma rijitliklerinin, eğilme ve burulma dayanımlarının hesaplanabileceği ampirik denklemler geliştirmişlerdir (Şekil 2.13) (Denklem 2.41-67). Aralarındaki fark, Tirasit ve Kawashima (2007) tarafından önerilen eğrilerde sadece pozitif (itme) yükleme yönünde değerler varken, Wang ve diğ. (2014) tarafından önerilen modelde hem pozitif (itme) hem de negatif (çekme) yönünde değerler vardır. Hemen ifade edilmelidir ki Tirasit ve Kawashima (2007) kare kesitli kolonlar üzerinde deneyler yapmışken Wang ve diğ. (2014) dairesel kesitli kolonlar üzerinde deneyler yapmışlardır. Dolayısıyla kapalı etriyeye sahip enine donatı kullanılan kolonların deneysel sonuçları ve

dolayısıyla önerilen eğriler (Şekil 2.12) ile spiral şeklindeki enine donatı kullanılan kolonların deneysel sonuçları ve dolayısıyla önerilen eğriler (Şekil 2.13) birbirinden farklı olacaktır.



Şekil 2.13. Wang ve diğ. (2014) tarafından önerilen eğilme ve burulmaya ait eğriler

$$\tilde{k}_{F1} = \frac{\tilde{F}_c}{\tilde{\Delta}_c L_{eff}} \quad (2.41)$$

$$\tilde{k}_{F2} = \frac{\tilde{F}_y - \tilde{F}_c}{(\tilde{\Delta}_y - \tilde{\Delta}_c) L_{eff}} \quad (2.42)$$

$$\tilde{k}_{F3} = \frac{\tilde{F}_u - \tilde{F}_y}{(\tilde{\Delta}_u - \tilde{\Delta}_y) L_{eff}} \quad (2.43)$$

$$\tilde{k}_{T1} = \frac{\tilde{T}_y}{\tilde{\theta}_y} \quad (2.44)$$

$$\tilde{k}_{T2} = \frac{\tilde{T}_u - \tilde{T}_y}{(\tilde{\theta}_u - \tilde{\theta}_d)} \quad (2.45)$$

$$\tilde{F}_c^+ = (e^{-0.178r}) F_c \quad (2.46)$$

$$\tilde{F}_c^- = (e^{-0.493\sqrt{r}}) F_c \quad (2.47)$$

$$\tilde{F}_y^+ = (e^{-0.0634r}) F_y \quad (2.48)$$

$$\tilde{F}_y^- = (e^{-0.283\sqrt{r}}) F_y \quad (2.49)$$

$$\tilde{F}_u = 0.8 \tilde{F}_y \quad (2.50)$$

$$\tilde{\Delta}_c^+ = e^{-0.565r} \Delta_c \quad (2.51)$$

$$\tilde{\Delta}_c^- = e^{-0.565r} \Delta_c \quad (2.52)$$

$$\tilde{\Delta}_y^+ = (1 - 0.087r)\Delta_y \quad (2.53)$$

$$\tilde{\Delta}_y^- = e^{-0.026r}\Delta_y \quad (2.54)$$

$$\tilde{\Delta}_d^+ = (2.37e^{-0.246r})\Delta_y \quad (2.55)$$

$$\tilde{\Delta}_d^- = (2.37e^{-0.34r})\Delta_y \quad (2.56)$$

$$\tilde{\Delta}_u^+ = (3.78e^{-0.246r})\Delta_y \quad (2.57)$$

$$\tilde{\Delta}_u^- = e^{-0.34r}\Delta_y \quad (2.58)$$

$$\tilde{T}_y^+ = (e^{-0.169/r})T_y^+ \quad (2.59)$$

$$\tilde{T}_y^- = (e^{-0.277/r})T_y^- \quad (2.60)$$

$$\tilde{T}_u = 0.8\tilde{T}_y \quad (2.61)$$

$$\tilde{\theta}_y^+ = (e^{-0.42/r})\theta_y^+ \quad (2.62)$$

$$\tilde{\theta}_y^- = (e^{-0.49/r})\theta_y^- \quad (2.63)$$

$$\tilde{\theta}_d^+ = 8(1 - e^{-r/1.67})\theta_y^+ \quad (2.64)$$

$$\tilde{\theta}_d^- = 8(1 - e^{-r/2.2})\theta_y^- \quad (2.65)$$

$$\tilde{\theta}_u^+ = (12e^{-0.84/r})\theta_y^+ \quad (2.66)$$

$$\tilde{\theta}_u^- = (12e^{-0.0/r})\theta_y^- \quad (2.67)$$

Deng ve diğ. (2017) eksenel yük, eğilme, kesme ve burulma etkileri altındaki dairesel kesitli betonarme kolonların davranışlarını bir dizi deney yaparak incelemişlerdir. Çalışmadaki değişkenler kolon yüksekliği (1.4 m, 1.9 m, 2.4 m), boyuna donatı oranı (%1.3, %2.3, %3.6), enine donatı oranı (%0.6, %1.0, %1.5), burulma/eğilme oranı (1/0.32, 1/0.5, 1/2.25) şeklindedir. DeneySEL çalışmadan elde edilen verilerin ışığında şu sonuçlara ulaşılmıştır: 1) Küçük burulma/eğilme oranında, kolonlarda eğilme hasarları meydana gelirken, plastik mafsallık boyu kolon çapının yaklaşık 0.8 katı olarak gözlemlenmiştir. Büyük burulma etkisi altında ise, burulma hasarları gerçekleşmiş ve plastik mafsallık boyu kolon çapının yaklaşık 1.1 katı olmuştur. 2) Eğilme için yapılan deneylerde, histerezis döngüleri tam ve enerji dağılım kapasitesi yüksektir. Burulma histerezis döngüleri ise hızla azalmış ve tam olmamıştır. Burulma sünekliğinin eğilme sünekliğinden daha fazla olduğu görülmüştür. 3) Yüksek burulma/eğilme oranına sahip kolonların deney sonuçları, maksimum kesme kuvveti ve maksimum yatay ötelenme kapasitesinin, diğer

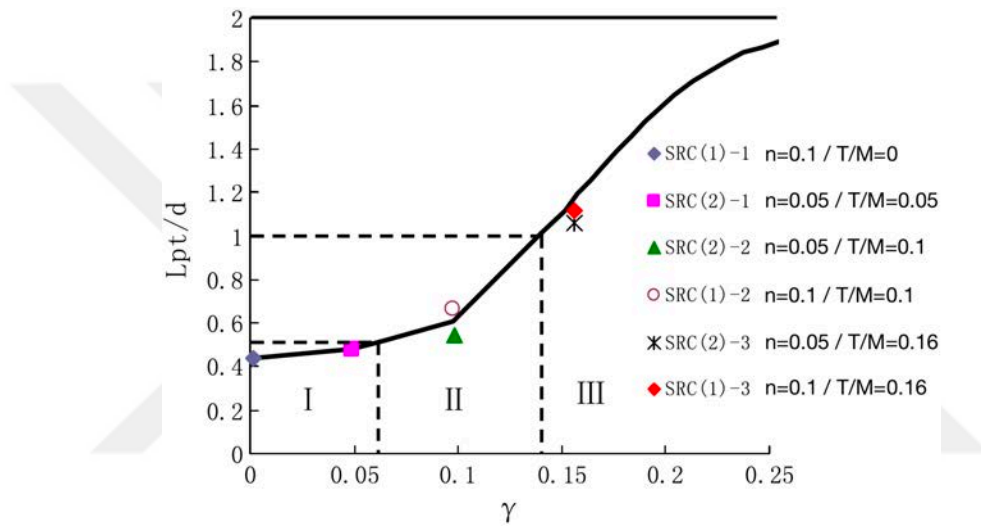
kolonlarınkinden daha küçük olduğunu göstermiştir. 4) Kolon yüksekliğindeki azalma ile birlikte, eğilme kapasitesi, eğilme rijitliği ve enerji yutma kapasitesi artarken, yatay ötelenme ve sünekliğin azaldığı görülmüştür. Ancak, kolonların burulma davranışlarının benzer sonuçlar gösterdiği gözlemlenmiştir. 5) Boyuna donatı oranının artması ile eğilme kapasitesinin, eğilme rijitliğinin ve enerji yutma kapasitesinin arttığı gözlemlenirken, sünekliğin azaldığı gözlemlenmiştir. Kolonların burulma davranışı ise yine neredeyse değişmemiştir. Ayrıca, enine donatı oranının artmasının, kolonun burulma kapasitesini ve burulma rijitliğini artırdığı, fakat enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkisinin belirgin olmadığı tespit edilmiştir. Yazarlar ayrıca ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanarak kolonlar üzerinde aynı etkileri oluşturacak şekilde bir analiz gerçekleştirmişler ve analiz sonuçları ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Analiz sonuçları ile deneysel sonuçların grafikleri incelendiğinde, oldukça yakın değerler gösterdiği gözlemlenmiştir.

Wang ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada 6 adet betonarme dolgu çelik tüp kolonu (*Steel Tube Confined Reinforced Concrete-STRC*) eksenel yük-eğilme-burulma etkileri altında incelemiştir. Kolonlardan 3 tanesi dairesel kesitli ($D=200$ mm), 3 tanesi kare kesitlidir ($b=h=200$ mm). Çalışmanın değişkenlerini kolon kesit tipi (dairese, kare) ve yük etkileri (salt burulma, salt eğilme, eğilme-burulma, eğilme-burulma-eksenel yük) oluşturmaktadır. Deney sonuçları incelendiğinde eksenel yükün ($n=0.3$) olduğu kolonların sünekliği, eğilme ve burulma kapasitelerinin, eksenel yükün olmadığı kolonlardan daha fazla olduğu görülmüştür. Burulma momentinin varlığı, eğilme kapasitesini azaltmıştır. Kolonlara eksenel yük uygulandığında: 1) Hem burulma hem de eğilmede donatının akma dayanımı yükselmiş, 2) Eğilme ve burulma momenti kapasitesi artmış, 3) Donatının aktığı andaki deplasman ve dönme değerleri azalmış, 4) Rijitlik azalmış, 5) Maksimum dönme azalırken, maksimum deplasman artmıştır.

Chen ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada çelik takviyeli 7 adet kare kesitli (450×450 mm) betonarme kolonu (*Steel Reinforced Concrete-SRC*) değişik burulma momenti/eğilme momenti (T/M) (0, 0.05, 0.1, 0.16, ∞) ve eksenel yük (0.05, 0.10) altında test etmişlerdir. Deney sonuçları incelendiğinde eksenel yük arttıkça eğilme ve burulma kapasitelerinin arttığı, burulma momenti arttıkça eğilme kapasitesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Kolonlarda eğilme baskın, eğilme-burulma ve burulma baskın durumları için plastik mafsallarda değişiklikler olduğu görülmüştür. Bu durumla ilgili şu ifadeler yer verilmiştir:

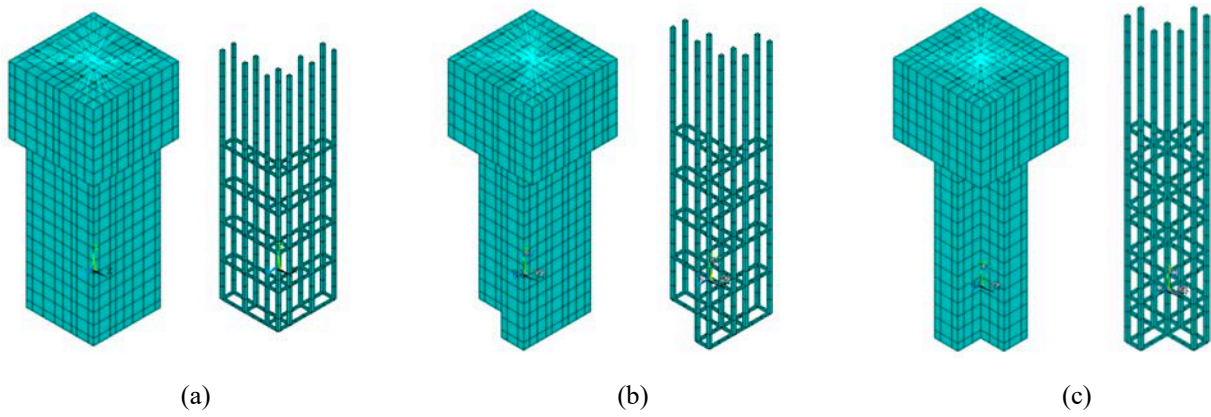
- “1. *Eğilme baskın kırılma (Tip I)*: Numune kırılması, $L_P/d < 0.5$ olduğunda kolonun tabanında eğilme plastik mafsallarda oluşmasıyla başlar. Bu kırılma modu eğilme kırılması olarak tanımlanır.
2. *Eğilme-burulma kırılması (Tip II)*: Numune kırılma modu, $0.5 < L_P/d < 1.0$ olduğunda eğilme ve burulma kırılması arasındadır ve birleşik kırılma türü Tip II olarak tanımlanır.

3. *Burulma baskın kırılma (Tip III):* $L_{pt}/d \geq 1.0$ olduğunda numunede kolonun tüm uzunluğu boyunca dağılmış hasar vardır ve bu kırılma modu Tip III olarak tanımlanabilir.” Burada L_{pt} plastik mafsallık boyunu ifade ederken d kolon kesit uzunluğunu ifade etmektedir. Yazarlar, Burulma/Eğilme (T/M) oranının (γ) kolonlarda oluşan plastik mafsallık uzunluğuna etkisini ifade etmek için Şekil 2.13’teki grafiği sunmuşlardır. Şekil 2.14’teki grafik ile Şekil 2.11 ve Denklem 2.26 karşılaştırıldığında, Tirasit ve Kawashima (2007) sonuçlarında salt eğilme göçmesi ve salt burulma göçmesi altındaki kolonların limit hasar uzunluğunu temsil etmek için sırasıyla $L_{pt}/d = 0.5$ ve $L_{pt}/d = 1.5$ kullanıldığına dikkat edilmelidir. Burulma baskın hasarın oluşması için kritik T/M oranının 0.14 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.14. Burulma/Eğilme (T/M) oranının kolonlardaki kırılma tipine etkisi (Chen ve diğ., 2018)

He ve Zhang (2020) farklı kesit tipine sahip betonarme kolonların eksenel yük ve burulma etkisi altındaki davranışlarını ANSYS sonlu elemanlar programını kullanarak araştırmışlardır. Çalışmanın değişkenlerini kesit tipi (T, L, X) (Şekil 2.15) ve eksenel yük oranı (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7) oluşturmaktadır. Yazarlar, her bir kolonun farklı eksenel yük oranları altındaki burulma kapasitesini ve nihai dönme kapasitesini ortaya koymuşlardır. Elde edilen sonuçlara göre en az dönme kapasitesine sahip kolonlar L tipi olurken, en fazla dönme kapasitesi X tipi kolonlarda görülmüştür. Fakat genel olarak en büyük burulma kapasitesi L tipi kolonlarda olurken en düşük burulma kapasitesi ise X tipi kolonlarda gözlemlenmiştir. Eksenel yük oranı 0.6 olana kadar tüm kolonların burulma dayanımı artarken, 0.6 eksenel yük oranından sonra burulma dayanımı azalmıştır.



Şekil 2.15. He ve Zhang (2020) tarafından yapılan çalışmadaki kesit tipleri; a) L tipi, b) T tipi, c) X tipi

Attarchian ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada, tasarım olarak birbirinin aynısı olan 4 adet dikdörtgen kesitli (300x600 mm) betonarme kolonun davranışını, salt eğilme, salt burulma ve eğilme ile burulmanın birlikte etkidi durumlarda incelemişlerdir. Eğilme ve burulmanın birlikte etkidi durumdaki değişkeni eksenel dönme/yatay ötelenme oranı ($r=\theta/\Delta$) (0, 2, 4, ∞) olarak belirlemişlerdir. Eksenel yük oranı ise sabit ve 0.07'dir. Çevrimsel olarak yapılan deneylerin sonuçlarına göre burulma momenti arttıkça eğilme momenti kapasitesi ve buna bağlı olarak yanal ötelenme oranı azalmıştır. Salt eğilme ile kıyaslandığında yanal ötelenmedeki azalma $r=2$ olan numunede %44 olurken, $r=4$ olan numunede %76 olmuştur. Maksimum eğilme momentinde ise azalma $r=2$ olan numunede %23, $r=4$ olan numunede %43 olmuştur. Deney sonuçlarına göre numunelerin enerji tüketimleri incelendiğinde, salt eğilmeye maruz numune ($r=0$) 164 kJ, $r=2$ olan numune 120 kJ, $r=4$ olan numune 19 kJ enerji tüketmiştir. Bu sonuçlar, kolonların tasarımı yapılırken eksenel kuvvet ve eğilme etkisinin yanında burulmanın da hesaba katılması gerektiğini göstermektedir.

Cao ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada çelik takviyeli betonarme kolonların (*Steel Reinforced Concrete-SRC*) davranışını, eksenel yük-eğilme-kesme-burulma etkileri altında deneysel olarak incelemişlerdir ve ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışmada değişken olarak; eksenel yük oranı (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5), burulma/eğilme oranı (0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5), beton dayanımı (25, 35, 45, 55, 65 MPA), çelik oranı, boyuna donatı oranı (%1, %1.79, %2.79, %4.36, %7.15) enine donatı oranı (%0.17, %0.22, %0.34, %0.45, %0.67) kesme açıklığı oranı (%2.33, %3.00, %3.67, %4.33, %5.00) kullanmışlardır. Sonuçlara göre eksenel yük seviyesi arttıkça kolonun burulma kapasitesi artmış, fakat sünekliği azalmış, çelik oranı arttıkça burulma dayanımı artmış, enine ve boyuna donatı davranışı neredeyse etkilememiştir. Analiz sonuçlarına göre kolonlarda en fazla etkiyi beton dayanımı ve kesme açıklığı oranı yapmıştır. Eksenel yük oranı 0.4'e kadar arttıkça burulma dayanımı artmakta, bu değerden sonra azalmaktadır.

Jiao ve diğ. (2021) dairesel kesitli (D=400 mm) 4 adet betonarme kolonun davranışına, Burulma/Eğilme (T/M) oranının (0, 0.1, 0.2) ve kesme açıklığı oranının (H/D) (3, 3.5) etkisini deneysel çalışma yaparak incelemişlerdir. Deneylerde kolonlara $n=0.10$ seviyesinde eksenel yük uygulanmıştır. Deneysel çalışmanın sonucunda T/M oranı arttığında, farklı kolonların aynı konumundaki yanal yer değiştirme histerezis eğrisinin ve burulma histerezis eğrisinin dolgunluğunun azaldığı, daralma etkisinin (*pinch effect*) arttığı gözlemlenmiştir. Kesme açıklığı oranı azaldığında, kolonların sünekliğinin ve eğilme kapasitesinin azaldığı görülürken, burulma ve kesme kapasitesinin arttığı görülmüştür. Yazarlar, Tirasit ve Kawashima (2007) ve Wang ve diğ. (2014) tarafından sunulan Şekil 12, Şekil 13, Denklem 2.27-35 ve Denklem 2.41-58'deki gibi deney düzeneğinde kolonlarda burulma ve eğilme etkisi meydana getiren kuvvetleri kullanarak, kolonların bu birleşik etki altındaki eğilme rijitliklerinin ve dayanımlarının hesaplanabileceği ampirik denklemler geliştirmişlerdir (Şekil 2.16) (Denklem 2.68-77).

$$\tilde{k}_{F1} = \frac{\tilde{F}_c}{\tilde{\Delta}_c} \quad (2.68)$$

$$\tilde{k}_{F2} = \frac{\tilde{F}_y - \tilde{F}_c}{(\tilde{\Delta}_y - \tilde{\Delta}_c)} \quad (2.69)$$

$$\tilde{k}_{F3} = \frac{\tilde{F}_u - \tilde{F}_y}{(\tilde{\Delta}_u - \tilde{\Delta}_y)} \quad (2.70)$$

$$\tilde{F}_c = (e^{-2.138r})F_c \quad (2.71)$$

$$\tilde{F}_y = (e^{-1.174r})F_y \quad (2.72)$$

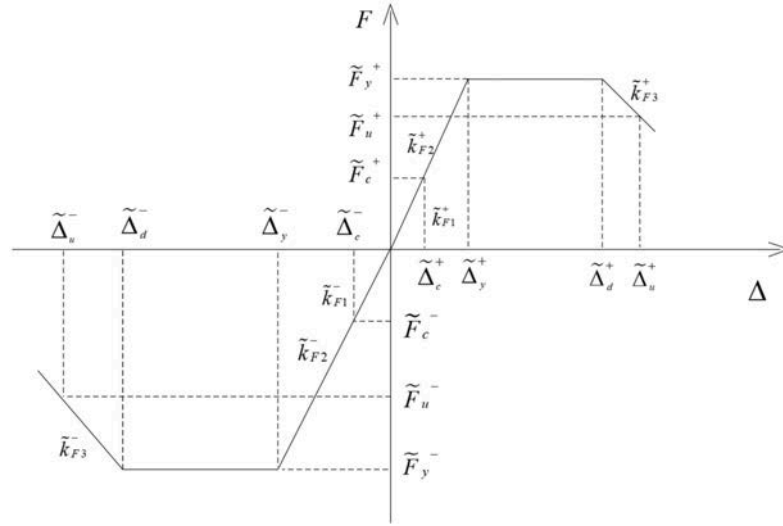
$$\tilde{F}_u = 0.8\tilde{F}_y \quad (2.73)$$

$$\tilde{\Delta}_c = e^{-0.174r}\Delta_c \quad (2.74)$$

$$\tilde{\Delta}_y = (1 - 0.394r)\Delta_y \quad (2.75)$$

$$\tilde{\Delta}_d = (1.849e^{-1.709r})\Delta_y \quad (2.76)$$

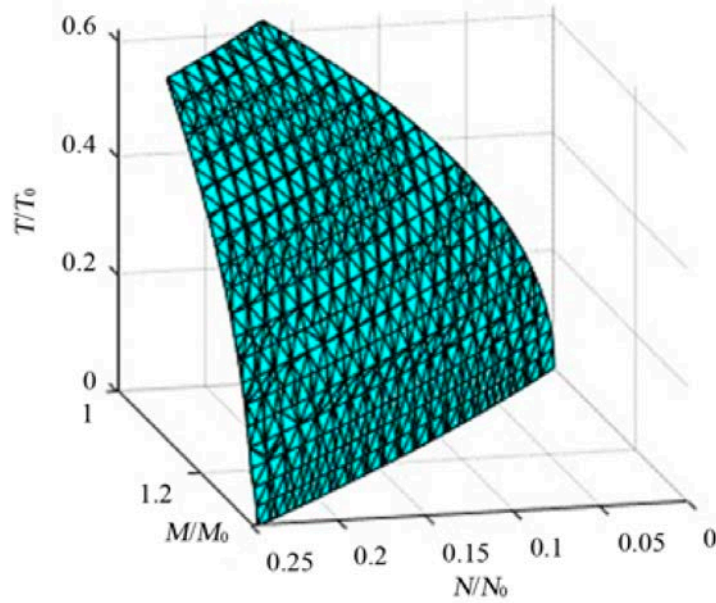
$$\tilde{\Delta}_u = (2.857e^{-1.538r})\Delta_y \quad (2.77)$$



Şekil 2.16. Wang ve diğ. (2014) tarafından önerilen eğilmeye ait eğri

Yu ve Shan (2021) yaptıkları çalışmada, 12 adet T kesitli betonarme kolonun, eksenel yük-eğilme-kesme-burulma etkisi altındaki davranışını deneysel çalışma yaparak incelemişlerdir. Çalışmanın ana değişkenlerini eksenel yük oranı (0.16, 0.25) ve burulma momenti (3.2, 5.9, 6.5 kNm) oluşturmaktadır. Kolonlar boyuna donatı akana kadar yük kontrol modunda test edilmiş, donatılar aktıktan sonra deplasman kontrolüne geçilmiştir. Deneylerde ilk olarak kolonlara eksenel yük daha sonra burulma momenti verilmiş ve son olarak eğilme momenti kırılma olana kadar kademeli olarak artırılmış ve bu süreçte eksenel yük ile burulma momenti değişmemiştir. Elde edilen sonuçlara göre burulma momenti arttıkça eğilme dayanımının azaldığı görülmüştür. Bunun aksine eksenel yük oranı arttıkça, aynı burulma momenti değerinde eğilme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. T/T_0 oranı 0.62 değerinin altındaki elemanlarda eğilme kırılması oluşurken, bu değer üstündeki elemanlarda eğilme-burulma kırılması olduğu gözlemlenmiştir. Burada T kolona uygulanan burulma momentini ifade ederken, T_0 kolonun salt burulma altındaki burulma kapasitesini ifade etmektedir. Eksenel yük oranı 0.25'te, bileşik yükleme altındaki elemanların kırılma modu, eğilme kırılmasından basınç kırılmasına dönmüştür. Ayrıca yazalar, elde ettikleri veriler ışığında eksenel yük-eğilme-kesme-burulma etkilerini içeren, kolonların dayanımı ile ilgili ampirik bir denklem de ortaya koymuşlar, basınç-eğilme-kesme üçlü etkileşim diyagramını sunmuşlardır (Denklem 2.78) (Şekil 2.17).

$$3.12 \left(\frac{N}{N_0} \right) + 1.01 \left(\frac{M}{M_0} \right)^2 + 1.35 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 1.01 \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 = 1 \quad (2.78)$$



Şekil 2.17. Yu ve Shan (2021) tarafından önerilen basınç-eğilme-burulma üçlü etkileşim diyagramı

Zhou ve diğ. (2022) kaynaklı saplamalı çelik takviyeli betonarme kolonun (*Steel Reinforced Concrete-SRC*) eksenel yük-eğilme-kesme-burulma etkisindeki davranışını incelemişlerdir. Çalışmanın ana değişkenlerini çelik saplama konumu, saplama aralığı, saplama uzunluğu ve saplama düzeni oluşturmaktadır. Bu amaçla 9 adet numune üretilmiş ve eksenel yük-eğilme-kesme-burulma altında test edilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler, saplama konumunun elemanın burulma kapasitesini etkilemediğini göstermiştir. Bununla beraber kaynaklı saplamalı numunenin eğilme kapasitesinin ve sünekliğinin diğer numunelerinkinden daha büyük olduğu görülmüştür. Ağ şeklinde yapılan saplamlar ise, elemanların davranışını kayda değer bir şekilde etkilememiştir. Genel olarak ise saplamlar eğilme performansından ziyade burulma performansı üzerinde etkili olmuştur. Saplamlar SRC kolonların burulma rijitliğini %10 artırırken, simetrik saplamların burulma rijitliğinin azalmasını geciktirdiği görülmüştür. Kaynaklı saplamlar burulma sünekliğini %59 artırırken, ağ şeklinde yapılanlar ise %12 artırabilmiştir.

Solak (2023) yaptığı tez çalışmasında 7 adet 1/2 ölçekli betonarme kare kesitli kolona, farklı eksenel yük uygulayarak burulma momenti kapasitelerini inceleyen deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Eksenel yük oranları 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 ve 0.30 olarak belirlenmiştir. Kolonların burulma momenti kapasiteleri, eksenel yük oranı 0.10, 0.15 ve 0.25'te en az olurken, 0.05 ve 0.30'da en fazla olmuştur. Eksenel yük oranı 0.05 ve 0.20 olan numunelerde oluşan plastik mafsallık bölgesi kolonun alt bölgesinde (mesnete yakın) oluşurken, diğerlerinde orta bölgede olduğu gözlemlenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Betonarme kolonların eksenel yük-eğilme-burulma etkileri altındaki davranışını araştırmak için 10 adet tam ölçekli betonarme kolon üretilmiştir. Üretilen kolonlar Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda test edilmiştir. Bu elemanlardan 9 tanesi aynı özelliklere sahipken, enine donatı aralığının kolonların davranışına etkisinin incelenmesi amacıyla 1 tanesinin etriye aralığı diğerlerinden farklıdır. Betonarme kolonların tasarımı yapılırken TBDY-2018 dikkate alınmıştır. Deneysel çalışma sonuçlarının daha doğru açıklanabilmesi için kolon kesitleri kare olarak seçilmiştir. Kolonlar, yatay yüklerin verilebilmesi için üzerlerinde kirişler ile birlikte üretilmiştir. Üretilen kolon-kirişler (bu iki birleşim bundan sonra sadece kolon olarak ifade edilecektir) laboratuvarındaki deney düzeneğinde döşemeye ankastre olarak mesnetlenebilmesi için bir soket temelin içine yerleştirilmiştir. Tek bir soket üretilmiş ve laboratuvarındaki deney düzeneğinin olduğu yere montajlanmıştır. Her bir eleman deney öncesi, bu soket ile grout harcı kullanılarak birleştirilmiş ve ankastre mesnet koşulları sağlanmış, deney sonunda grout harcı kırılarak soketten çıkarılmış ve yerine yenisi konulmuştur.

3.1. Betonarme Kolonların Tasarımı

Tez çalışması kapsamında kullanılan betonarme kolonların tasarımında TBDY-2018 koşulları dikkate alınmıştır. Yönetmelik gereği C25'ten daha düşük dayanımlı beton binalarda kullanılmamaktadır (TBDY-2018 Madde 7.2.5.1). Donatı kullanımında ise B420C ile B500C nervürlü donatı çeliklerinin kullanımına izin verilmektedir (TBDY-2018 Madde 7.2.5.3 (b)). Kolonlarda boyuna donatı alanı, brüt kesitin %1'inden az, %4'ünden daha büyük olamamaktadır. Kolonlarda $\phi 14$ den daha ince ve dairesel kolonlarda 6 adetden daha az donatı kullanılamamaktadır (TBDY-2018 Madde 7.3.2.1). Kolonların enine donatıları ile ilgili olarak sarılma bölgelerinde $\phi 8$ 'den küçük çaplı enine donatının kullanılamayacağı, bu bölgede boyuna doğrultudaki etriye ve çiroz aralığı en küçük kesit boyutunun $1/3$ ünden, 150 mm'den daha büyük, boyuna donatı çapının altı katından daha büyük, 50 mm'den daha küçük olmayacağı, etriye kollarının ve/veya çirozların arasındaki yatay mesafe, a, etriye çapının 25 katından daha büyük alınamayacağı ifade edilmiştir (TBDY-2018 Madde 7.3.4.1 (a)). Bu hususlar dikkate alınarak betonarme kolonların kesit boyutları 300*300 mm, beton sınıfı C25 ve çelik donatı sınıfı B420C nervürlü çelik donatı seçilmiştir. Boyuna donatı oranının %1 ile %4 arasında kalabilmesi için 8 $\phi 14$ donatı kullanılırken

(Denklem 3.1), enine donatı aralıkları ise 80 mm olarak seçilmiştir. Bu koşullar doğrultusunda çalışmada kullanılan betonarme kolonlara ait özellikler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

$$\rho = \frac{10 \frac{\pi 14^2}{4}}{300 \cdot 300} = 0.017 \quad (3.1)$$

Çizelge 3.1. Betonarme elemanların özellikleri

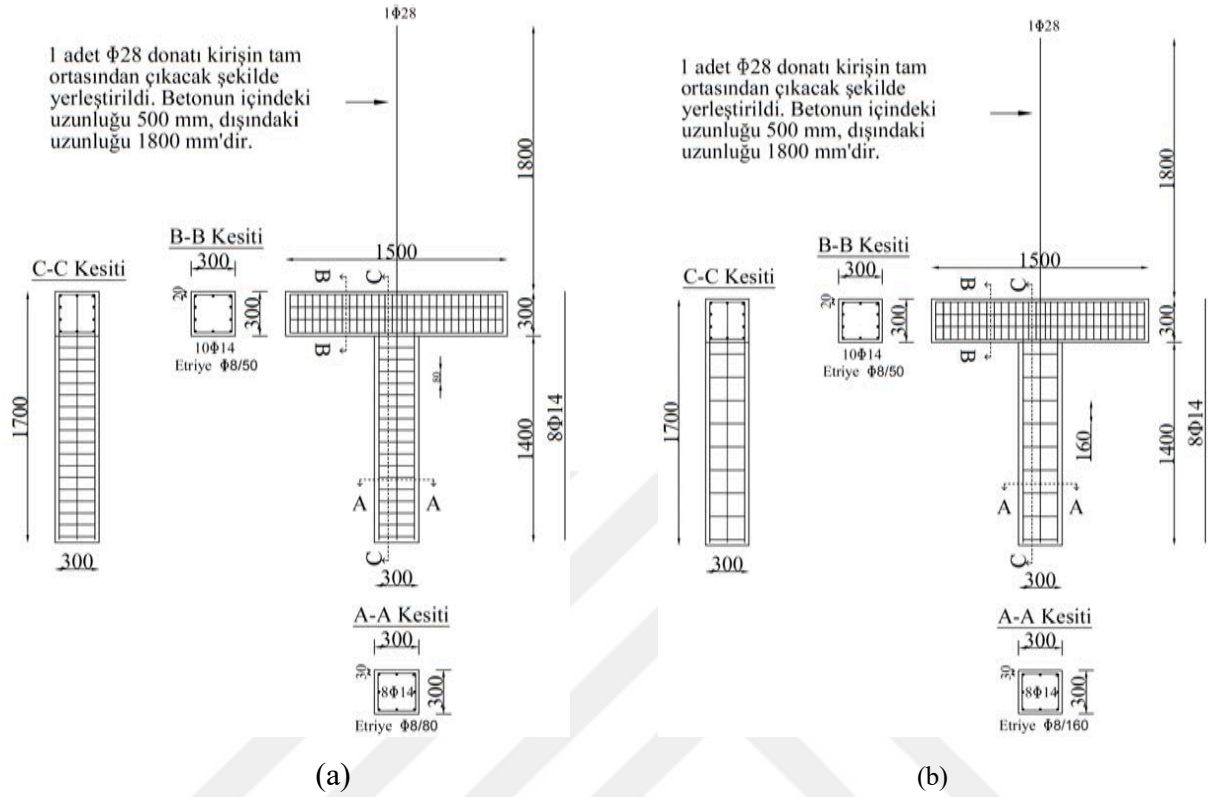
Numune Adı	T/M	n	Beton/Donatı Sınıfı	b (mm)	h (mm)	H (mm)	Enine	Boyuna Donatı
							Donatı Aralığı (mm)	
T1-N10-S8	1	0.10	C25/B420C	300	300	1200	80	8φ14
T1-N20-S8	1	0.20	C25/B420C	300	300	1200	80	8φ14
T1-N30-S8	1	0.30	C25/B420C	300	300	1200	80	8φ14
T1-N40-S8	1	0.40	C25/B420C	300	300	1200	80	8φ14
T2-N20-S8	2	0.20	C25/B420C	300	300	1200	80	8φ14
T0-N20-S8	0	0.20	C25/B420C	300	300	1200	80	8φ14
T0-N30-S8	0	0.30	C25/B420C	300	300	1200	80	8φ14
M0-N20-S8	∞	0.20	C25/B420C	300	300	1200	80	8φ14
M0-N30-S8	∞	0.30	C25/B420C	300	300	1200	80	8φ14
T1-N30-S16	1	0.30	C25/B420C	300	300	1200	160	8φ14

(T: Burulma momenti, M: Eğilme momenti, n: Eksenel yük oranı, b: Kesitin eni, h: Kesitin boyu, H: Kolonun yüksekliği)

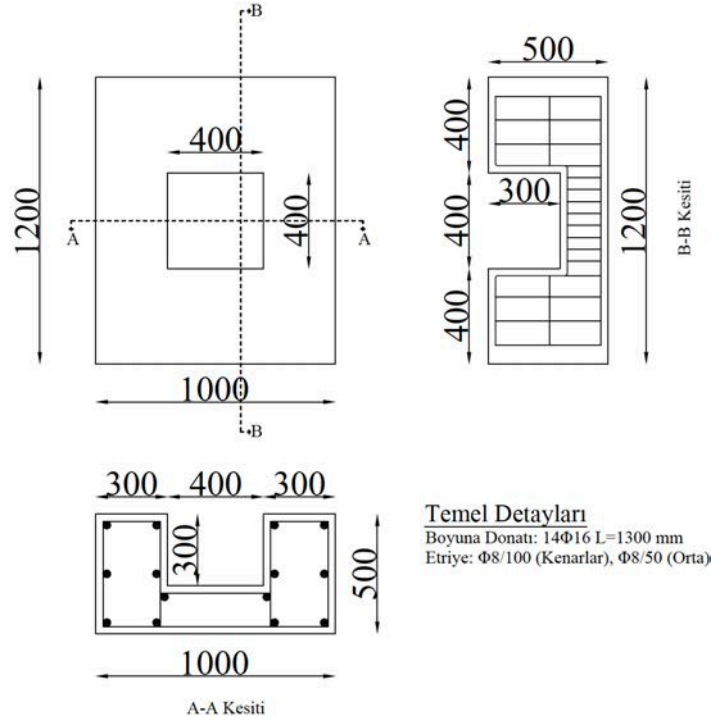
Çizelge 3.1’deki;

- **T0:** Burulma/Eğilme oranının 0 olduğunu (Salt Eğilme)
- **T1:** Burulma/Eğilme oranının 1 olduğunu
- **T2:** Burulma/Eğilme oranının 2 olduğunu
- **M0:** Burulma/Eğilme oranının ∞ olduğunu (Salt Burulma)
- **N10:** Eksenel yük oranının 0.10 olduğunu
- **N20:** Eksenel yük oranının 0.20 olduğunu
- **N30:** Eksenel yük oranının 0.30 olduğunu
- **N40:** Eksenel yük oranının 0.40 olduğunu
- **S8:** Enine donatı aralığının 80 mm olduğunu
- **S16:** Enine donatı aralığının 160 mm olduğunu ifade etmektedir.

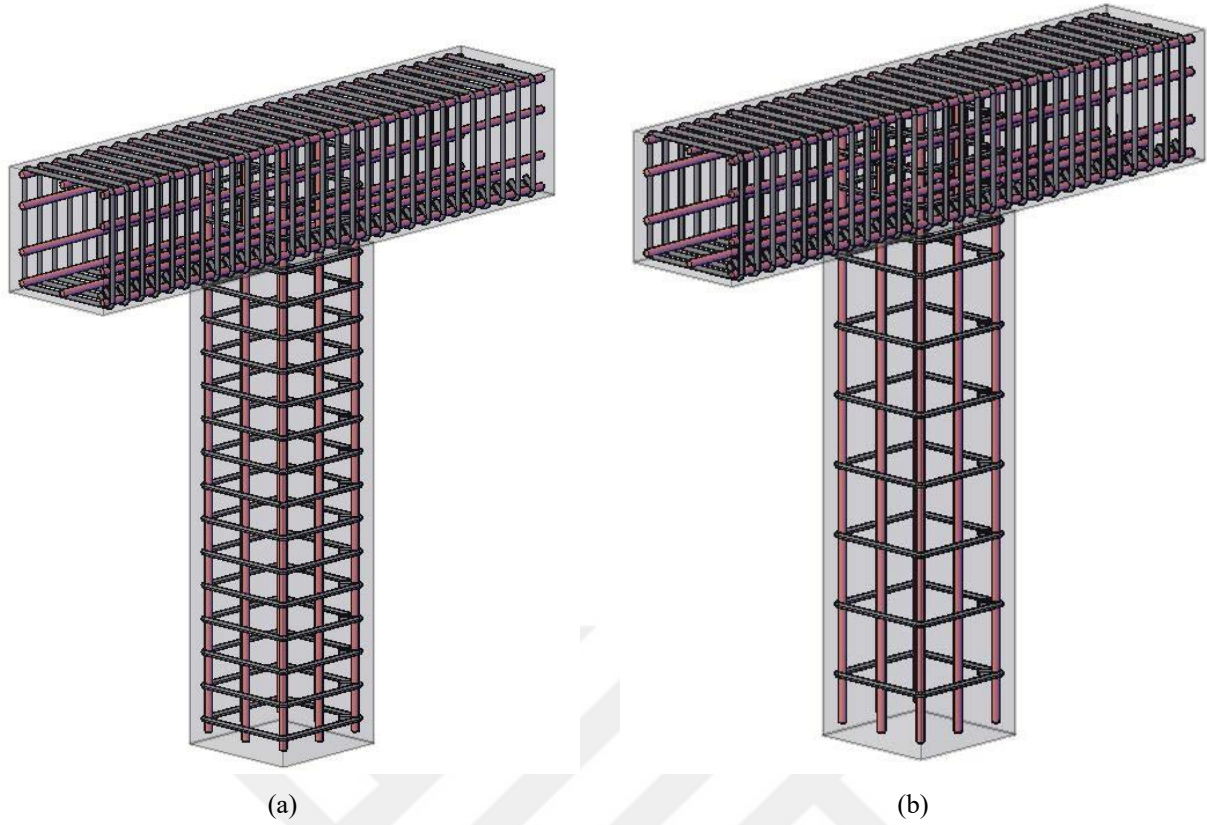
Kolonlara ait donatı şemaları Şekil 3.1’de, sokete ait donatı şeması Şekil 3.2’de, kolonlara ait 3 boyutlu şemalar Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kolonlara ait donatı şeması, a) Enine donatı aralığı 80 mm, b) Enine donatı aralığı 160 mm



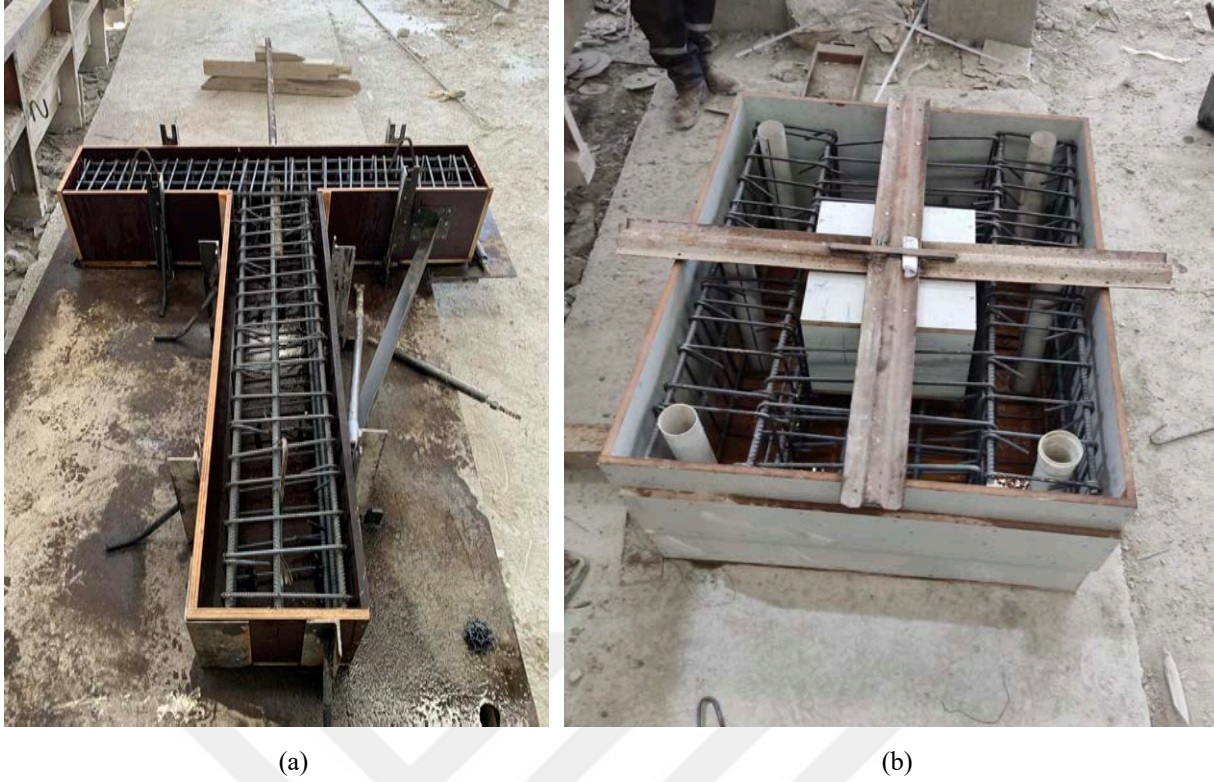
Şekil 3.2. Sokete ait donatı şeması



Şekil 3.3. Kolonlara ait 3 boyutlu şema, a) Enine donatı aralığı 80 mm, b) Enine donatı aralığı 160 mm

3.2. Deney Numunelerinin Üretimi ve Malzeme Özellikleri

Tez çalışması kapsamında kullanılan betonarme kolonlar, Konya ilinde faaliyet gösteren bir prefabrik tesisinde üretilmiştir. Beton sınıfı olarak C25, donatı sınıfı olarak B420C kullanılması istenmiş ve Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’deki donatı şemalarına bağlı olarak üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.5. Elemanların üretimi, a) Kolon, b) Soket

Üretilen elemanların malzeme özelliklerinin net olarak belirlenebilmesi amacıyla numuneler alınmış ve test edilmiştir. Beton basınç dayanımının belirlenmesi için her bir kolon için 3 adet 150 mm boyutunda küp numune alınmış, 28 gün boyunca gerekli kür şartlarının sağlanması için suda bekletilmiş ve ardından basınç deneyi yapılmıştır. Donatı özelliklerinin belirlenmesi için her bir donatı çapından 3 adet donatı numunesi alınmış ve çekme deneyine tabi tutulmuştur. Beton basınç dayanımları 0.85 ile çarpılarak silindir dayanımı elde edilmiştir.

Beton basınç deneyi sonuçları Çizelge 3.2’de, donatı çekme deneyi sonuçları Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Beton basınç deneyi sonuçları

<i>Numune No</i>	<i>Yük (N)</i>	<i>Kesit Alanı (mm²)</i>	<i>Küp Dayanımı (MPa)</i>	<i>Ortalama Küp Dayanımı (MPa)</i>	<i>Ortalama Silindir Dayanımı (MPa)</i>
1	695000	22500	30.89		
2	718000	22500	31.91	29.80	25.33
3	724000	22500	32.18		
4	712000	22500	31.64		
5	739000	22500	32.84	30.36	25.81
6	727000	22500	32.31		
7	683000	22500	30.35		
8	692000	22500	30.75	28.51	24.24
9	671000	22500	29.82		
10	701000	22500	31.15		
11	714000	22500	31.73	29.45	25.04
12	698000	22500	31.02		
13	744000	22500	33.06		
14	736000	22500	32.71	30.96	26.32
15	741000	22500	32.93		
16	704000	22500	31.29		
17	714000	22500	31.73	29.84	25.37
18	723000	22500	32.13		
19	662000	22500	29.42		
20	679000	22500	30.17	28.21	23.98
21	683000	22500	30.35		
22	683000	22500	30.35		
23	667000	22500	29.64	28.43	24.17
24	690000	22500	30.67		
25	745000	22500	33.11		
26	751000	22500	33.38	33.28	28.29
27	752000	22500	34.42		
28	765000	22500	34.00		
29	713000	22500	31.69	30.67	26.07
30	722000	22500	32.09		

Çizelge 3.3. Donatı çekme deneyi sonuçları

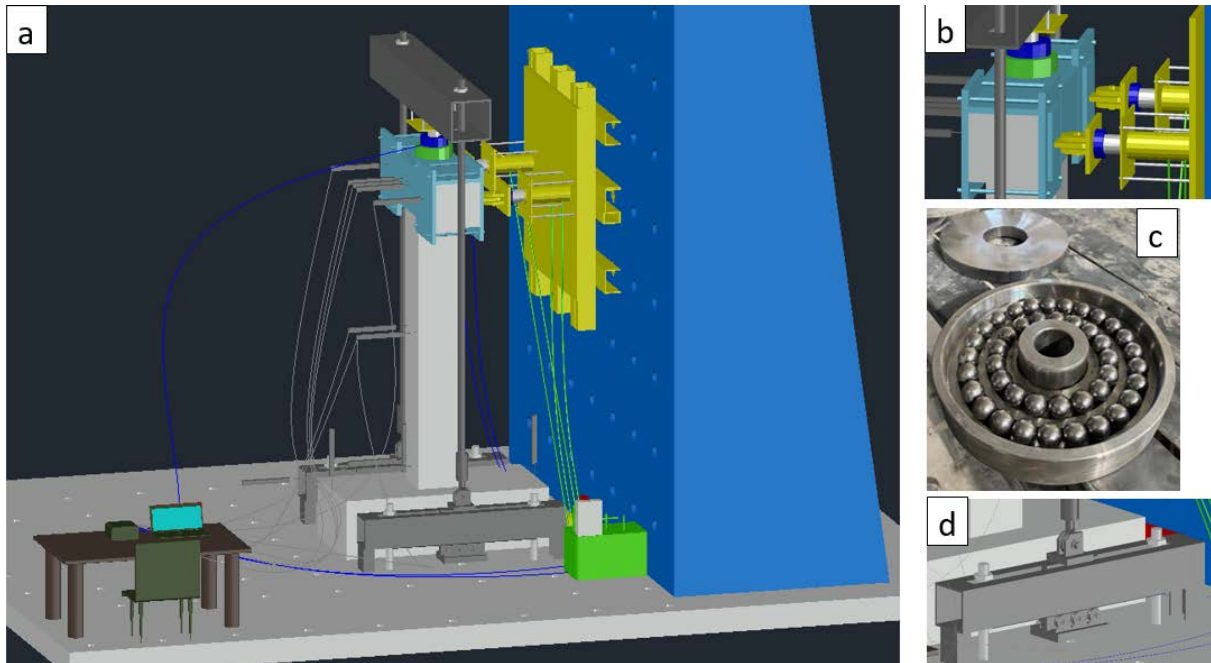
<i>Donatı Çapı</i> (mm)	<i>Akma Dayanımı</i> (MPa)	<i>Çekme Dayanımı</i> (Mpa)	<i>Kopma Dayanımı</i> (Mpa)	R_m/R_e	<i>Uzama</i> (%)
8	384.55	463.09	441.21	1.20	26.12
8	391.21	452.74	436.15	1.16	24.18
8	388.63	481.18	469.43	1.24	25.54
14	400.36	461.29	423.56	1.15	24.65
14	398.02	468.68	429.90	1.17	22.42
14	410.75	461.23	428.13	1.12	23.76

Not: R_m/R_e : Çekme Dayanımı/Akma Dayanımı

Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3 incelendiğinde beton için C25, donatı için B420C sınıfı özelliklerinin numunelerde sağlandığı görülmektedir.

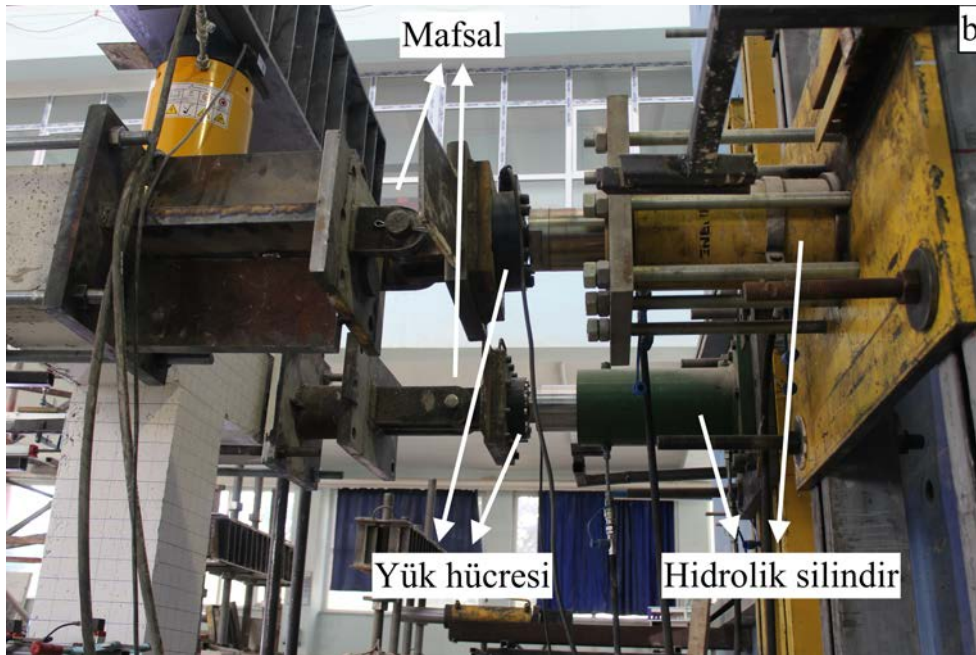
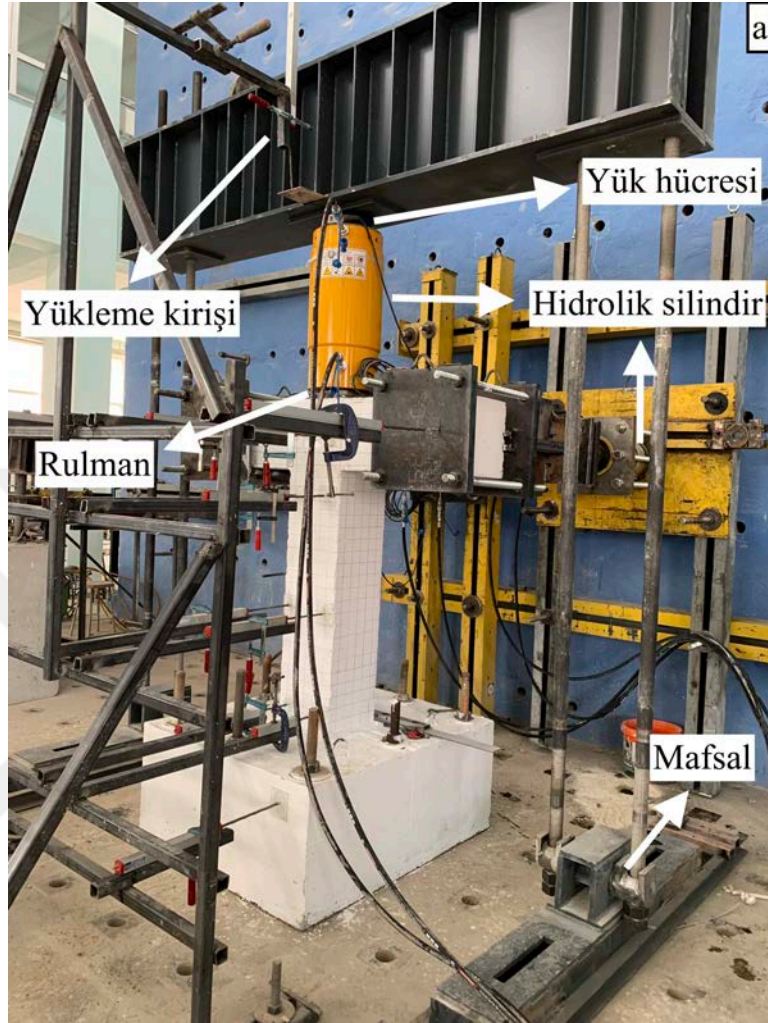
3.2. Deney Düzeneği

Betonarme kolonlara aynı anda eksenel yük, eğilme ve burulma etkilerinin verilebilmesi amacıyla, Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda yeni bir düzenek oluşturulmuştur. Söz konusu düzenek Şekil 3.6'da verilmiştir.

**Şekil 3.6.** Yükleme düzeneği

Eğilme ve burulma etkilerini verebilmek için kolon üstüne, bir döküm olacak şekilde betonarme kiriş eklenmiştir. Deney elemanları depremi benzeştiren tersinir-tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Burulma etkisinin verilebilmesi amacıyla betonarme kirişin uçlarına çelik plakalardan bir başlık yapılmıştır. Bu başlıklara iki ayrı hidrolik silindir ile yatay yük verilmiştir. Böylelikle başlık uçlarına uygulanan ötelenme miktarlarının değişimi ile numunelere hem burulma hem de eğilme etkisi verilmiştir. Ayrıca eşzamanlı olarak kolonlara eksenel yük uygulanması amacıyla bir eksenel yük sistemi yapılmıştır. Çalışmaya ait deney düzeneği Şekil 3.6a'da verilmiştir. Deney elemanının üstündeki kirişin uç bölgelerine birer adet 500 kN basma ve çekme kapasiteli yük hücresi yerleştirilerek numunelere uygulanan yatay yükler ölçülmüştür (Şekil 3.6b). Böylece hem eğilme hem burulma hem de eksenel yük için numunelere verilen yükler belirlenmiştir. Deney elemanlarında yük hücrelerine bağlı mafsallı bir plaka düzeneği yapılmıştır (Şekil 3.6b). Böylece numunelerin ötelenmesinde sistem serbest bir şekilde hareket etmiş ve ilave zorlanmalar meydana gelmemiştir. Eksenel yük sisteminin deney elemanları ile birleştiği bölgede çelik bilyeler ve plakalar ile oluşturulmuş bir rulman mekanizması yapılmıştır (Şekil 3.6c). Bu sayede ileri ve geri çevrimlerde ve burulma hareketinde sistemin hareket kabiliyeti sağlanmıştır. Deney elemanlarının temel kısmında beton dökülmeden önce 8 adet silindir şeklinde boşluklar açılmıştır. Bu boşluklardan ve Konya Teknik Üniversitesi Deprem Araştırma Laboratuvarı döşemesinde bulunan deliklerin içinden transmisyon milleri geçirilerek deney elemanları laboratuvar döşemesine sabitlenmiştir. Bu şekilde deney elemanlarının temel kısmı hareket etmeyerek ankastre mesnet özellikleri göstermiştir. Eksenel yük düzeneği için oluşturulan çelik temel kirişleri deney elemanının iki yanındaki laboratuvar döşemesinde bulunan delikler vasıtasıyla yere sabitlenmiştir (Şekil 3.6d). Çelik temel kirişi üzerine bir mafsallı mekanizması oluşturulmuştur. Bu mafsallı sistem eksenel yük için oluşturulan çelik yükleme kirişine miller ile bağlanmıştır. Bu sayede ileri ve geri çevrimlerde eksenel yükün sabit kalması sağlanmıştır. Deney elemanı ile çelik yükleme kirişi arasında ise eksenel yük verebilmek amacıyla 1000 kN kapasiteli bir hidrolik silindir, verilen eksenel yük değerlerini anlık ölçebilmek amacıyla 1000 kN kapasiteli bir yük hücresi ve burulma esnasında deney elemanlarının rahatça hareket edebilmesi amacıyla bilyeli bir birleşim konulmuştur. Böylece deney elemanlarına hem yatay ötelenme hem eksenel yük hem de burulma momenti aynı anda verilebilmiştir. Deney düzeneğinin laboratuvardaki görüntüsü Şekil 3.7'de verilmiştir. Deneylerde elemanlara hassas yük verilebilmesi amacıyla uygun bir otomasyon sistemi üretilmiştir. Otomasyon panosuna uygun bir yazılım ile modelleme yapılarak deneye uygun yüklerin verileceği otomasyon panosu hazırlanmıştır (Şekil 3.8a). Otomasyon panosundan ayarlanan yüklerin deney düzeneğindeki hidrolik silindirlere aktarılması

için uygun bir hidrolik güç ünitesi imal edilmiş ve otomasyon panosu ile hidrolik silindirlere entegre edilmiştir (Şekil 3.8b).



Şekil 3.7. Yükleme düzeneğinin laboratuvar görüntüsü, a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş



(a) (b)
Şekil 3.8. Otomasyon sistemi, a) otomasyon panosu, b) hidrolik güç ünitesi

3.3. Yükleme Protokolü

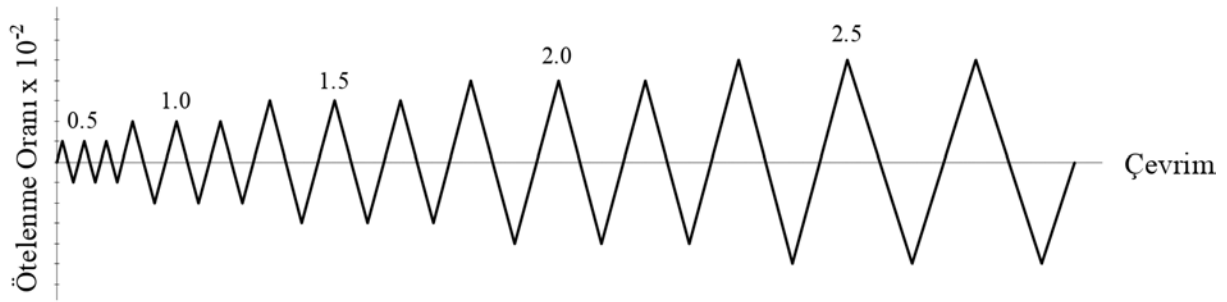
Kolonlara ilk olarak eksenel yük uygulanmıştır. Eksenel yük oranına bağlı olarak kolonlara uygulanması gereken eksenel yük seviyesi Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem 3.2’de n eksenel yük oranını, N uygulanan eksenel yük seviyesini, A_c kolon kesit alanını, f_{ck} beton karakteristik basınç dayanımını ifade etmektedir (TBDY-2018 Madde 7.4.1.2). Tez kapsamında kolonlara uygulanan eksenel yük seviyesi Çizelge 3.4’te verilmiştir.

$$n = \frac{N}{A_c f_{ck}} \quad (3.2)$$

Çizelge 3.4. Eksenel yük oranlarına bağlı eksenel yük seviyeleri

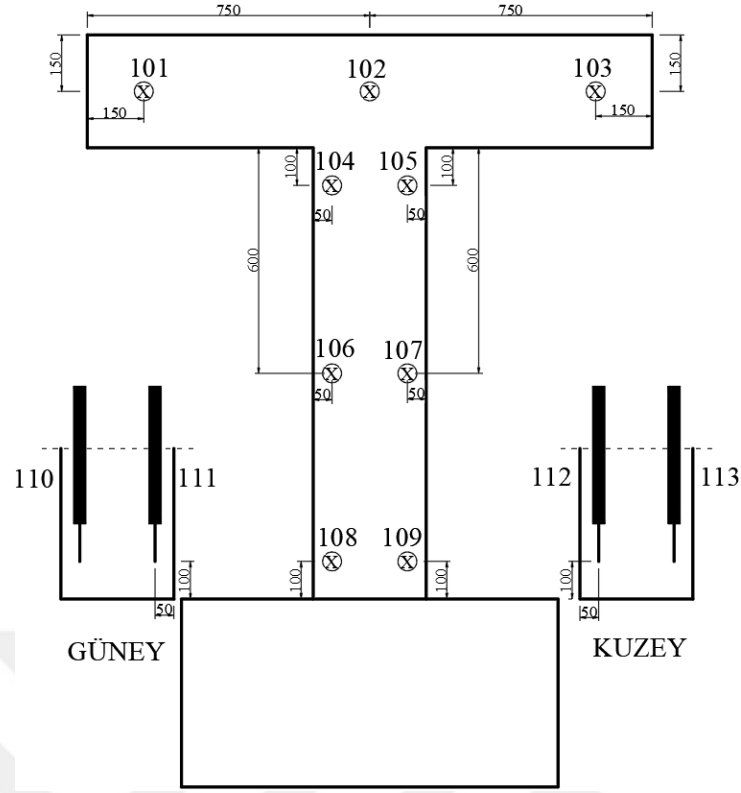
Eksenel Yük Oranı	Kesit Alanı (mm ²)	Beton Karakteristik Basınç Dayanımı (MPa)	Eksenel Yük Seviyesi (kN)
0.1	90000	25	225
0.2	90000	25	450
0.3	90000	25	675
0.4	90000	25	900

Kolonlara, belirlenen seviyede eksenel yük uygulandıktan sonra yatay yüklerin uygulanma işlemine geçilmiştir. Kolonlarda eğilme durumu için ötelenme artışları ACI-374 (2005)'e göre seçilmiştir. Bu ötelenme artışı %0.5 olacak şekilde seçilmiştir (Şekil 3.9). Her bir çevrim 3 kez tekrarlanmış ve kolonların eğilme momenti kapasitesinde %20 azalma meydana gelene kadar devam edilmiştir.



Şekil 3.9. Yükleme protokolü (ACI-374 (2005))

Tez çalışması kapsamında kolonlara uygulanan yatay ötelenmeler ACI-374 (2005)'e göre belirlenirken kolonlara ne kadar burulma uygulanması gerektiği ile ilgili herhangi bir protokol literatürde bulunamamıştır. Betonarme kolonların burulma davranışı ile ilgili yapılan deneysel çalışmalarda genellikle burulma/eğilme (T/M) oranı ya da eksenel dönme/yatay ötelenme (θ/Δ) oranı dikkate alınmıştır. Bu oranlar her iki durum için çoğunlukla 0.5, 1.0 veya 2.0 seviyesindedir. Bu tez çalışması kapsamında eğilme için yatay etkiler ötelenme oranına bağlı olarak uygulanacağı için (ACI-374 (2005)), burulma etkisini verebilmek amacıyla T/M oranına -yani momentlerin oranına- bağlı olarak değil, θ/Δ oranına -yani deplasmanların oranına- bağlı olarak yatay etkiler belirlenmiştir. Şekil 3.10 ve Denklem 3.3-3.13 kullanılarak kolonun üstündeki kiriş uçlarına uygulanması gereken ötelenme miktarları aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 3.10. Kolon üzerine yerleştirilen LVDT konumları

$$\Delta = \frac{(LVDT_{101} + LVDT_{103})/2}{1200} \quad (3.3)$$

$$\theta = \frac{(LVDT_{101} - LVDT_{103})}{1200} \quad (3.4)$$

$$M = (LC_{101} + LC_{103}) \times 1,2 \quad (3.5)$$

$$T = (LC_{101} - LC_{103}) \times 1,2 \quad (3.6)$$

$$\theta / \Delta = 1 \quad (3.7)$$

$$LVDT_{101} = x \quad LVDT_{103} = y \quad (3.8)$$

$$\frac{x-y}{1200} = \frac{\frac{x+y}{2}}{1200} \quad (3.9)$$

$$x = 3y \quad (3.10)$$

$$LVDT_{101} = 3 LVDT_{103} \quad (3.11)$$

- %0.5 ötelenme oranı ile yükleme adımları gerçekleştirilirse, kolon üst orta noktası (LVDT₁₀₂);

$$1200 \times 0,005 = 6 \text{ mm} \quad (3.12)$$

ötelenme yapmalıdır.

- Orta noktanın 6 mm'nin katları olacak şekilde ötelenme yapması için, kiriş uçlarındaki ötelenmelerin aritmetik ortalamasının 6 mm'nin tam katı olması gerekir.

$$[(LVDT_{101} + LVDT_{103})/2 = 6k] \quad (3.13)$$

- Her bir yükleme adımında LVDT₁₀₁'de okunan değerin LVDT₁₀₃'te okunan değerin 3 katı olması gerekir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5. $\theta / \Delta = 1$ oranı için kiriş uçlarına uygulanan ötelenme miktarları

Ötelenme Oranı (%)	x (mm)	y (mm)	(x+y)/2 (mm)
0.5	9	3	6
1.0	18	6	12
1.5	27	9	18
2.0	36	12	24
2.5	45	15	30

Çizelge 3.5'teki sonuçlar $\theta / \Delta = 1$ oranı için geçerlidir. Diğer yükleme durumları için yatay ötelenme miktarları Çizelge 3.6-3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.6. $\theta / \Delta = 2$ oranı için kiriş uçlarına uygulanan ötelenme miktarları

Ötelenme Oranı (%)	x (mm)	y (mm)	(x+y)/2 (mm)
0.5	12	0	6
1.0	24	0	12
1.5	36	0	18

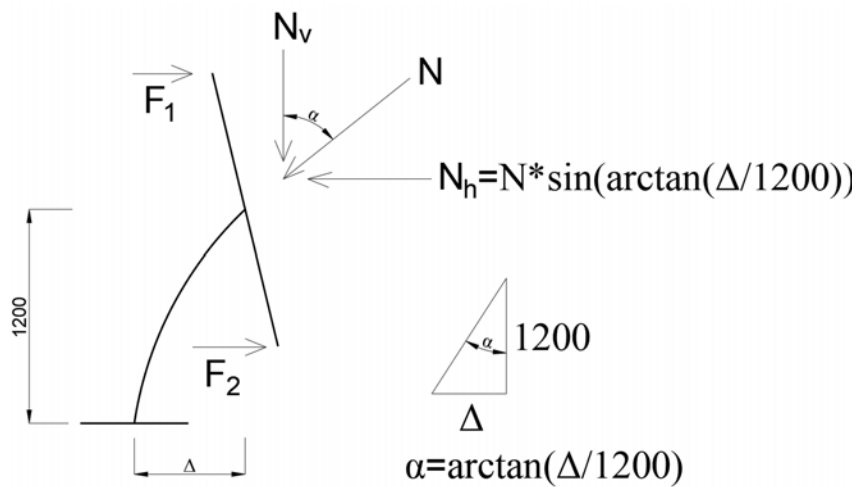
3.3. Ölçümlerin Değerlendirilmesi

Tez çalışması kapsamında yapılan deneylerdeki yüklerin ölçülmesi için 3 adet yük hücresi (*load cell*), ötelenmelerin ölçülmesi için 15 adet potansiyometrik cetvel (*LVDT*) kullanılmıştır. Yük hücreleri ve potansiyometrik cetveller 3 adet veri toplama sistemi (*test box*) kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Aktarılan veriler kullanılarak yük-deplasman, eğilme momenti-yatay ötelenme oranı, burulma momenti-dönme, enerji tüketim ve rijitlik grafikleri oluşturulmuştur.

3.3.1. Yük-deplasman grafiklerinin oluşturulması

Kolonlarda yatay ötelenmeye bağlı olarak eksenel yükün yatay bileşeni meydana gelmektedir. Kolonlara ait yük-deplasman grafikleri oluşturulurken, toplam yatay yüke ilave olarak düşey yükün yatay bileşeni de dikkate alınmıştır. Eksenel yükün yatay bileşeni Denklem 3.14 ile hesaplanmıştır. Denklem 3.14'te F_1 ve F_2 giriş uçlarına uygulanan yükleri (Şekil 3.11), N eksenel yük seviyesini, Δ kolon üst orta noktasının yatay deplasman miktarını (mm) ifade etmektedir. Denklemdeki 1200 ise yatay yükler arasındaki mm cinsinden mesafedir. Toplam yatay yüke bağlı olarak oluşan yatay deplasman değerleri Şekil 3.9'daki 104 ile işaretlenen LVDT değeri ile sağlanmıştır (Şekil 3.12).

$$F_{\text{toplam}} = (F_1 + F_2) - N * \sin(\arctan(\Delta/1200)) \quad (3.14)$$



Şekil 3.12. Toplam yatay yük hesabının şematik gösterimi

3.3.2. Eğilme momenti-Eğrilik grafiklerinin oluşturulması

Kolonlara ait eğilme momenti (M) değerleri Denklem 3.5 kullanılarak bulunmuştur. Eğrilik (K) değerleri ise Şekil 3.10 ile gösterilen elmanın kuzey ve güney yüzlerine yerleştirilen LVDT₁₁₀, LVDT₁₁₁, LVDT₁₁₂ ve LVDT₁₁₃ cetvellerinden deney boyunca elde edilen veriler kullanılarak bulunmuştur (Denklem 3.15).

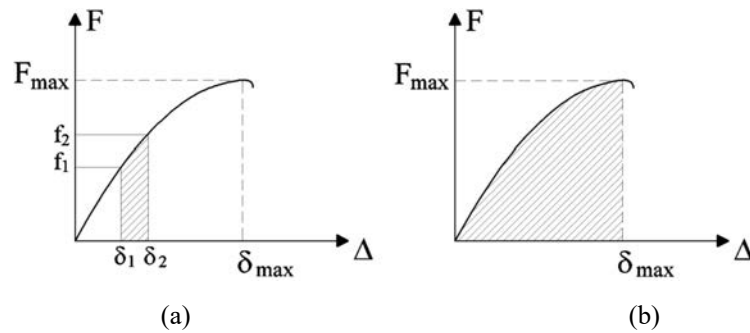
$$K = \frac{(LVDT_{111} + LVDT_{112}) - (LVDT_{110} + LVDT_{113})}{2d} \quad (3.15)$$

3.3.3. Burulma momenti-dönme grafiklerinin oluşturulması

Kolonlara ait burulma momenti (T) değerleri Denklem 3.6 kullanılarak bulunmuştur. Bu değerler ile Denklem 3.4'te bulunan dönme (θ) değerleri kullanılarak burulma momenti-dönme grafikleri oluşturulmuştur.

3.3.4. Enerji tüketim grafiklerinin oluşturulması

Yük-deplasman eğrisinin altında kalan tüketilen enerjiyi ifade ettiği için kolonlara ait tüketilen enerji grafikleri oluşturulurken yük-deplasman grafikleri kullanılmıştır. Şekil 3.12'de gösterildiği gibi yük-deplasman eğrisinin altında kalan alanı bulmak için her yüklemede birim alanlar bulunmuş ve bu birim alanların toplamı o yükleme için kolonlarda tüketilen toplam enerji hesaplanmıştır. Şekil 3.13a'daki taralı alan dik yamuk gibi kabul edilerek Denklem 3.16 ile bulunmuştur. Kolonlarda tüketilen toplam enerji grafiği oluşturulurken düşey eksen tüketilen enerjiyi, yatay eksen kolon üst orta nokta deplasman değerini göstermektedir.

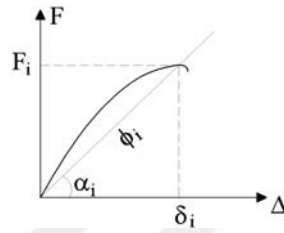


Şekil 3.13. Kolonlarda tüketilen toplam enerjinin bulunması, a) Birim alan, b) Toplam alan (Ünal, 2016)

$$dA = (\delta_2 - \delta_1) \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (3.16)$$

3.3.5. Rijitlik grafiklerinin oluşturulması

Tez çalışması kapsamında yapılan deneyler esnasında kolonlarda hasarlar meydana gelmekte ve rijitlik değeri azalmaktadır. Yatay ötelenme oranına bağlı olarak kolonlarda meydana gelen rijitlik azalımı grafiği oluşturulurken toplam yatay yük ile yatay ötelenme oranı değerleri kullanılmıştır. Şekil 3.14 ve Denklem 3.17’de görüldüğü gibi grafiğin eğimi rijitliği ifade etmektedir. Her bir yükleme ötelenme oranı için kolonların rijitliği bulunarak rijitlik-ötelenme oranı grafikleri oluşturulmuştur.



Şekil 3.14. Kolonlardaki rijitlik değerlerinin belirlenmesi (Ünal, 2016)

$$Rijitlik = \tan \alpha_i = (F_2 / \delta_i) \quad (3.17)$$

3.3.6. Elemanların süneklik katsayılarının hesabı

Elemanların süneklik katsayıları hesaplanırken, zarf eğrisi grafiklerinden yararlanılmıştır. Zarf eğrisi grafiklerindeki başlangıç rijitliklerinden bir doğru çizilmiş ve maksimum yük ile karşılaştırılmıştır. Bu nokta elemanın akma noktası olarak kabul edilmiştir. Maksimum yükün %20 azaldığı nokta ise nihai yük ve deplasman değerleri olarak kabul edilmiştir. Nihai deplasman değeri ile akma deplasman değerinin oranı süneklik katsayısı (μ) olarak hesaplanmıştır (Denklem 3.18).

$$\mu = (\Delta_u / \Delta_y) \quad (3.18)$$

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Betonarme kolonların eksenel yük-eğilme-burulma etkileri altındaki davranışını incelemek amacıyla 10 adet 1/1 ölçekli numune, Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda deneysel olarak test edilmiştir. Numunelere ilk olarak eksenel yük verilmiştir. Eksenel yük deneyler boyunca ± 20 kN sapma olacak şekilde sabit tutulmuştur. Daha sonra deneyin içeriğine bağlı olarak yatay yükler verilmiştir. Deneyler tersinir-tekrarlanır olacak şekilde her bir ötelenme oranı ya da dönme oranı için 3 çevrim şeklinde yapılmıştır.

Deney sırasında numunelerde meydana gelen çatlak genişliği ve desen yapısının daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla her numune deneyden önce beyaz boya ile boyanmış ve üzerine 50 mm x 50 mm ölçülerinde kare çizgiler çizilmiştir. Her bir %0.5 ötelenme oranı sonrası numunelerin yüzeyinde meydana gelen en büyük çatlak genişliği ölçülerek kaydedilmiş ve numunelerin 4 yüzü fotoğraflanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen verilerin daha iyi anlaşılabilmesi için aşağıdaki grafikler hazırlanmıştır:

1. Yatay Yük-Deplasman Grafiği
2. Eğilme Momenti-Eğrilik Grafiği
3. Burulma-Dönme Grafiği
4. Zarf Eğrisi Grafiği
5. Rijitlik Azalım Grafiği
6. Kümülatif Tüketilen Enerji Grafiği

4.1. Deney Sonuçları

4.1.1. T1-N10-S8

Bu deney elemanı, eksenel dönme/yatay ötelenme oranı $\theta/\Delta=1$, eksenel yük oranı %10 ve enine donatı aralığı 80 mm'dir. Elemanın deney düzeneğindeki görüntüsü Şekil 4.1'de verilmiştir.



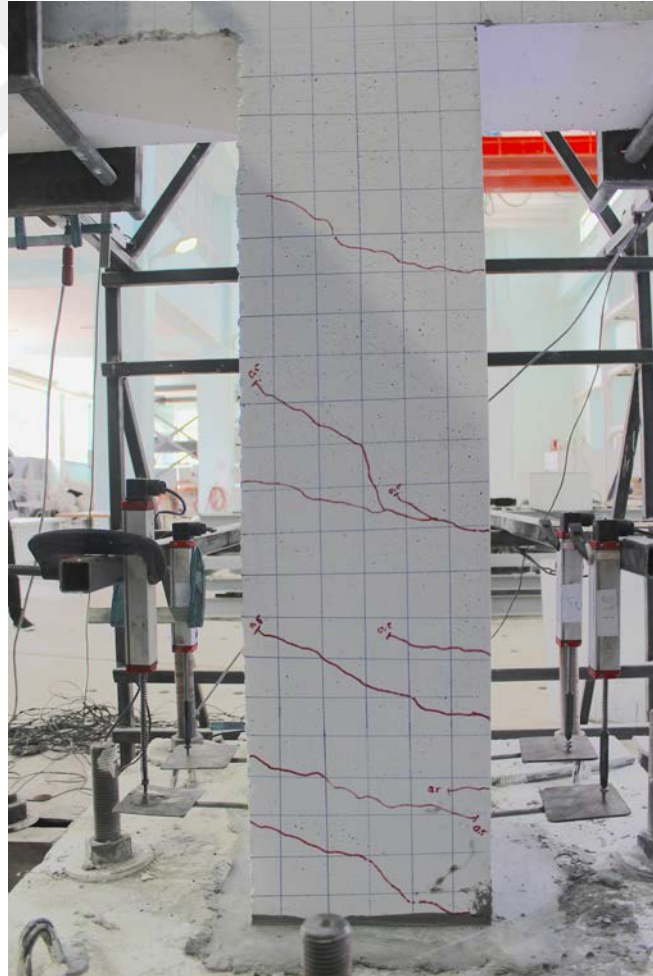
Şekil 4.1. T1-N10-S8 deney elemanının düzenekteki görüntüsü

Elemana ilk olarak %10 eksenel yük oranına karşılık gelen 225 kN eksenel yük verilmiş ve bu değer deney sonuna kadar ± 20 kN sapma olacak şekilde sabitlenmiştir. Daha sonra elemanın üstündeki kiriş uçlarına Çizelge 4.1'deki gibi ötelenmeler uygulanmıştır. Her bir ötelenme oranı için tersinir-tekrarlanır şekilde 3 çevrim yapılmıştır. Elemanın eğilme kapasitesinde yaklaşık %20 düşüş olana kadar deneye devam edilmiştir.

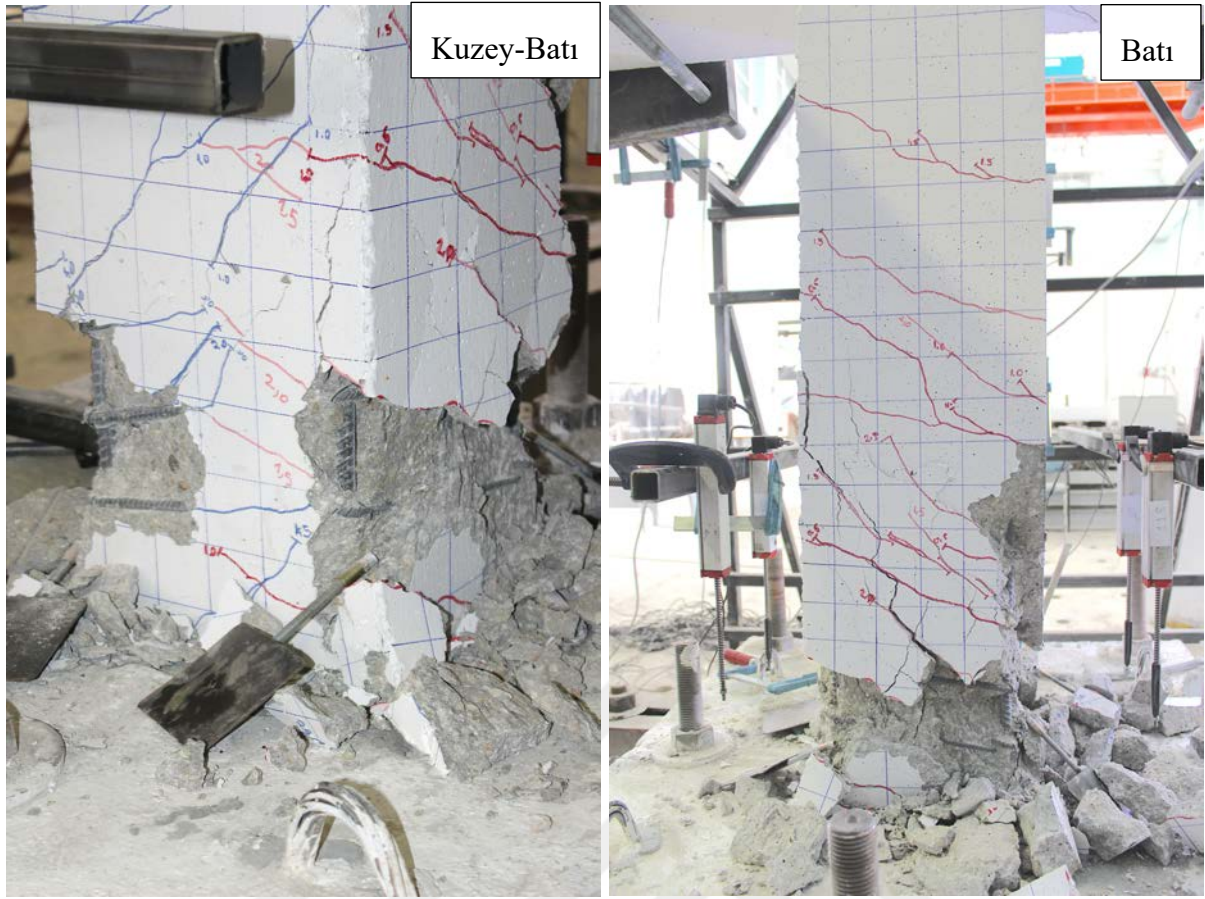
Çizelge 4.1. $\theta / \Delta = 1$ oranı için kiriş uçlarına uygulanan ötelenme miktarları

Ötelenme Oranı (%)	Kiriş Sağ Ucu (x) (mm)	Kiriş Sol Ucu (y) (mm)	(x+y)/2 (mm)
0.5	9	3	6
1.0	18	6	12
1.5	27	9	18
2.0	36	12	24
2.5	45	15	30
3.0	54	18	36
3.5	63	21	42

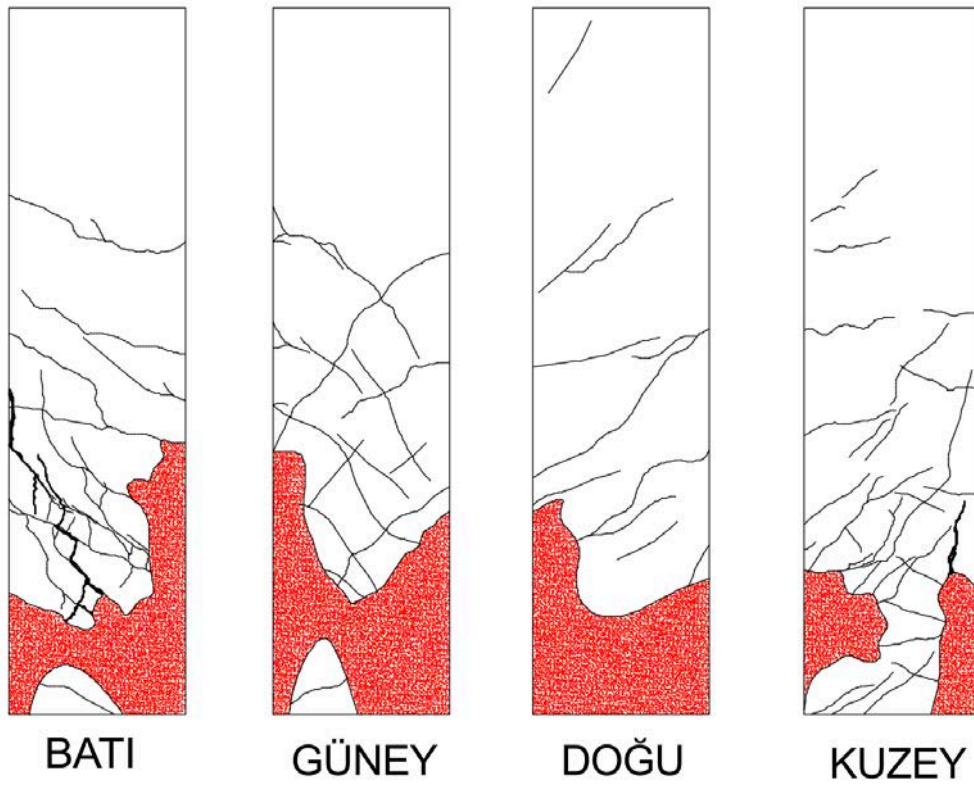
Deney elemanında ilk çatlaklar %0.5 ötelenme oranının ilk çevriminde meydana gelmiştir. İlk çatlak genişlikleri 0.3 mm genişliğinde olup, kolon boyunca eğilme ve burulma çatlakları şeklinde oluşmuştur (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. T1-N10-S8 deney elemanında meydana gelen ilk çatlaklar



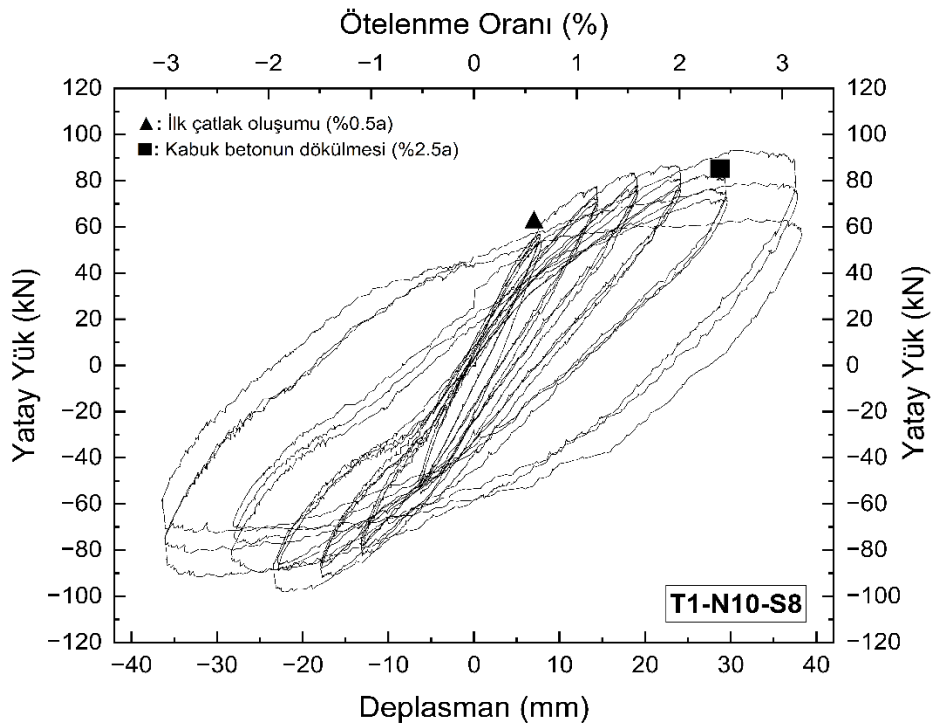
Şekil 4.4. T1-N10-S8 elemanın deney sonu görüntüsü



Şekil 4.5. T1-N10-S8 elemanında oluşan çatlaklar

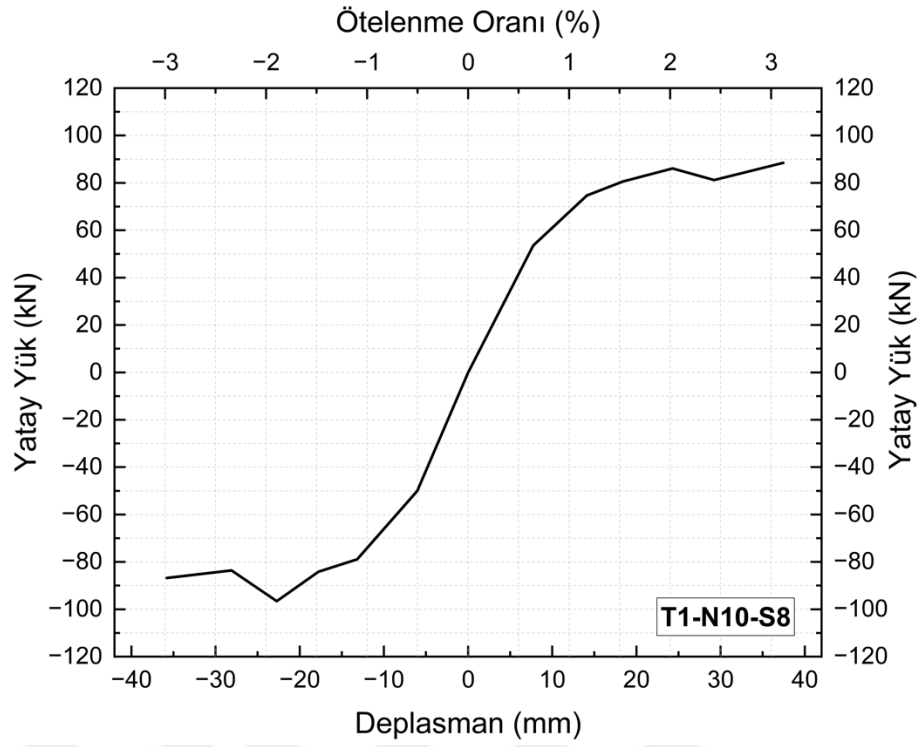
T1-N10-S8 elemanı deney sonuna kadar yük taşımaya devam etmiştir. Eğilme çatlakları ile burulma çatlakları birlikte oluşmuştur. %1.5 yatay ötelenme oranına kadar kolon boyunca çatlaklar oluşurken, bu değerden sonra oluşan çatlaklar elemanın mesnet bölgesinde yoğunlaşmış ve daha az çatlak oluşurken mevcut çatlakların genişlikleri artmıştır. Kabuk beton daha çok elemanın köşe noktalarında dökülmüştür.

T1-N10-S8 elemanının davranışını belirlemek için yapılan deneye ait sayısal veriler işlenerek çeşitli grafikler çizilmiştir. Elemana ait Yatay Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir. Bu grafik çizilirken kiriş uçlarına verilen iki yatay yükün toplamı ile elemanın üst orta noktasının yatayda yaptığı deplasman değerleri kullanılmıştır.

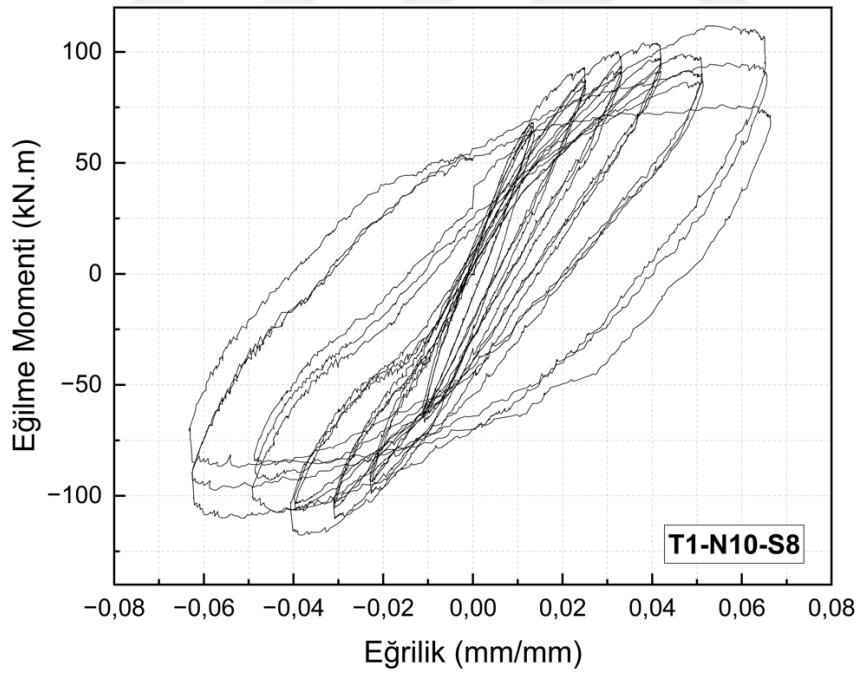


Şekil 4.6. T1-N10-S8 elemanına ait yatay yük-deplasman grafiği

Deney tersinir-tekrarlanır ve 3 çevrim olacak şekilde yapıldığı için, davranışın daha iyi anlaşılabilmesi için Zarf Eğrisi Grafiği çizilmiştir (Şekil 4.7). Bu grafik çizilirken Yatay Yük-Deplasman grafiğindeki ilk çevrimlerin son noktadaki değerleri dikkate alınmıştır. İtme yönünde akma noktası olarak 14 mm deplasman değeri kabul edilirken, nihai ötelenme oranı olarak 36 mm deplasman değeri kabul edilmiştir. Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=36/14=2.6$ olarak tespit edilmiştir. Çekme yönünde akma noktası olarak 15 mm deplasman değeri kabul edilirken, nihai ötelenme oranı olarak 36 mm deplasman değeri kabul edilmiştir. Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=36/15=2.4$ olarak tespit edilmiştir. Elemana ait Eğilme Momenti-Eğrilik Grafiği ise Şekil 4.8'de verilmiştir.

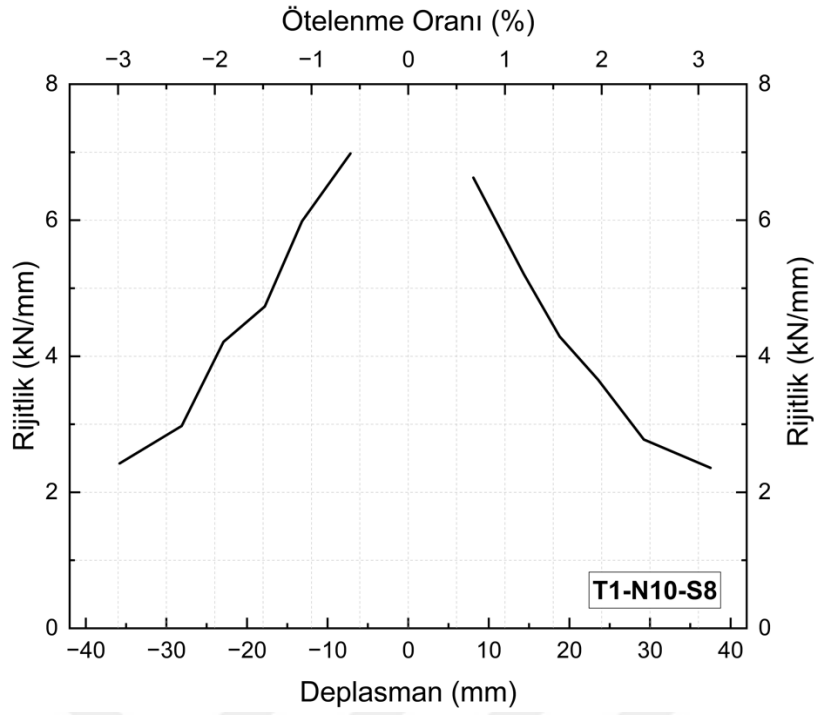


Şekil 4.7. T1-N10-S8 elemanına ait zarf eğrisi grafiği



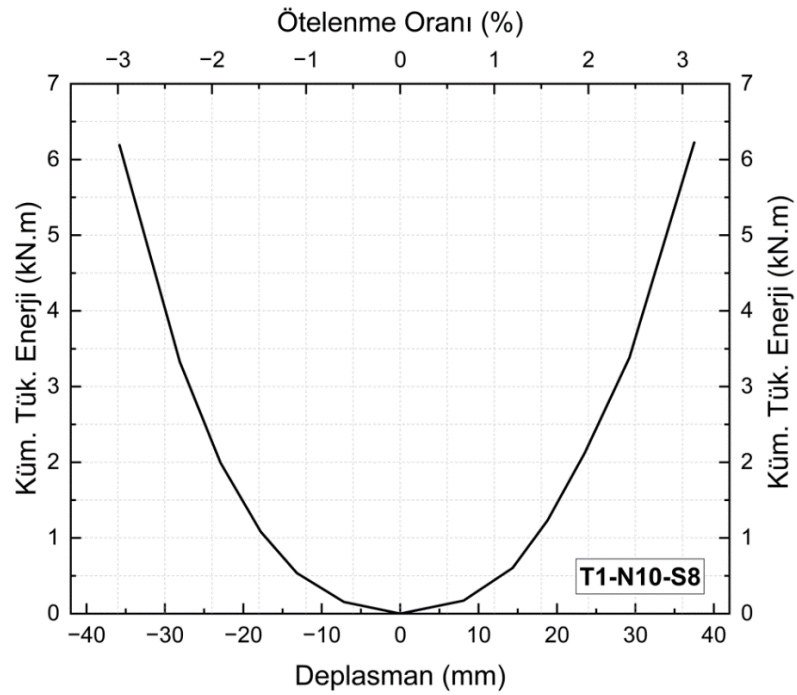
Şekil 4.8. T1-N10-S8 elemanına ait eğilme momenti-eğrilik grafiği

Deneyssel çalışma boyunca ilk çevrimlerde elemana uygulanan her bir toplam yatay yük ile elemenda meydana gelen deplasman değerleri oranlanarak rijitlik değerleri bulunmuştur. Zarf Eğrisi değerleri kullanılarak oluşturulan Rijitlik-Yatay Ötelenme Oranı Grafiği Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. T1-N10-S8 elemanına ait rijitlik grafiği

Elemana ait yük-deplasman grafiğinin altında kalan alanlar, her bir yatay ötelenme oranı için hesaplanmış ve tüketilen enerji değerleri bulunmuştur. Bu tüketilen enerji değerleri her bir yatay ötelenme oranında bir önceki yatay ötelenme oranındakilerle toplanarak kümülatif tüketilen enerji grafiği çizilmiştir (Şekil 4.10).

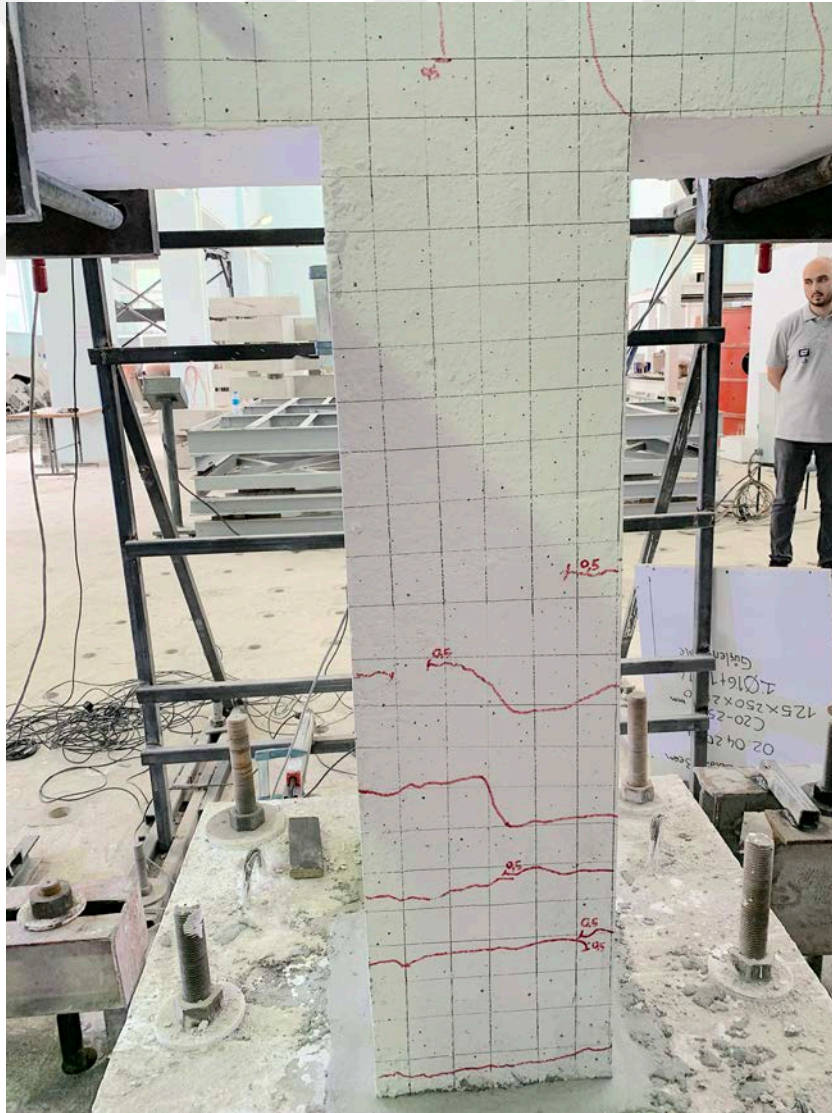


Şekil 4.10. T1-N10-S8 elemanına ait kümülatif tüketilen enerji grafiği

Çizelge 4.2. $\theta / \Delta = 1$ oranı için kiriş uçlarına uygulanan ötelenme miktarları

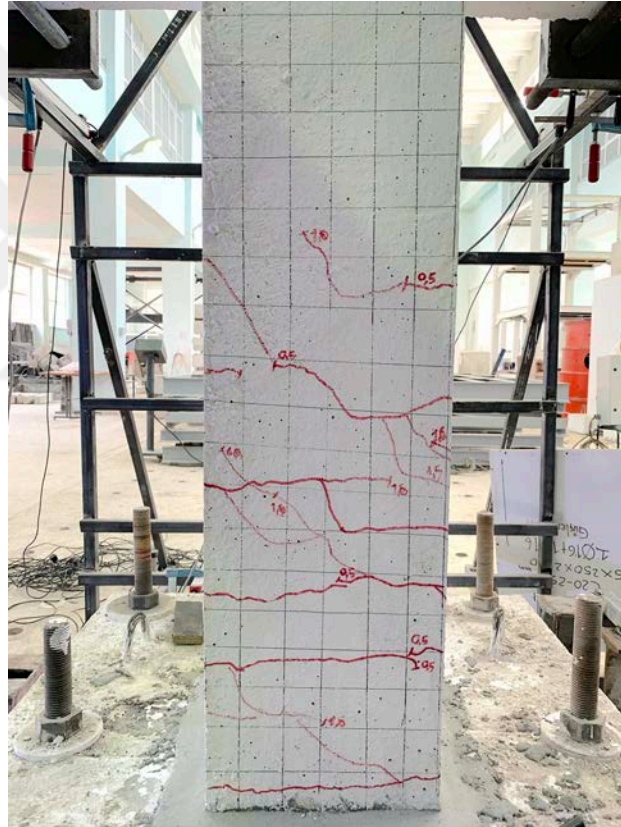
Ötelenme Oranı (%)	Kiriş Sağ Ucu (x) (mm)	Kiriş Sol Ucu (y) (mm)	(x+y)/2 (mm)
0.5	9	3	6
1.0	18	6	12
1.5	27	9	18
2.0	36	12	24
2.5	45	15	30
3.0	54	18	36

Deney elemanında ilk çatlaklar %0.5 ötelenme oranının ilk çevriminde meydana gelmiştir. İlk çatlak genişlikleri 0.3 mm genişliğinde olup, kolon alt bölgesinde eğilme çatlakları şeklinde oluşmuştur (Şekil 4.12).



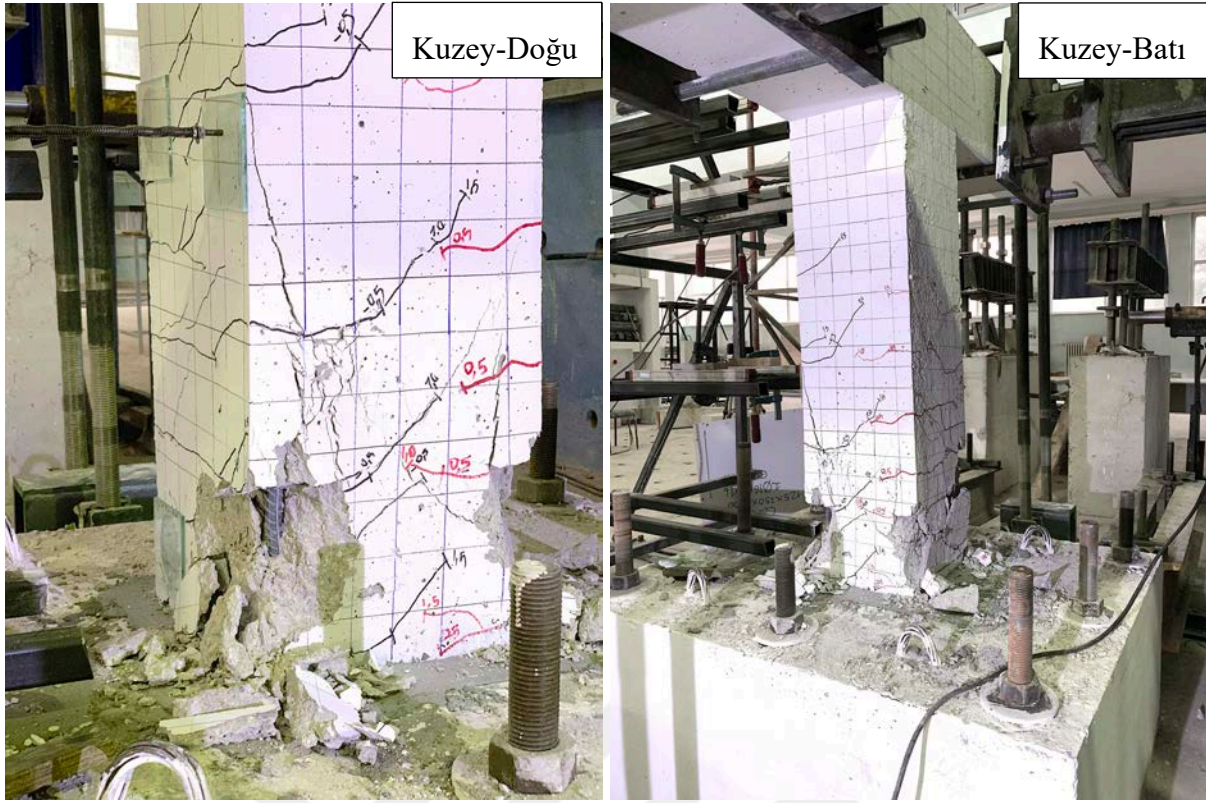
Şekil 4.12. T1-N20-S8 deney elemanında meydana gelen ilk çatlaklar

Elemanda %0.5 yatay ötelenme oranından sonra belirli bir akma gözlemlenmiştir. İtme yönünde %1.0 yatay ötelenme oranına kadar yatay yük artmış ve en büyük değerine ulaşmıştır. Çekme yönünde ise %2.0 yatay ötelenme oranına kadar yük artmış ve daha sonra azalmıştır. Elemanın itme yönündeki yatay yük taşıma kapasitesi 89.95 kN iken, çekme yönündeki yatay yük taşıma kapasitesi ise -101.85 kN'dur. %1.0 yatay ötelenme oranından sonra yük %2.5 yatay ötelenme oranına kadar sabitken, %3.0 yatay ötelenme oranından sonra yaklaşık %19 düşmüştür. Bu durum hem itme hem de çekme yönünde benzer özellik göstermiştir. %2.0 yatay ötelenme oranında, elemanda meydana gelen en büyük çatlak genişliği 3.5 mm eğilme, 0.8 mm kesme çatlağı olarak ölçülmüştür. Elemana ait %2.0 yatay ötelenme oranındaki görüntüsü Şekil 4.13'te verilmiştir.

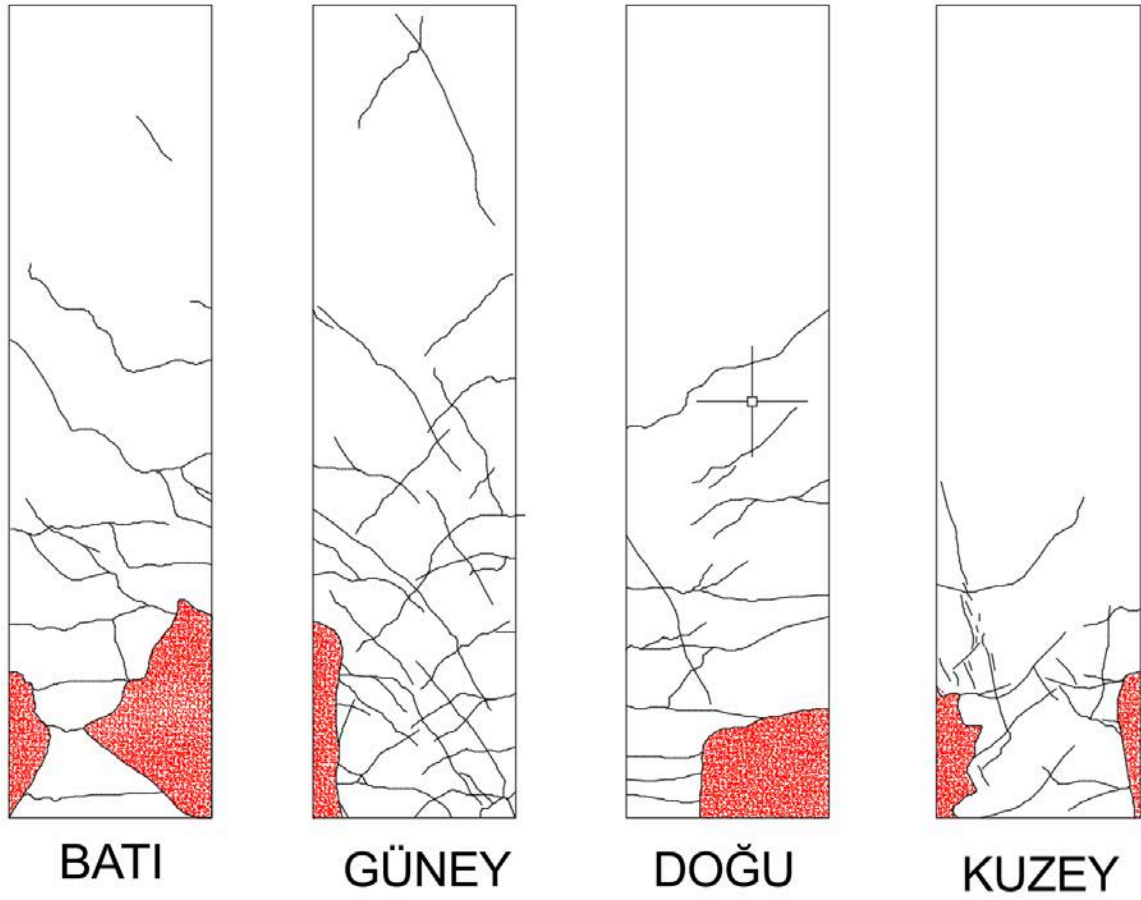


Şekil 4.13. T1-N20-S8 elemanında %2.0’de meydana gelen çatlaklar

Deneye, eleman %3.0 yatay ötelenme oranına ulaşana kadar devam edilmiştir. Bu noktada toplam yatay yük itme yönünde 73.18 kN, çekme yönünde -71.64 kN değerine ulaşmıştır. %2.5 yatay ötelenme oranında kabuk beton dökülmeye başlamıştır. Deney sonunda elamanda meydana gelen plastik mafsallık uzunluğu 350 mm olarak ölçülmüştür. Boyuna donatılarda burkulma gözlemlenmiştir. Elemana ait deney sonu görüntüsü Şekil 4.14’te, çatlak görüntüsü ise Şekil 4.15’te verilmiştir.



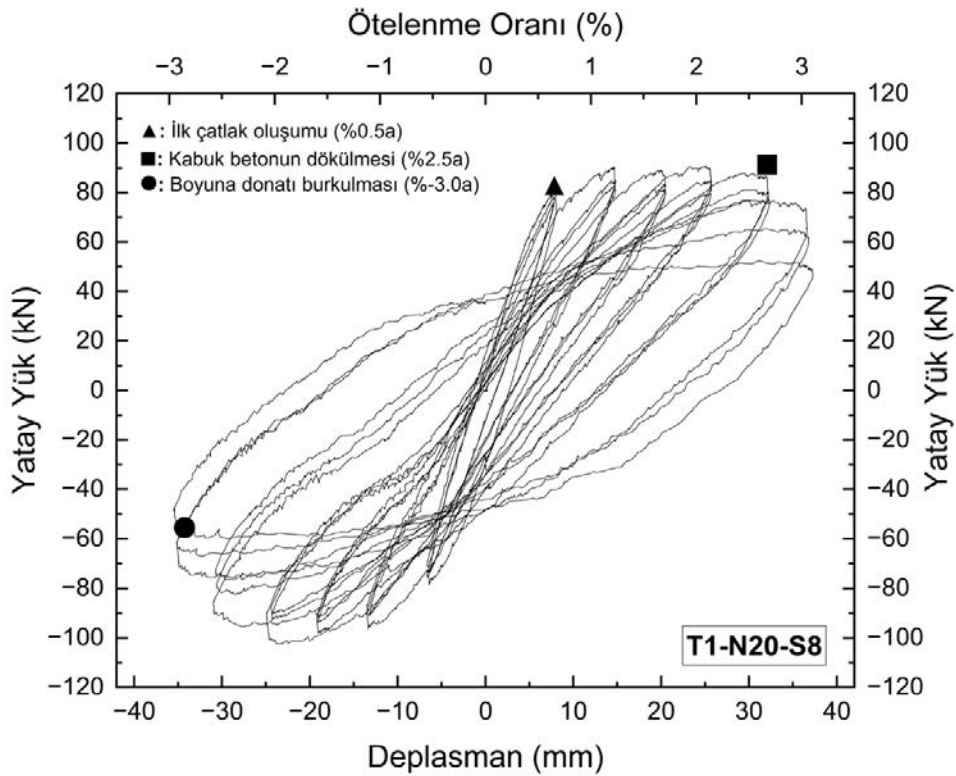
Şekil 4.12. T1-20-S8 elemanın deney sonu görüntüsü



Şekil 4.15. T1-N20-S8 elemanında oluşan çatlaklar

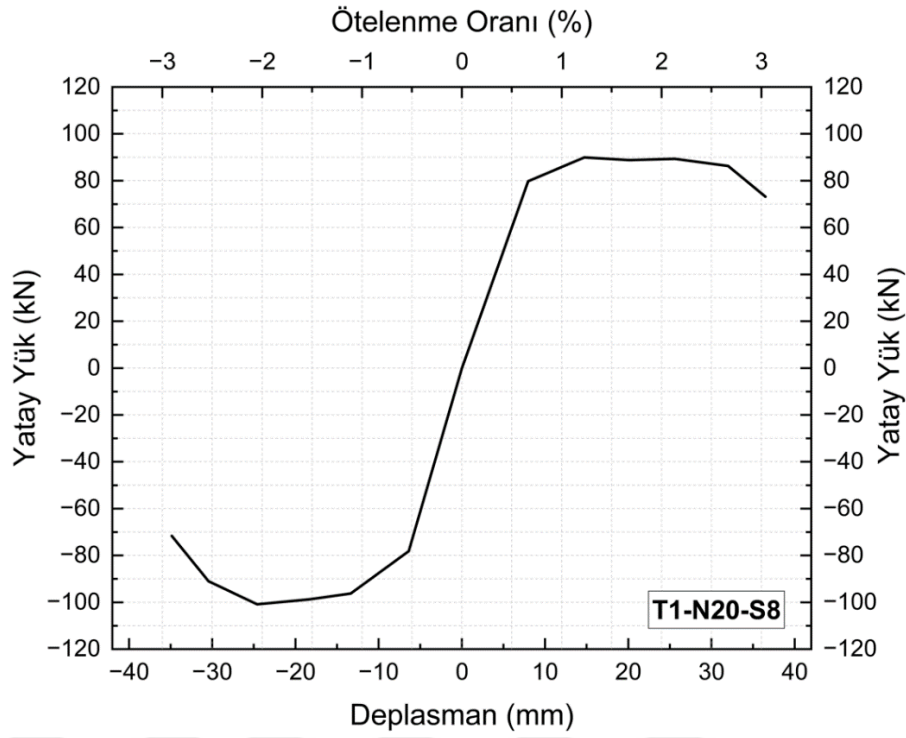
T1-N20-S8 elemanı deney sonuna kadar yük taşımaya devam etmiştir. Eğilme çatlakları ile burulma çatlakları birlikte oluşmuştur. %1.5 yatay ötelenme oranına kadar oluşan çatlaklar elemanın orta alt uzunluğu boyunca oluşurken bu değerden sonra mesnet bölgesindeki mevcut çatlakların genişlikleri artmıştır. Kabuk beton daha çok elemanın köşe noktalarında dökülmüştür.

T1-N20-S8 elemanının davranışını belirlemek için yapılan deneye ait sayısal veriler işlenerek çeşitli grafikler çizilmiştir. Elemana ait Yatay Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.16'da verilmiştir. Bu grafik çizilirken kiriş uçlarına verilen iki yatay yükün toplamı ile elemanın üst orta noktasının yatayda yaptığı deplasman değerleri kullanılmıştır.

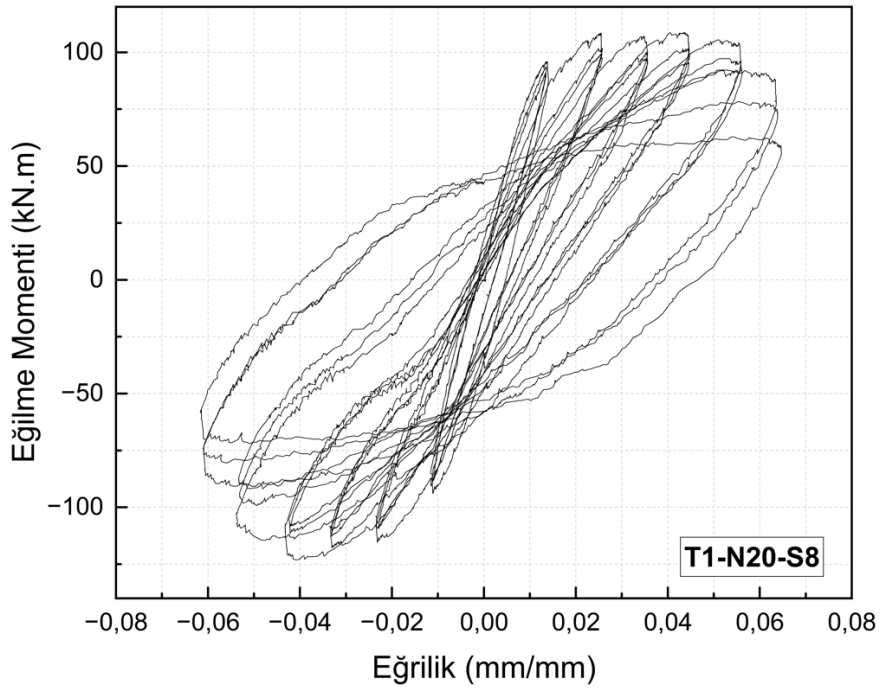


Şekil 4.16. T1-N20-S8 elemanına ait yatay yük-deplasman grafiği

Deney tersinir-tekrarlanır ve 3 çevrim olacak şekilde yapıldığı için, davranışın daha iyi anlaşılabilmesi için Zarf Eğrisi Grafiği çizilmiştir (Şekil 4.17). Bu grafik çizilirken Yatay Yük-Deplasman grafiğindeki ilk çevrimlerin son noktadaki değerleri dikkate alınmıştır. İtme yönünde akma noktası olarak 9 mm deplasman değeri kabul edilirken, nihai ötelenme oranı olarak 36 mm deplasman değeri kabul edilmiştir. Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=36/9=4.0$ olarak tespit edilmiştir. Çekme yönünde akma noktası olarak 8 mm deplasman değeri kabul edilirken, nihai ötelenme oranı olarak 36 mm deplasman değeri kabul edilmiştir. Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=36/8=4.5$ olarak tespit edilmiştir. Elemana ait Eğilme Momenti-Eğrilik Grafiği ise Şekil 4.18'de verilmiştir.

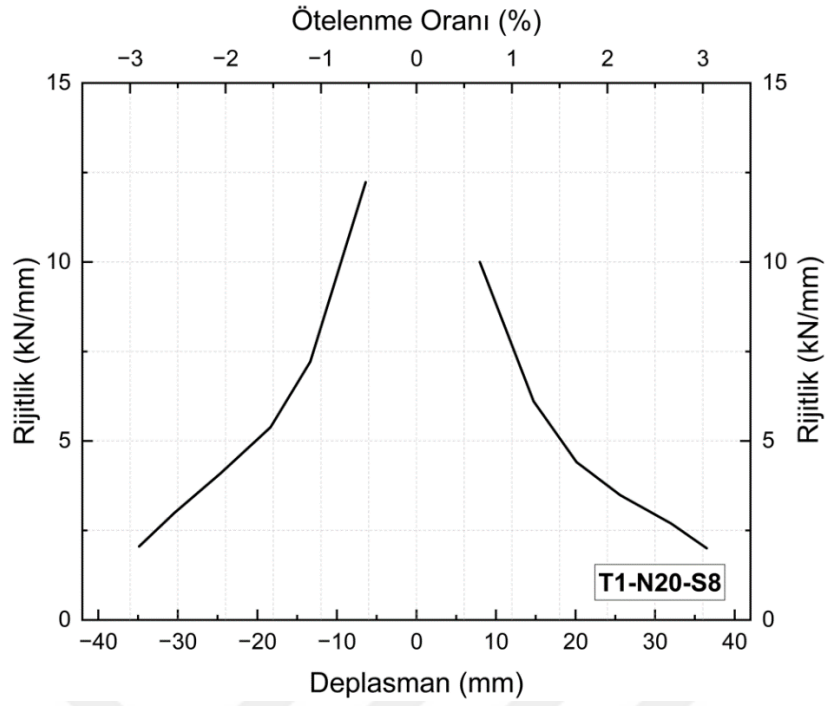


Şekil 4.17. T1-N20-S8 elemanına ait zarf eğrisi grafiği



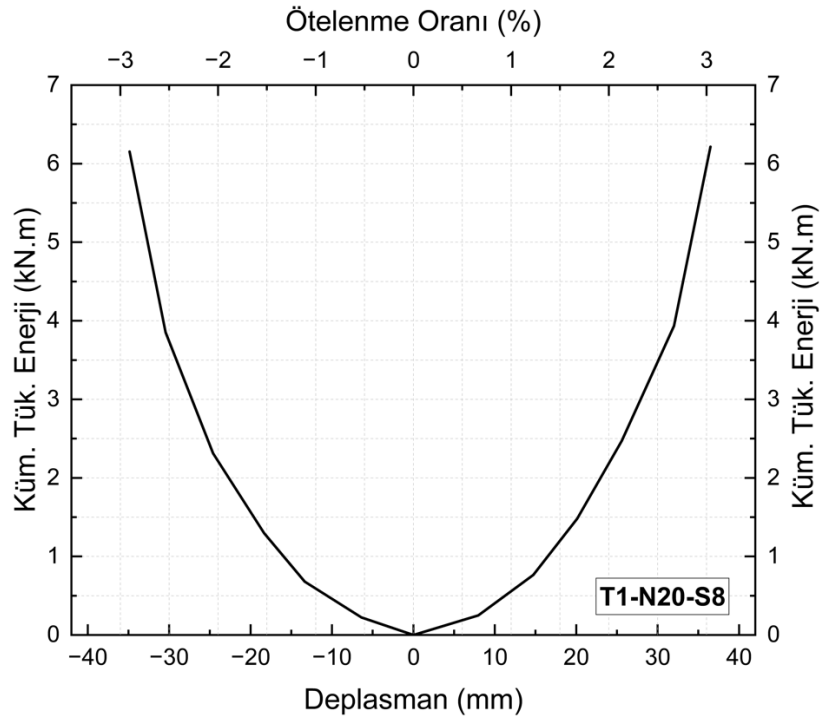
Şekil 4.18. T1-N20-S8 elemanına ait eğilme momenti-eğrilik grafiği

DeneySEL çalışma boyunca ilk çevrimlerde elemana uygulanan her bir toplam yatay yük ile elemanda meydana gelen deplasman değerleri oranlanarak rijitlik değerleri bulunmuştur. Zarf Eğrisi değerleri kullanılarak oluşturulan Rijitlik-Yatay Ötelenme Oranı Grafiği Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19. T1-N20-S8 elemanına ait rijitlik grafiği

Elemana ait yük-deplasman grafiğinin altında kalan alanlar, her bir yatay ötelenme oranı için hesaplanmış ve tüketilen enerji değerleri bulunmuştur. Bu tüketilen enerji değerleri her bir yatay ötelenme oranında bir önceki yatay ötelenme oranındakilerle toplanarak kümülatif tüketilen enerji grafiği çizilmiştir (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. T1-N20-S8 elemanına ait kümülatif tüketilen enerji grafiği

4.1.3. T1-N30-S8

Bu deney elemanı, eksenel dönme/yatay ötelenme oranı $\theta/\Delta=1$, eksenel yük oranı %30 ve enine donatı aralığı 80 mm'dir. Elemanın deney düzeneğindeki görüntüsü Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21. T1-N30-S8 deney elemanının düzenekteki görüntüsü

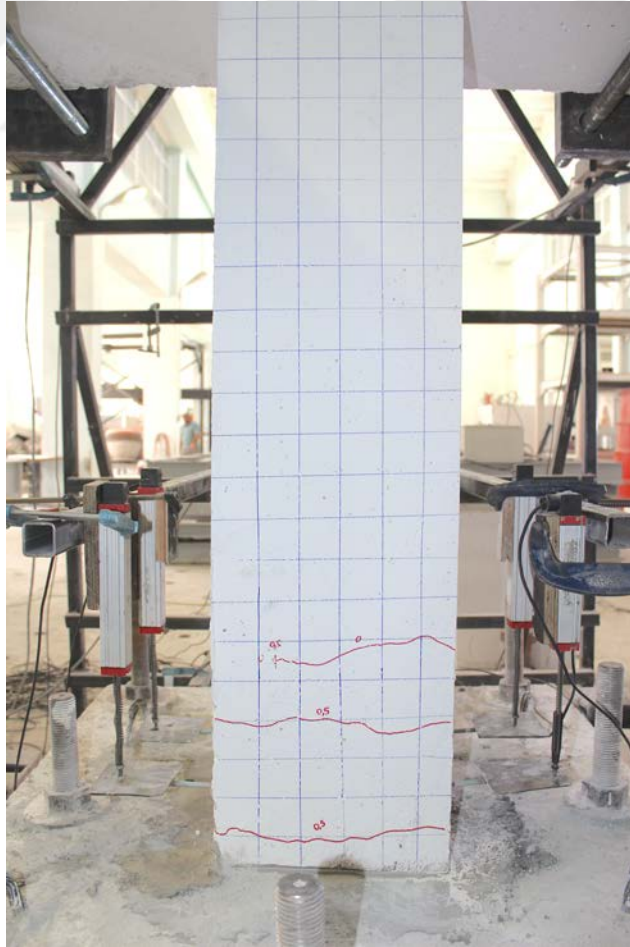
Elemana ilk olarak %30 eksenel yük oranına karşılık gelen 675 kN eksenel yük verilmiş ve bu değer deney sonuna kadar ± 20 kN sapma olacak şekilde sabitlenmiştir. Daha sonra elemanın üstündeki kiriş uçlarına Çizelge 4.3'teki gibi ötelenmeler uygulanmıştır. Her bir ötelenme oranı

için tersinir-tekrarlanır şekilde 3 çevrim yapılmıştır. Elemanın eğilme kapasitesinde yaklaşık %20 düşüş olana kadar deneye devam edilmiştir.

Çizelge 4.3. $\theta / \Delta = 1$ oranı için kiriş uçlarına uygulanan ötelenme miktarları

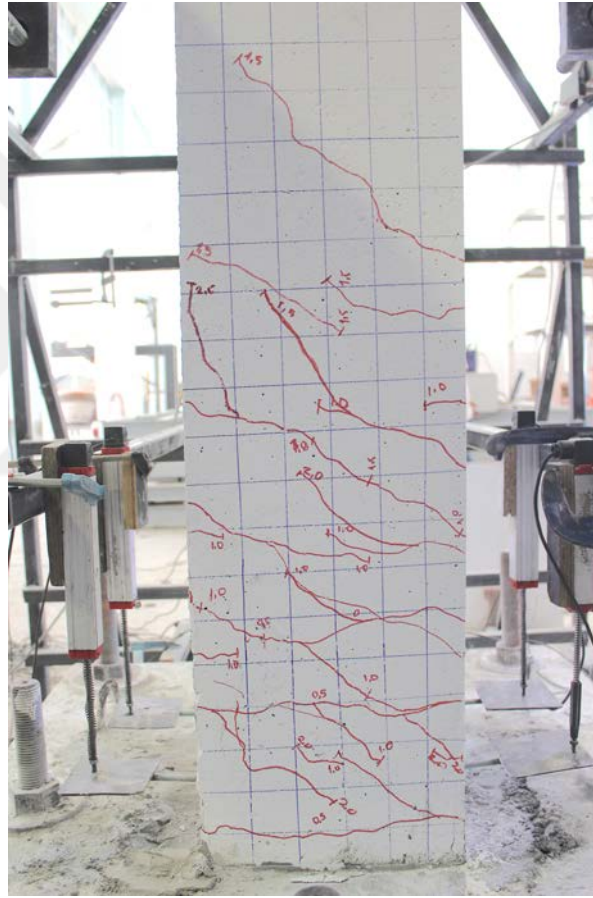
Ötelenme Oranı (%)	Kiriş Sağ Ucu (x) (mm)	Kiriş Sol Ucu (y) (mm)	(x+y)/2 (mm)
0.5	9	3	6
1.0	18	6	12
1.5	27	9	18
2.0	36	12	24
2.5	45	15	30
3.0	54	18	36

Deney elemanında ilk çatlaklar %0.5 ötelenme oranının ilk çevriminde meydana gelmiştir. İlk çatlak genişlikleri 0.2 mm genişliğinde olup, kolon boyunca eğilme ve burulma çatlakları şeklinde oluşmuştur (Şekil 4.22).



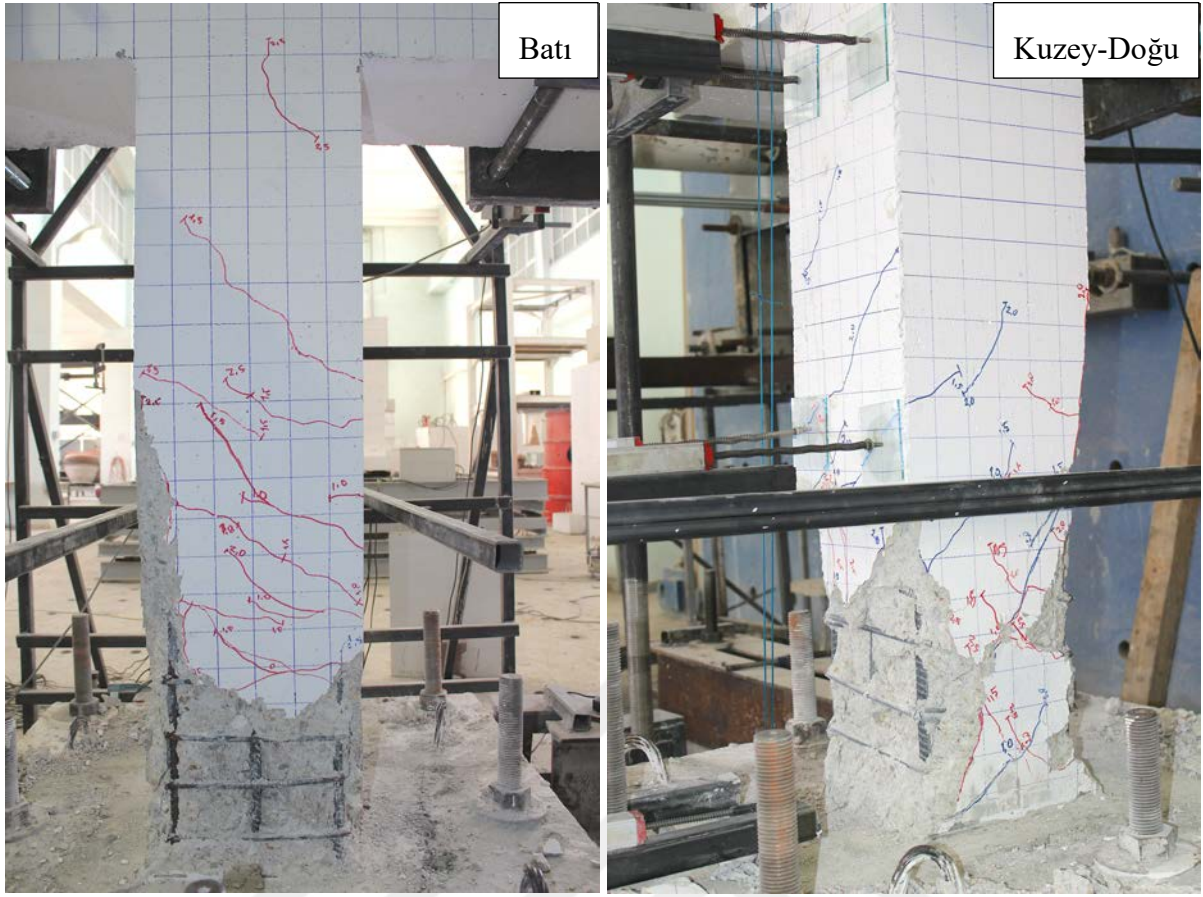
Şekil 4.22. T1-N30-S8 deney elemanında meydana gelen ilk çatlaklar

Elemanda belirli bir akma noktası gözlemlenmemiştir. İtme ve çekme yönünde %1.5 yatay ötelenme oranına kadar yatay yük artmış ve en büyük değerine ulaşmıştır. Elemanın itme yönündeki yatay yük taşıma kapasitesi 75.05 kN iken, çekme yönündeki yatay yük taşıma kapasitesi ise -87.98 kN'dur. Yatay yük, itme yönünde %1.5 yatay ötelenme oranından %3.0 yatay ötelenme oranına kadar yaklaşık %25 düşerken, çekme yönünde yaklaşık %38 düşmüştür. %2.0 yatay ötelenme oranında, elemanda meydana gelen en büyük çatlak genişliği 1.4 mm eğilme, 0.6 mm kesme çatlağı olarak ölçülmüştür. Elemana ait %2.0 yatay ötelenme oranındaki görüntüsü Şekil 4.23'te verilmiştir.

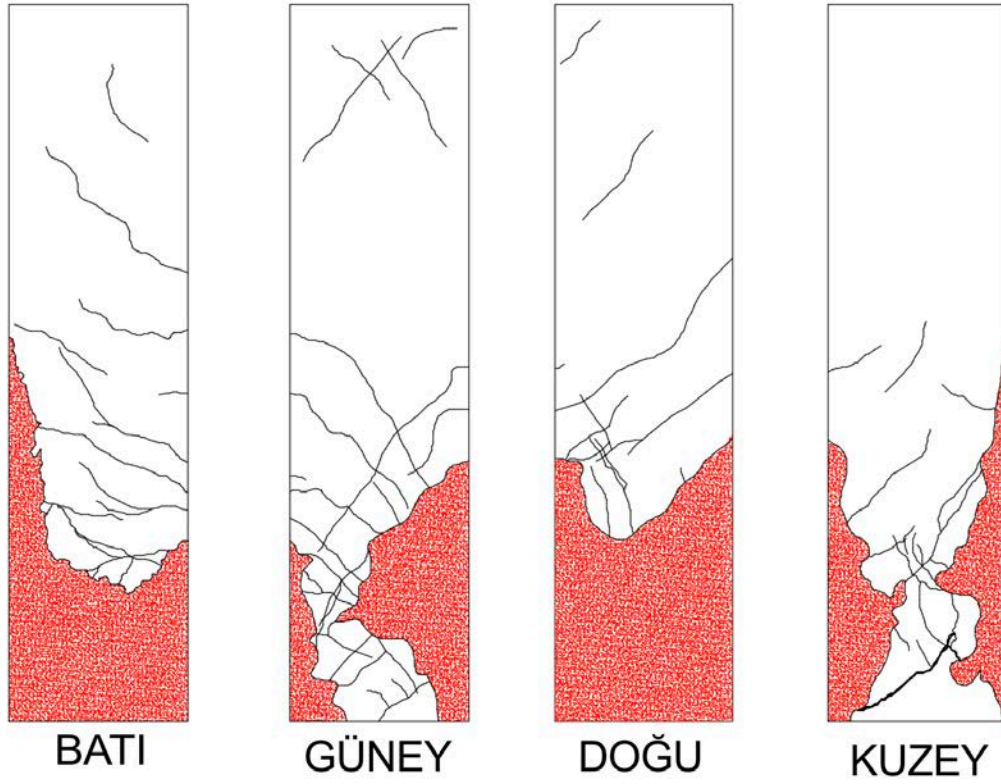


Şekil 4.23. T1-N30-S8 elemanında %2.0'de meydana gelen çatlaklar

Deneye, eleman %3.0 yatay ötelenme oranına ulaşana kadar devam edilmiştir. Bu noktada toplam yatay yük itme yönünde 56.23 kN, çekme yönünde -55.05 kN değerine ulaşmıştır. %2.5 yatay ötelenme oranında kabuk beton dökülmeye başlamıştır. Deney sonunda elemanda meydana gelen plastik mafsallık uzunluğu 400 mm olarak ölçülmüştür. Boyuna donatılarda burkulma gözlemlenmiştir. Elemana ait deney sonu görüntüsü Şekil 4.24'te, çatlak görüntüsü ise Şekil 4.25'te verilmiştir.



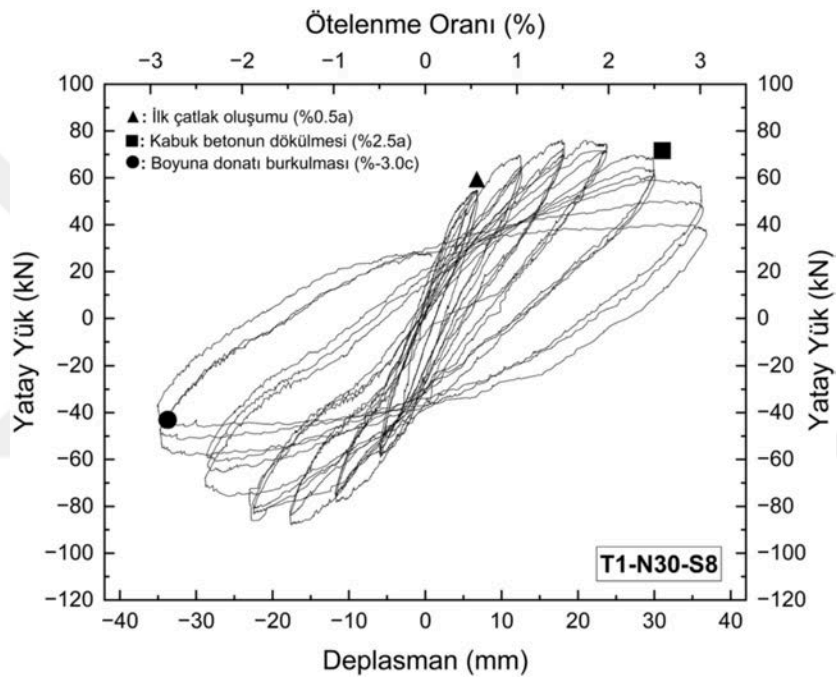
Şekil 4.24. T1-30-S8 elemanın deney sonu görüntüsü



Şekil 4.25. T1-N30-S8 elemanında oluşan çatlaklar

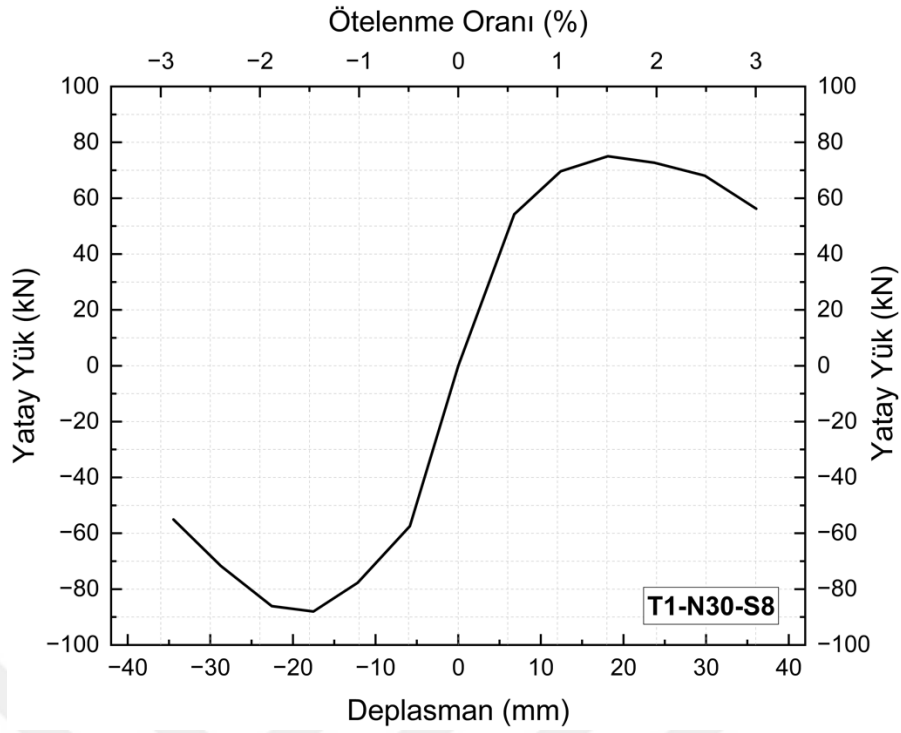
T1-N30-S8 elemanı deney sonuna kadar yük taşımaya devam etmiştir. Eğilme çatlakları ile burulma çatlakları birlikte oluşmuştur. %1.5 yatay ötelenme oranına kadar oluşan çatlaklar elemanın orta alt uzunluğu boyunca oluşurken bu değerden sonra eleman üzerinde az sayıda çatlak oluşmuş, mesnet bölgesindeki mevcut çatlakların genişlikleri artmıştır. Kabuk beton elemanın tüm yüzeyinde dökülmüştür.

T1-N30-S8 elemanının davranışını belirlemek için yapılan deneye ait sayısal veriler işlenerek çeşitli grafikler çizilmiştir. Elemana ait Yatay Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.26'da verilmiştir. Bu grafik çizilirken kiriş uçlarına verilen iki yatay yükün toplamı ile elemanın üst orta noktasının yatayda yaptığı deplasman değerleri kullanılmıştır.

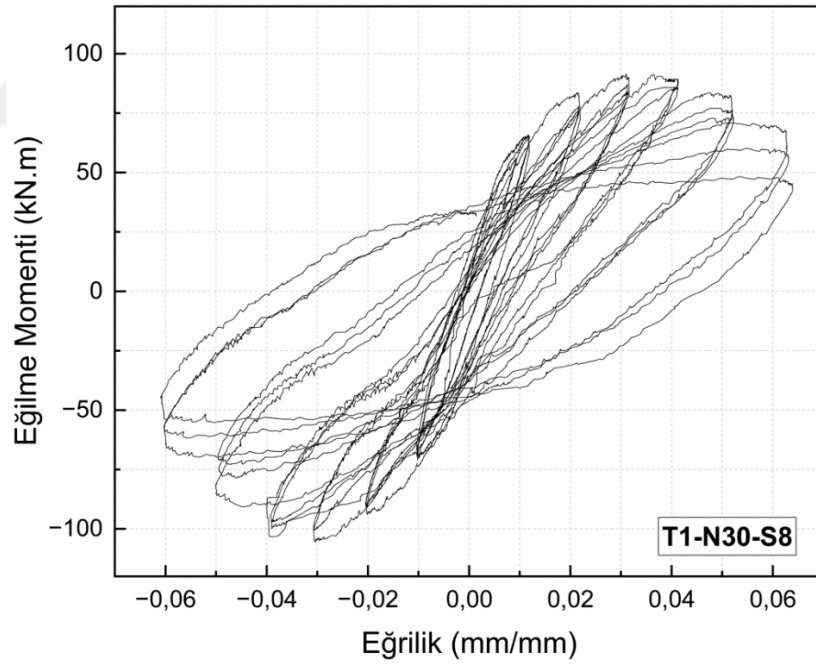


Şekil 4.26. T1-N30-S8 elemanına ait yatay yük-deplasman grafiği

Deney tersinir-tekrarlanır ve 3 çevrim olacak şekilde yapıldığı için, davranışın daha iyi anlaşılabilmesi için Zarf Eğrisi Grafiği çizilmiştir (Şekil 4.27). Bu grafik çizilirken Yatay Yük-Deplasman grafiğindeki ilk çevrimlerin son noktadaki değerleri dikkate alınmıştır. İtme yönünde akma noktası olarak 9.5 mm deplasman değeri kabul edilirken, %20 kapasite kaybına denk gelen deplasman değeri olarak 35 mm kabul edilmiştir. Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=35/9.5=3.7$ olarak tespit edilmiştir. Çekme yönünde akma noktası olarak 9 mm deplasman değeri kabul edilirken, %20 kapasite kaybına denk gelen deplasman değeri olarak 30 mm kabul edilmiştir. Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=30/9=3.3$ olarak tespit edilmiştir. Elemana ait Eğilme Momenti-Eğrilik Grafiği ise Şekil 4.28'de verilmiştir.

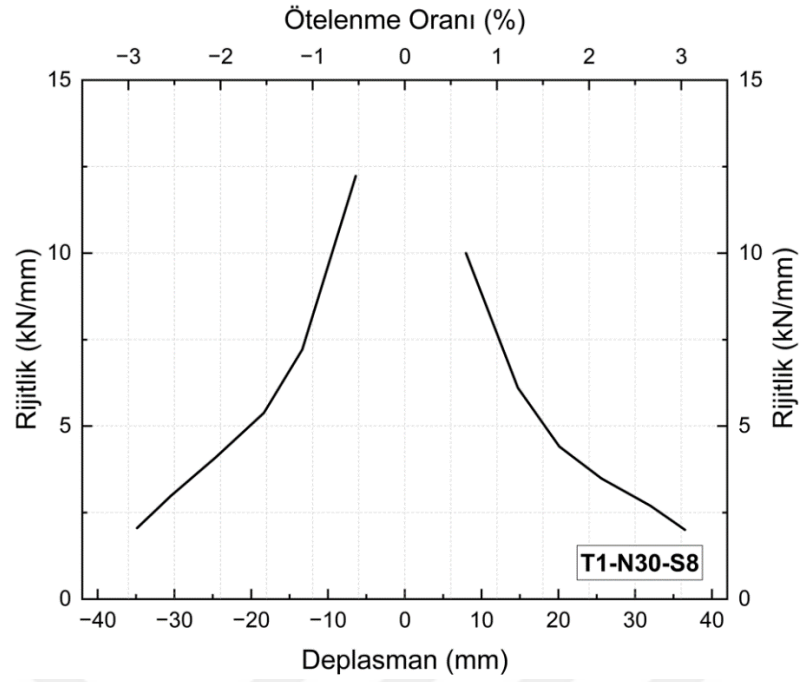


Şekil 4.27. T1-N30-S8 elemanına ait zarf eğrisi grafiği



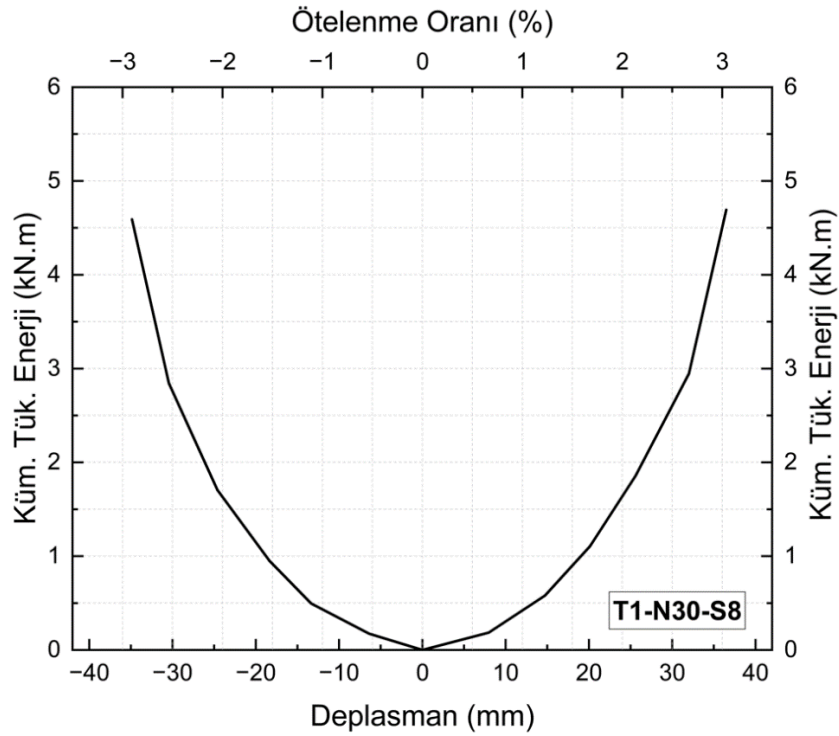
Şekil 4.28. T1-N30-S8 elemanına ait eğilme momenti-eğrilik grafiği

Deneyssel çalışma boyunca ilk çevrimlerde elemana uygulanan her bir toplam yatay yük ile elemenda meydana gelen deplasman değerleri oranlanarak rijitlik değerleri bulunmuştur. Zarf Eğrisi değerleri kullanılarak oluşturulan Rijitlik-Yatay Ötelenme Oranı Grafiği Şekil 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.29. T1-N30-S8 elemanına ait rijitlik grafiği

Elemana ait yük-deplasman grafiğinin altında kalan alanlar, her bir yatay ötelenme oranı için hesaplanmış ve tüketilen enerji değerleri bulunmuştur. Bu tüketilen enerji değerleri her bir yatay ötelenme oranında bir önceki yatay ötelenme oranındakilerle toplanarak kümülatif tüketilen enerji grafiği çizilmiştir (Şekil 4.30).



Şekil 4.30. T1-N30-S8 elemanına ait kümülatif tüketilen enerji grafiği

4.1.4. T1-N40-S8

Bu deney elemanı, eksenel dönme/yatay ötelenme oranı $\theta/\Delta=1$, eksenel yük oranı %40 ve enine donatı aralığı 80 mm'dir. Elemanın deney düzeneğindeki görüntüsü Şekil 4.31'de verilmiştir.



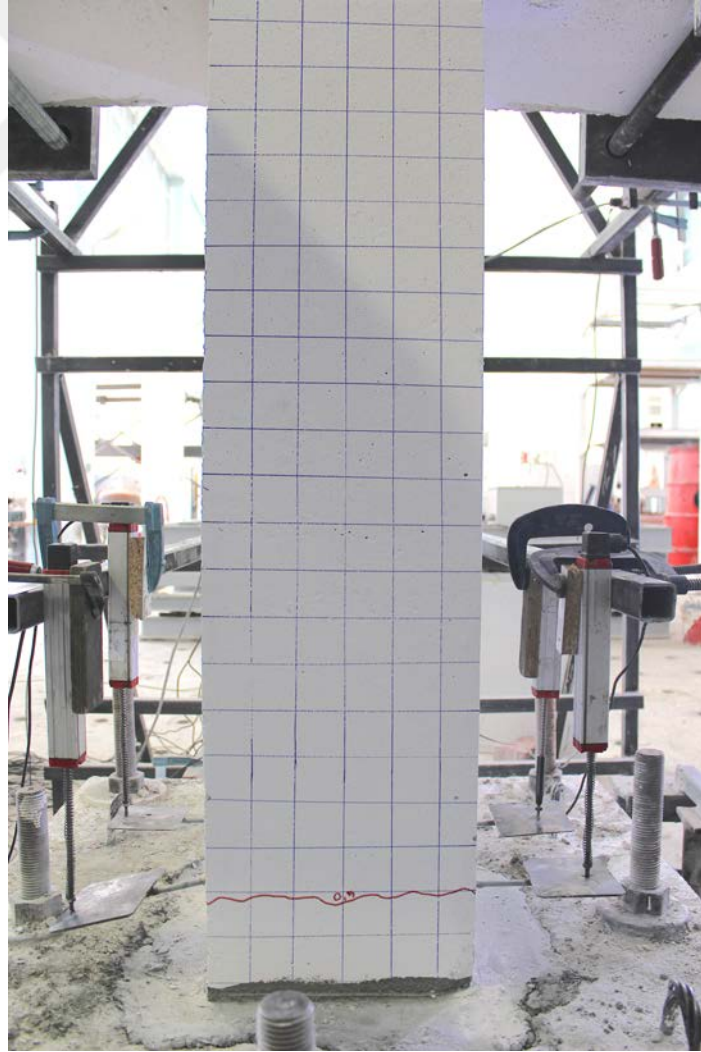
Şekil 4.31. T1-N40-S8 deney elemanının düzenekteki görüntüsü

Elemana ilk olarak %40 eksenel yük oranına karşılık gelen 900 kN eksenel yük verilmiş ve bu değer deney sonuna kadar ± 20 kN sapma olacak şekilde sabitlenmiştir. Daha sonra elemanın üstündeki kiriş uçlarına Çizelge 4.4'teki gibi ötelenmeler uygulanmıştır. Her bir ötelenme oranı için tersinir-tekrarlanır şekilde 3 çevrim yapılmıştır. Elemanın eğilme kapasitesinde yaklaşık %20 düşüş olana kadar deneye devam edilmiştir.

Çizelge 4.4. $\theta / \Delta = 1$ oranı için kiriş uçlarına uygulanan ötelenme miktarları

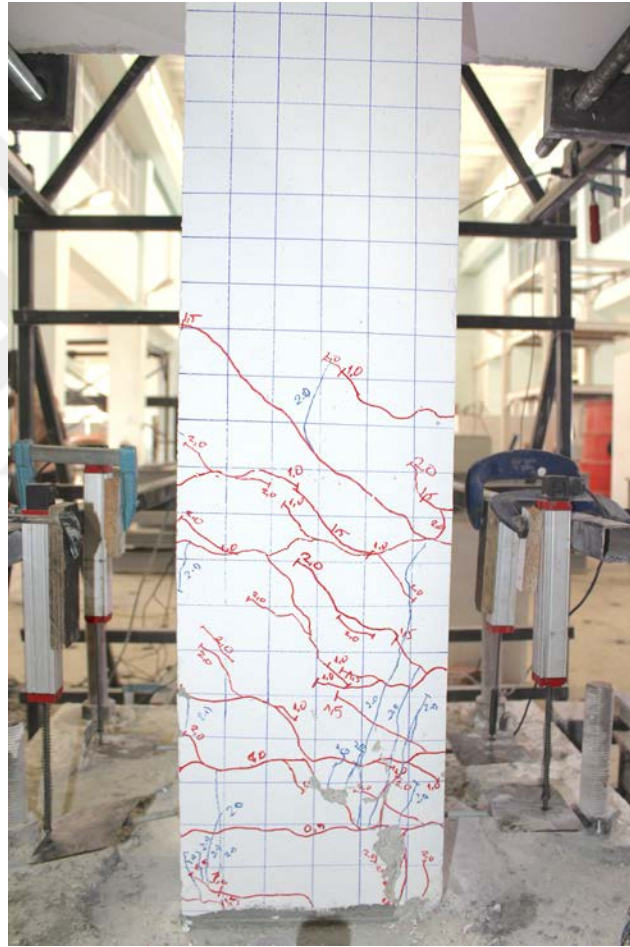
Ötelenme Oranı (%)	Kiriş Sağ Ucu (x) (mm)	Kiriş Sol Ucu (y) (mm)	(x+y)/2 (mm)
0.5	9	3	6
1.0	18	6	12
1.5	27	9	18
2.0	36	12	24
2.5	45	15	30
3.0	54	18	36

Deney elemanında ilk çatlak %0.5 ötelenme oranının ilk çevriminde meydana gelmiştir. İlk çatlak genişlikleri 0.1 mm genişliğinde olup, kolon alt ucunda eğilme çatlağı şeklinde oluşmuştur (Şekil 4.32).



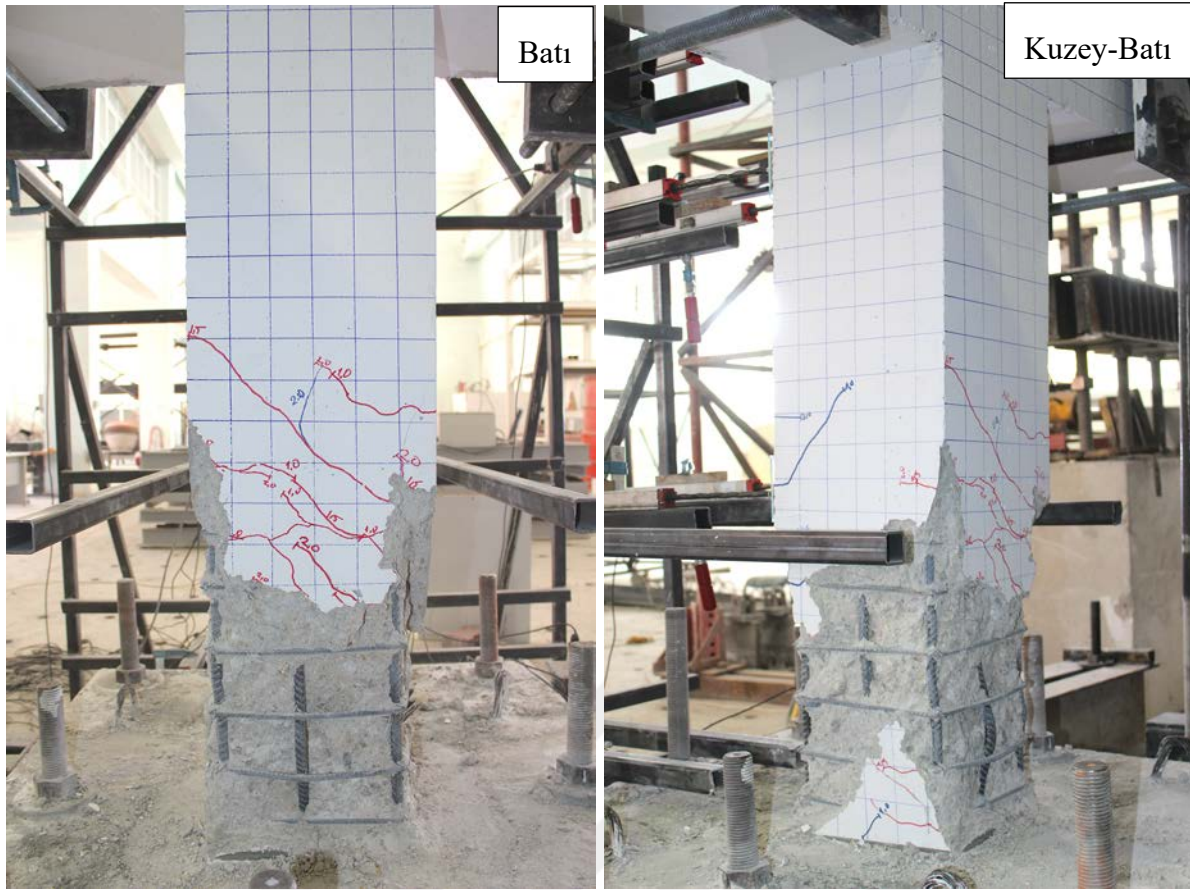
Şekil 4.32. T1-N40-S8 deney elemanında meydana gelen ilk çatlak

Elemanda yönünde belirli bir akma noktası gözlemlenmemiştir. İtme yönünde %1.5, çekme yönünde %2.0 yatay ötelenme oranına kadar yatay yük artmış ve en büyük değerine ulaşmıştır. Elemanın itme yönündeki yatay yük taşıma kapasitesi 81.58 kN iken, çekme yönündeki yatay yük taşıma kapasitesi ise -90.53 kN'dur. Yatay yük, itme yönünde %1.5 yatay ötelenme oranından %3.0 yatay ötelenme oranına kadar yaklaşık %25 düşerken, çekme yönünde yaklaşık %34 düşmüştür. %2.0 yatay ötelenme oranında, elemanda meydana gelen en büyük çatlak genişliği 1.5 mm eğilme, 0.8 mm kesme çatlağı olarak ölçülmüştür. Elemana ait %2.0 yatay ötelenme oranındaki görüntüsü Şekil 4.33'te verilmiştir.

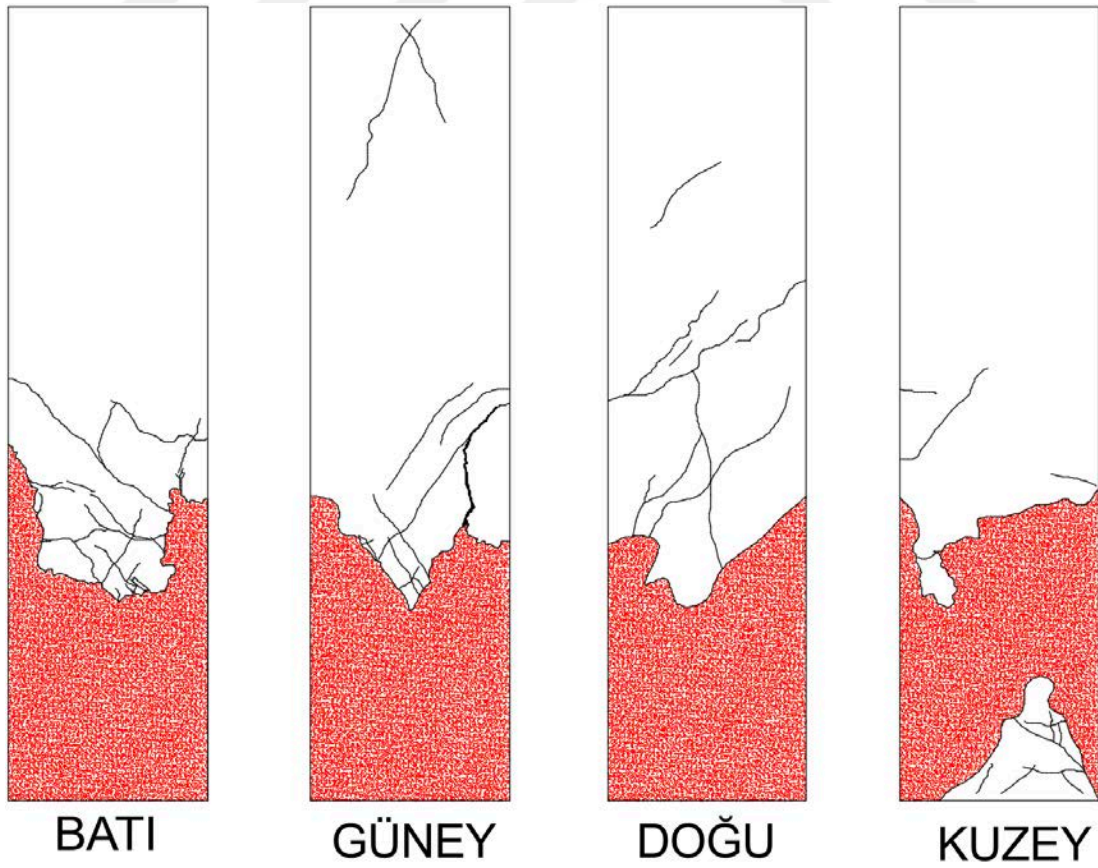


Şekil 4.33. T1-N40-S8 elemanında %2.0'de meydana gelen çatlaklar

Deneye, eleman %3.0 yatay ötelenme oranına ulaşana kadar devam edilmiştir. Bu noktada toplam yatay yük itme yönünde 56.23 kN, çekme yönünde -55.05 kN değerine ulaşmıştır. %2.5 yatay ötelenme oranında kabuk beton dökülmeye başlamıştır. Deney sonunda elemanda meydana gelen plastik mafsallık uzunluğu 550 mm olarak ölçülmüştür. Boyuna donatılarda burkulma gözlemlenmiştir. Elemana ait deney sonu görüntüsü Şekil 4.34'te, çatlak görüntüsü ise Şekil 4.35'te verilmiştir.



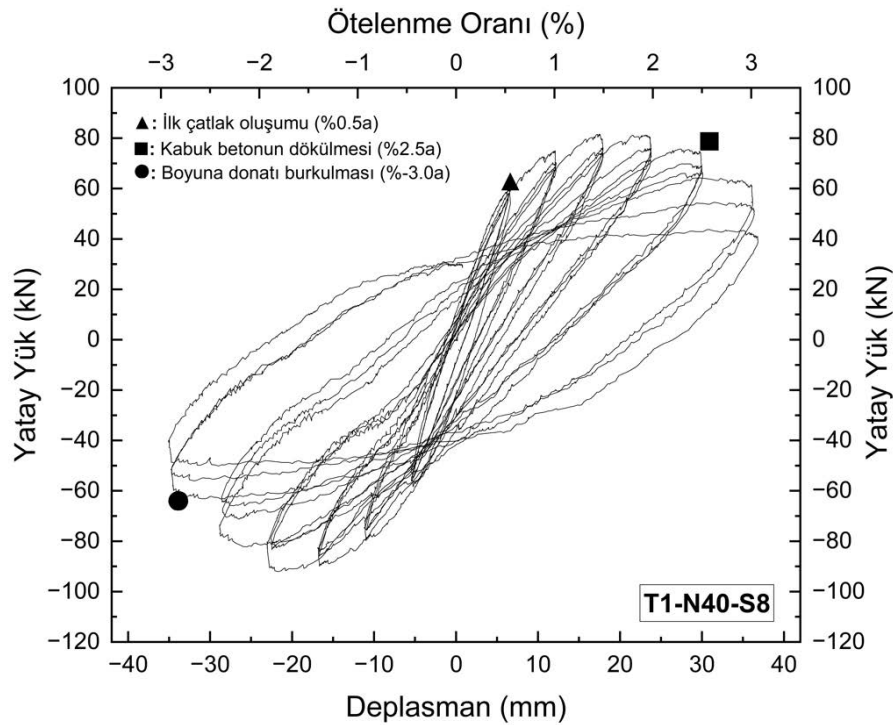
Şekil 4.34. T1-40-S8 elemanın deney sonu görüntüsü



Şekil 4.35. T1-N40-S8 elemanında oluşan çatlaklar

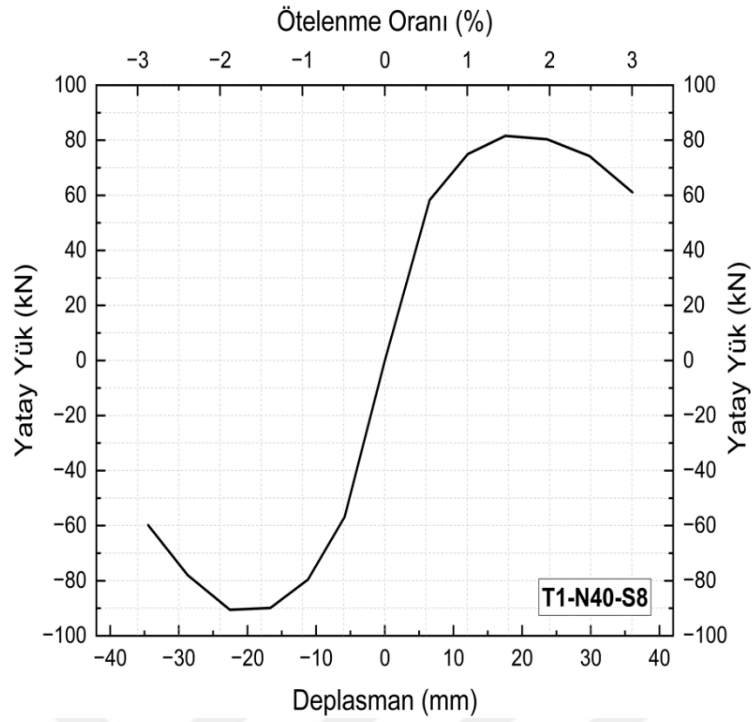
T1-N40-S8 elemanı deney sonuna kadar yük taşımaya devam etmiştir. Eğilme çatlakları ile burulma çatlakları birlikte oluşmuştur. %1.5 yatay ötelenme oranına kadar oluşan çatlaklar elemanın orta alt uzunluğu boyunca oluşurken bu değerden sonra eleman üzerinde az sayıda çatlak oluşmuş, mesnet bölgesindeki mevcut çatlakların genişlikleri artmıştır. Kabuk beton elemanın tüm yüzeyinde dökülmüştür.

T1-N40-S8 elemanının davranışını belirlemek için yapılan deneye ait sayısal veriler işlenerek çeşitli grafikler çizilmiştir. Elemana ait Yatay Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.36'da verilmiştir. Bu grafik çizilirken kiriş uçlarına verilen iki yatay yükün toplamı ile elemanın üst orta noktasının yatayda yaptığı deplasman değerleri kullanılmıştır.

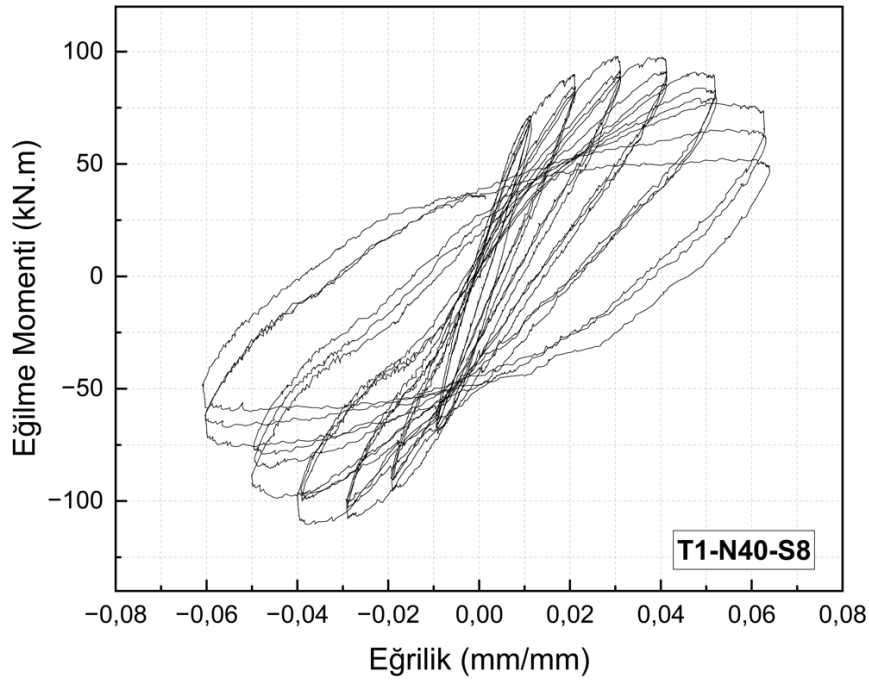


Şekil 4.36. T1-N40-S8 elemanına ait yatay yük-deplasman grafiği

Deney tersinir-tekrarlanır ve 3 çevrim olacak şekilde yapıldığı için, davranışın daha iyi anlaşılabilmesi için Zarf Eğrisi Grafiği çizilmiştir (Şekil 4.37). Bu grafik çizilirken Yatay Yük-Deplasman grafiğindeki ilk çevrimlerin son noktadaki değerleri dikkate alınmıştır. İtme yönünde akma noktası olarak 9.5 mm deplasman değeri kabul edilirken, %20 kapasite kaybına denk gelen deplasman değeri olarak 31 mm kabul edilmiştir. Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=31/9.5=3.2$ olarak tespit edilmiştir. Çekme yönünde akma noktası olarak 11 mm deplasman değeri kabul edilirken, %20 kapasite kaybına denk gelen deplasman değeri olarak 34 mm kabul edilmiştir. Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=34/11=3.1$ olarak tespit edilmiştir. Elemana ait Eğilme Momenti-Eğrilik Grafiği ise Şekil 4.38'de verilmiştir.

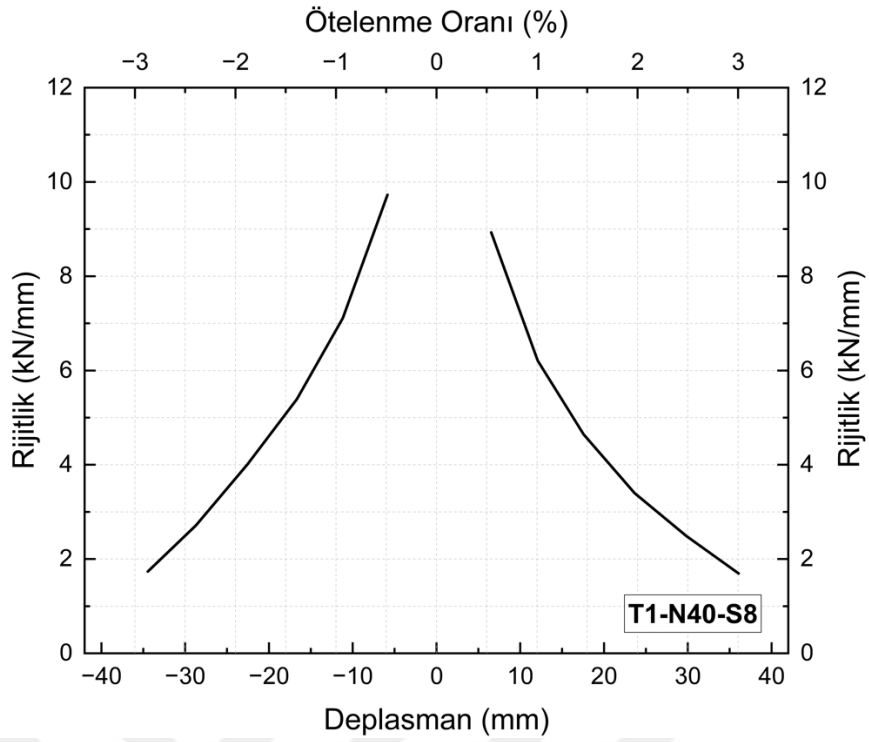


Şekil 4.37. T1-N40-S8 elemanına ait zarf eğrisi grafiği



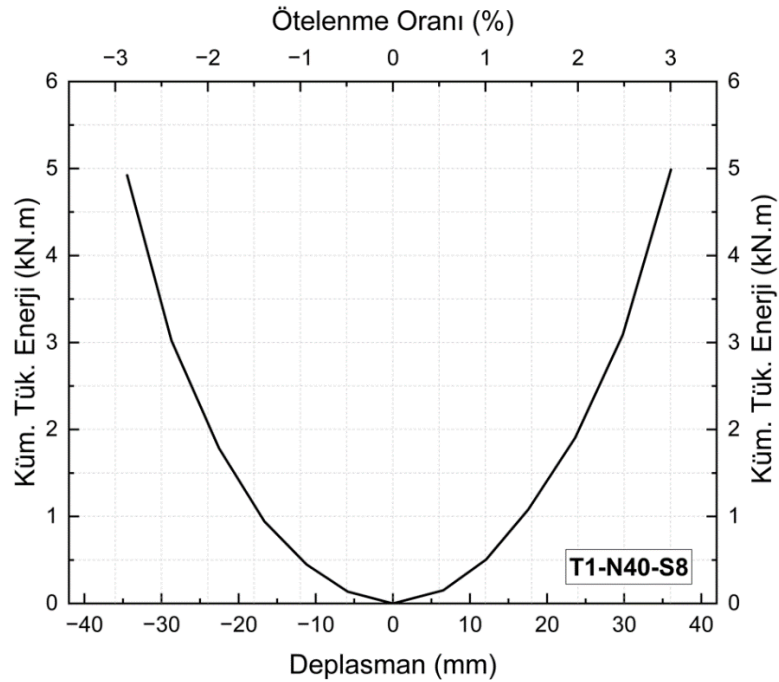
Şekil 4.38. T1-N30-S8 elemanına ait eğilme momenti-eğrilik grafiği

Deneyisel çalışma boyunca ilk çevrimlerde elemana uygulanan her bir toplam yatay yük ile elemanda meydana gelen deplasman değerleri oranlanarak rijitlik değerleri bulunmuştur. Zarf Eğrisi değerleri kullanılarak oluşturulan Rijitlik-Yatay Ötelenme Oranı Grafiği Şekil 4.39’da verilmiştir.



Şekil 4.39. T1-N40-S8 elemanına ait rijitlik grafiği

Elemana ait yük-deplasman grafiğinin altında kalan alanlar, her bir yatay ötelenme oranı için hesaplanmış ve tüketilen enerji değerleri bulunmuştur. Bu tüketilen enerji değerleri her bir yatay ötelenme oranında bir önceki yatay ötelenme oranındakilerle toplanarak kümülatif tüketilen enerji grafiği çizilmiştir (Şekil 4.40).



Şekil 4.40. T1-N40-S8 elemanına ait kümülatif tüketilen enerji grafiği

4.1.5. T2-N20-S8

Bu deney elemanı, eksenel dönme/yatay ötelenme oranı $\theta/\Delta=2$, eksenel yük oranı %20 ve enine donatı aralığı 80 mm'dir. Elemanın deney düzeneğindeki görüntüsü Şekil 4.41'de verilmiştir.



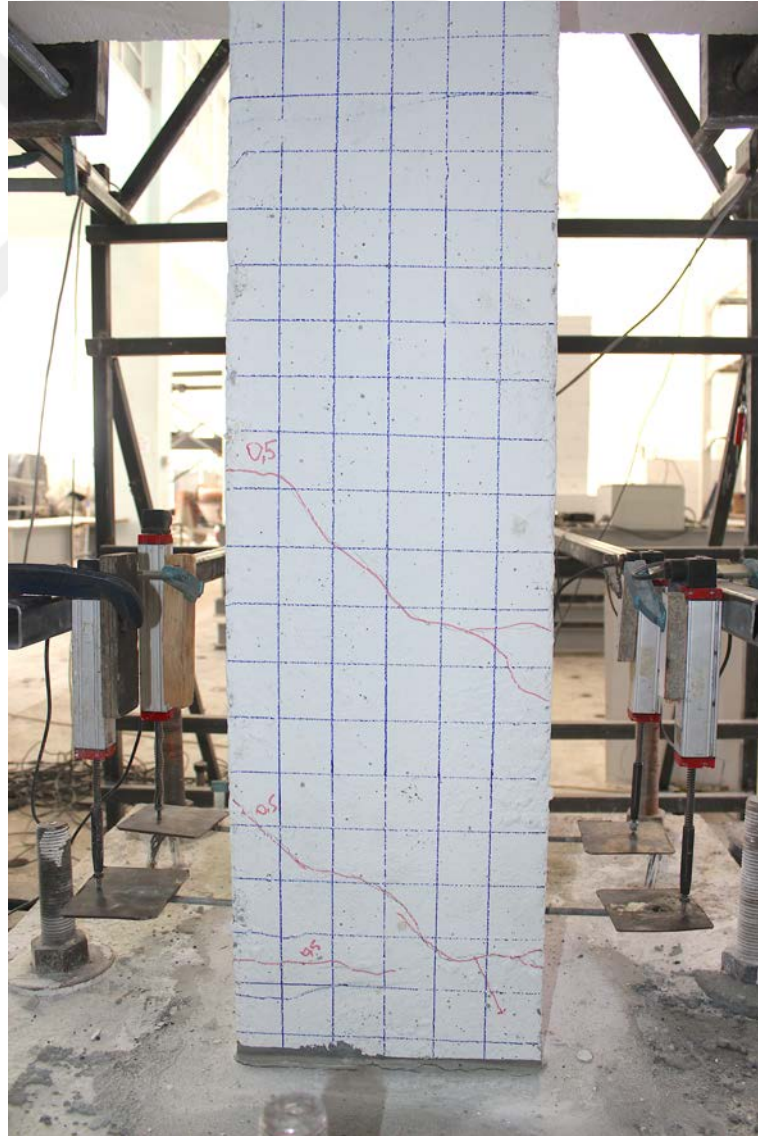
Şekil 4.41. T2-N20-S8 deney elemanının düzenekteki görüntüsü

Elemana ilk olarak %20 eksenel yük oranına karşılık gelen 450 kN eksenel yük verilmiş ve bu değer deney sonuna kadar ± 20 kN sapma olacak şekilde sabitlenmiştir. Daha sonra elemanın üstündeki kiriş uçlarına Çizelge 4.5'teki gibi ötelenmeler uygulanmıştır. Her bir ötelenme oranı için tersinir-tekrarlanır şekilde 3 çevrim yapılmıştır. Elemanın eğilme kapasitesinde yaklaşık %20 düşüş olana kadar deneye devam edilmiştir.

Çizelge 4.5. $\theta / \Delta = 2$ oranı için kiriş uçlarına uygulanan ötelenme miktarları

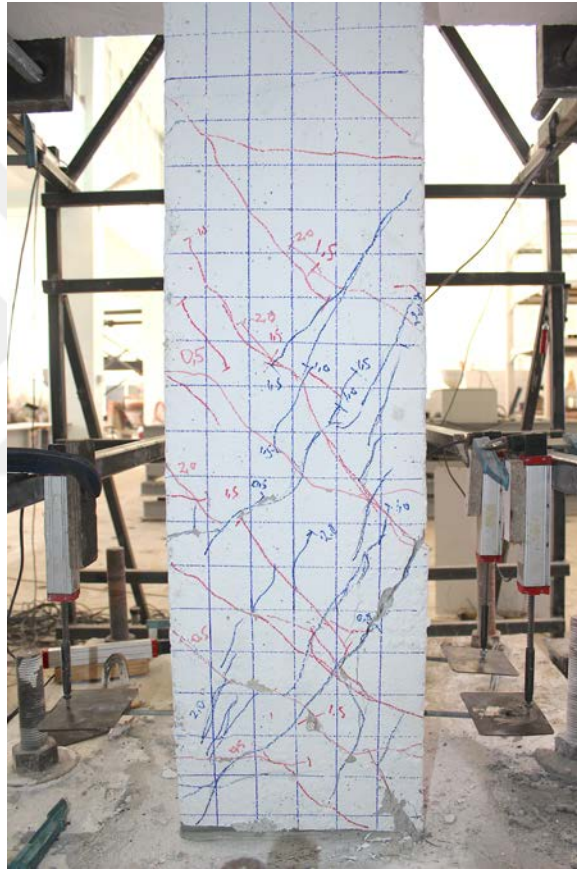
Ötelenme Oranı (%)	Kiriş Sağ Ucu (x) (mm)	Kiriş Sol Ucu (y) (mm)	(x+y)/2 (mm)
0.5	12	0	6
1.0	24	0	12
1.5	36	0	18
2.0	48	0	24

Deney elemanında ilk çatlak %0.5 ötelenme oranının ilk çevriminde meydana gelmiştir. İlk çatlak genişlikleri eğilme olarak 0.1 mm ve kesme olarak 0.3 mm genişliğinde olup, kolon orta alt bölgesinde eğilme ve burulma çatlakları şeklinde oluşmuştur (Şekil 4.42).



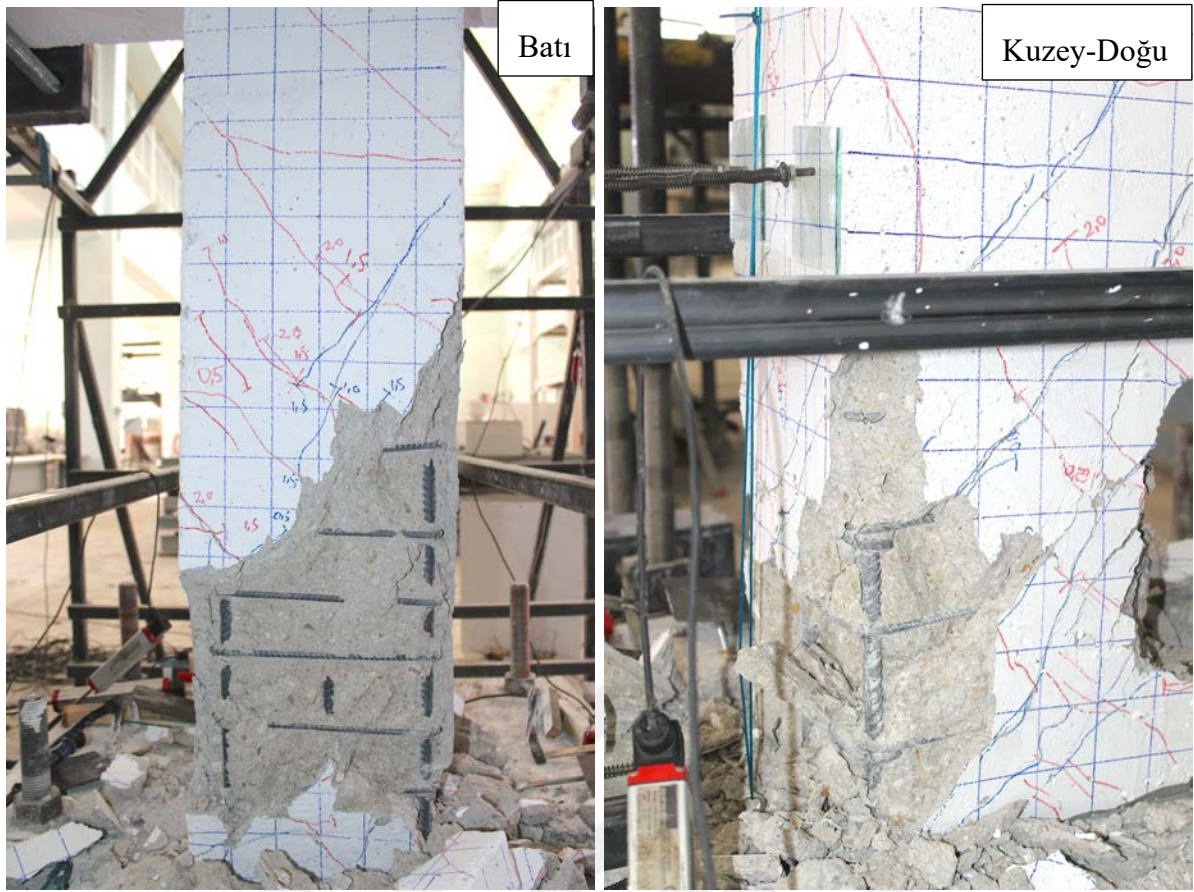
Şekil 4.42. T2-N20-S8 deney elemanında meydana gelen ilk çatlaklar

Elemanda belirli bir akma noktası gözlemlenmemiştir. İtme ve çekme yönünde %1.0 yatay ötelenme oranına kadar yatay yük artmış ve en büyük değerine ulaşmıştır. Elemanın itme yönündeki yatay yük taşıma kapasitesi 70.41 kN iken, çekme yönündeki yatay yük taşıma kapasitesi ise -74.49 kN'dur. Yatay yük, %1.0 yatay ötelenme oranından %2.0 yatay ötelenme oranına kadar itme yönünde yaklaşık %49 düşerken, çekme yönünde yaklaşık %52 düşmüştür. %2.0 yatay ötelenme oranında, elemanda meydana gelen en büyük çatlak genişliği 1.2 mm eğilme, 2.8 mm kesme çatlağı olarak ölçülmüştür. Elemana ait %2.0 yatay ötelenme oranındaki görüntüsü Şekil 4.43'te verilmiştir.

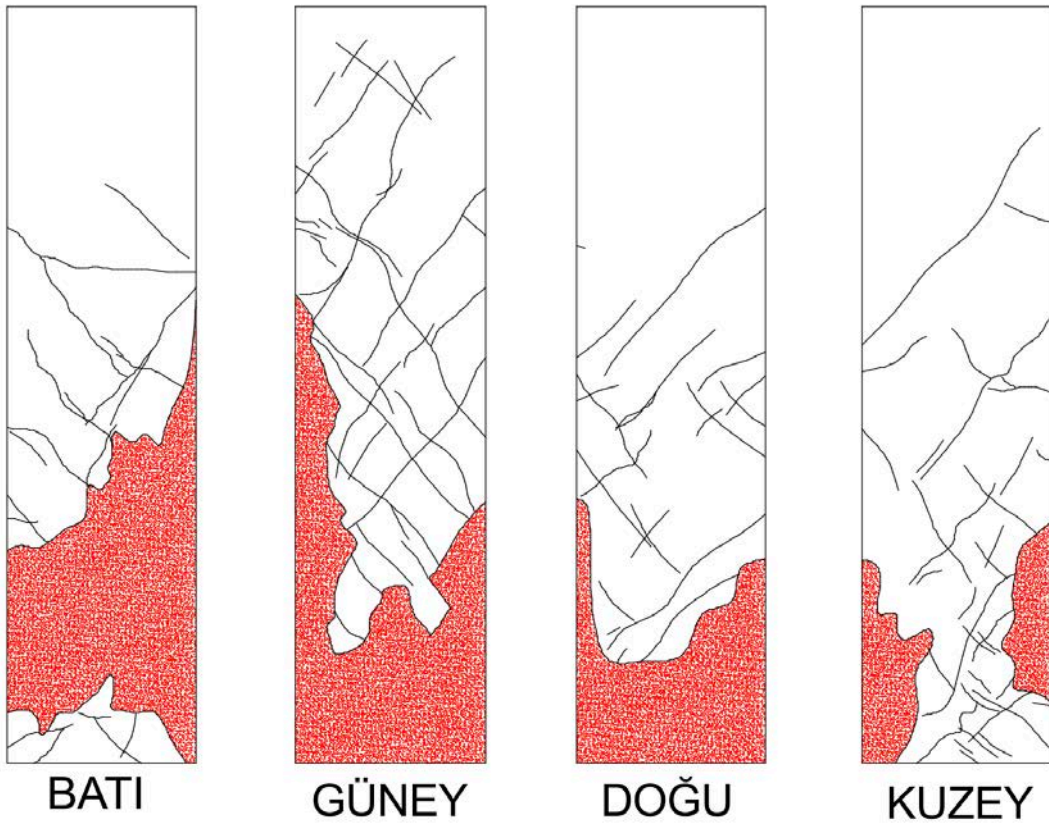


Şekil 4.43. T2-N20-S8 elemanında %2.0'de meydana gelen çatlaklar

Deneye, eleman %2.0 yatay ötelenme oranına ulaşana kadar devam edilmiştir. Bu noktada toplam yatay yük itme yönünde 35.89 kN, çekme yönünde -39.19 kN değerine ulaşmıştır. %2.0 yatay ötelenme oranında kabuk beton dökülmeye başlamıştır. Deney sonunda elemanda meydana gelen plastik mafsallık uzunluğu 600 mm olarak ölçülmüştür. Boyuna donatılarda burkulma gözlemlenmiştir. Elemana ait deney sonu görüntüsü Şekil 4.44'ta, çatlak görüntüsü ise Şekil 4.45'te verilmiştir.



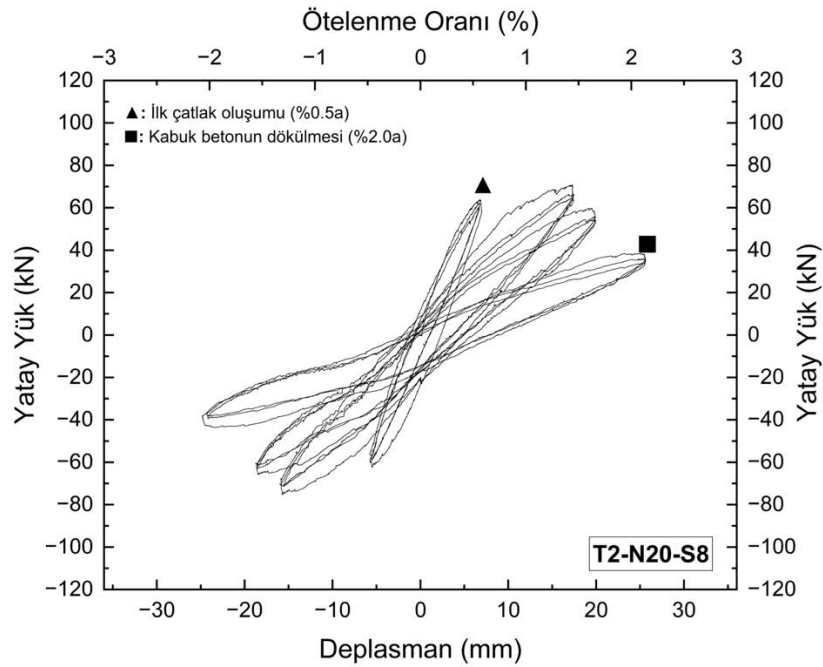
Şekil 4.44. T2-20-S8 elemanın deney sonu görüntüsü



Şekil 4.45. T2-N20-S8 elemanında oluşan çatlaklar

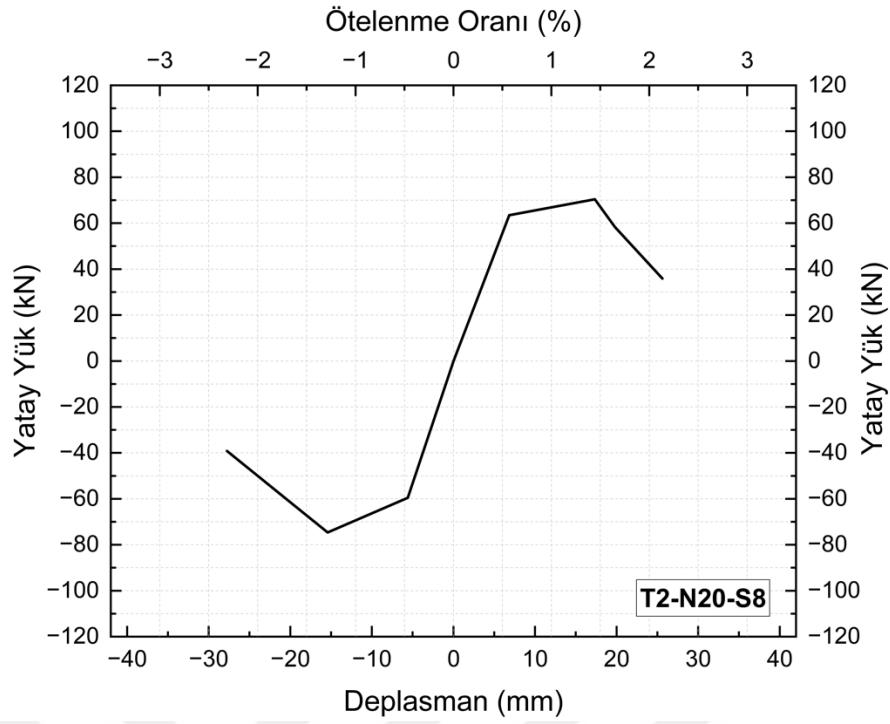
T2-N20-S8 elemanı deney sonuna kadar yük taşımaya devam etmiştir. Eğilme çatlakları ile burulma çatlakları birlikte oluşmuştur. %2.0 yatay ötelenme oranına kadar oluşan çatlaklar elemanın tüm yüzeyi boyunca oluşurken bu değerden sonra eleman üzerinde az sayıda çatlak oluşmuş, mesnet bölgesindeki mevcut çatlakların genişlikleri artmıştır. Kabuk beton elemanın itme ve çekme yönüne dik yüzeyinde tamamen dökülmüştür.

T2-N20-S8 elemanının davranışını belirlemek için yapılan deneye ait sayısal veriler işlenerek çeşitli grafikler çizilmiştir. Elemana ait Yatay Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.46'da verilmiştir. Bu grafik çizilirken kiriş uçlarına verilen iki yatay yükün toplamı ile elemanın üst orta noktasının yatayda yaptığı deplasman değerleri kullanılmıştır.

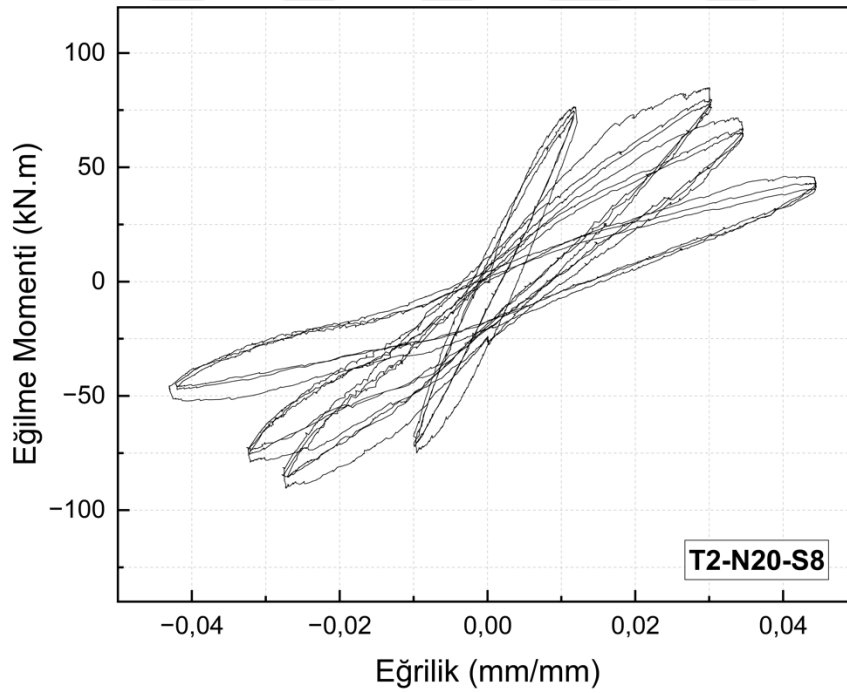


Şekil 4.46. T2-N20-S8 elemanına ait yatay yük-deplasman grafiği

Deney tersinir-tekrarlanır ve 3 çevrim olacak şekilde yapıldığı için, davranışın daha iyi anlaşılabilmesi için Zarf Eğrisi Grafiği çizilmiştir (Şekil 4.47). Bu grafik çizilirken Yatay Yük-Deplasman grafiğindeki ilk çevrimlerin son noktadaki değerleri dikkate alınmıştır. İtme yönündeki akma noktası olarak 7.5 mm deplasman değeri kabul edilirken, %20 kapasite kaybına denk gelen deplasman değeri olarak 21 mm kabul edilmiştir. Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=21/7.5=2.8$ olarak tespit edilmiştir. Çekme yönündeki akma noktası olarak 7 mm deplasman değeri kabul edilirken, %20 kapasite kaybına denk gelen deplasman değeri olarak 22 mm kabul edilmiştir. Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=22/7=3.1$ olarak tespit edilmiştir. Elemana ait Eğilme Momenti-Eğrilik Grafiği ise Şekil 4.48'de verilmiştir.

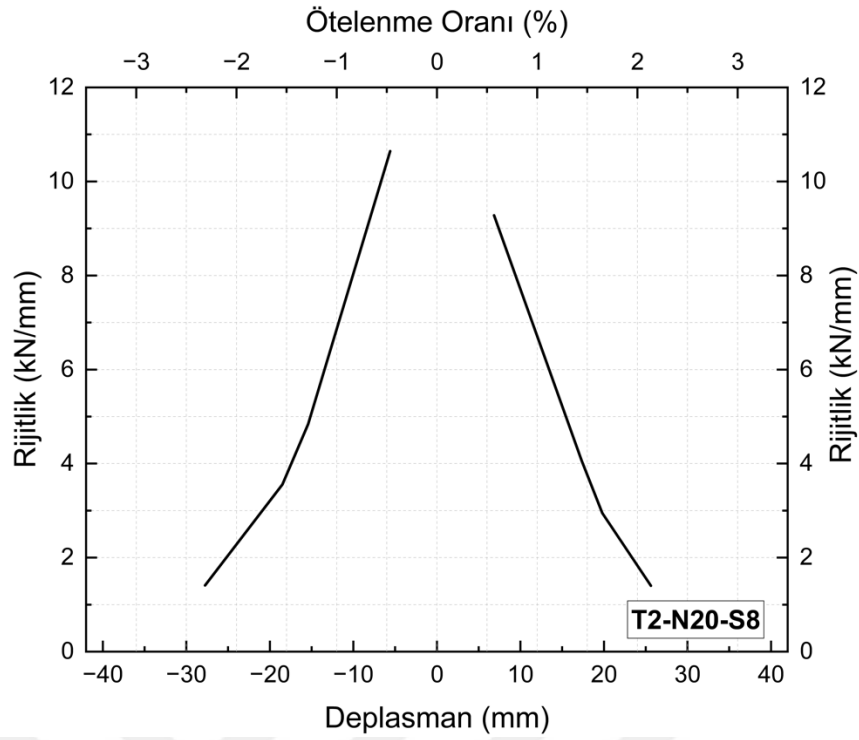


Şekil 4.47. T2-N20-S8 elemanına ait zarf eğrisi grafiği



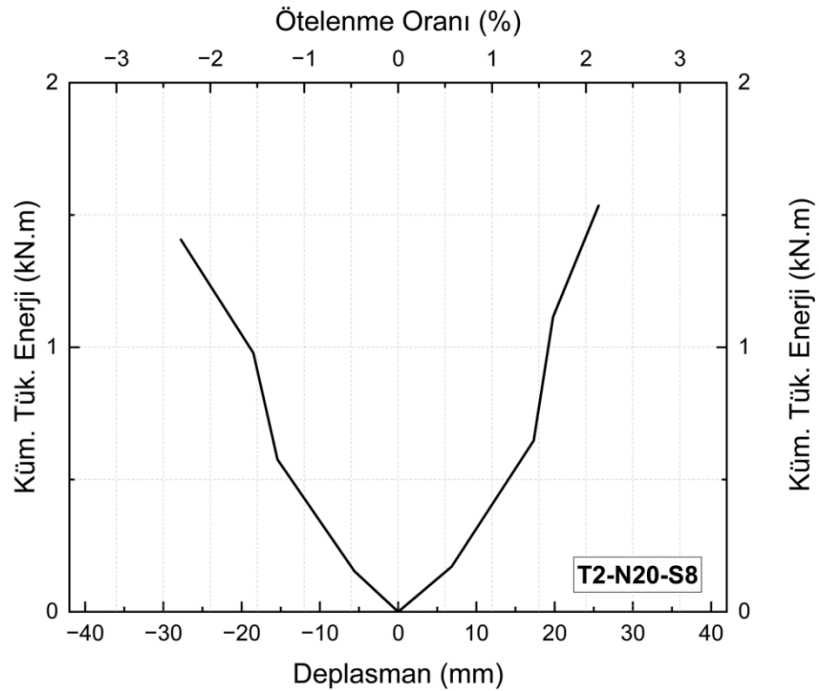
Şekil 4.48. T2-N20-S8 elemanına ait eğilme momenti-eğrilik grafiği

Deneyssel çalışma boyunca ilk çevrimlerde elemana uygulanan her bir toplam yatay yük ile elemanda meydana gelen deplasman değerleri oranlanarak rijitlik değerleri bulunmuştur. Zarf Eğrisi değerleri kullanılarak oluşturulan Rijitlik-Yatay Ötelenme Oranı Grafiği Şekil 4.49'da verilmiştir.



Şekil 4.49. T2-N20-S8 elemanına ait rijitlik grafiği

Elemana ait yük-deplasman grafiğinin altında kalan alanlar, her bir yatay ötelenme oranı için hesaplanmış ve tüketilen enerji değerleri bulunmuştur. Bu tüketilen enerji değerleri her bir yatay ötelenme oranında bir önceki yatay ötelenme oranındakilerle toplanarak kümülatif tüketilen enerji grafiği çizilmiştir (Şekil 4.50).



Şekil 4.40. T2-N20-S8 elemanına ait kümülatif tüketilen enerji grafiği

4.1.6. T1-N30-S16

Bu deney elemanı, eksenel dönme/yatay ötelenme oranı $\theta/\Delta=1$, eksenel yük oranı %30 ve enine donatı aralığı 160 mm'dir. Elemanın deney düzeneğindeki görüntüsü Şekil 4.51'de verilmiştir.



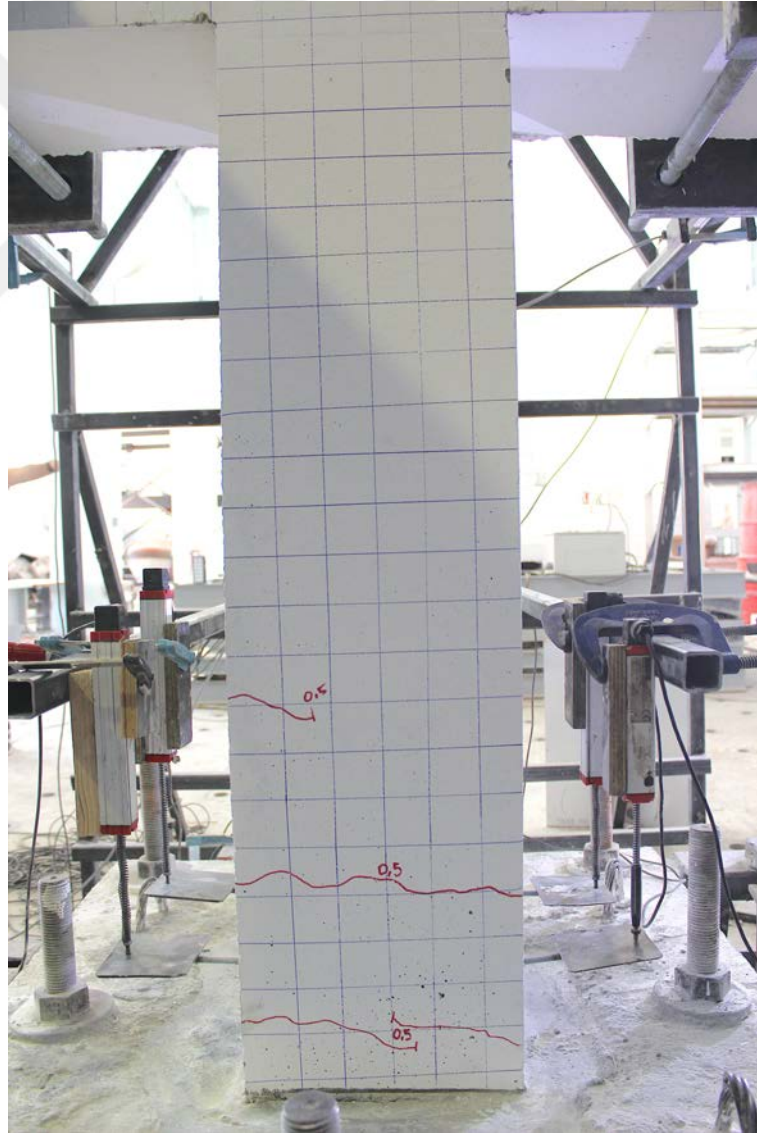
Şekil 4.51. T1-N30-S16 deney elemanının düzenekteki görüntüsü

Elemana ilk olarak %30 eksenel yük oranına karşılık gelen 675 kN eksenel yük verilmiş ve bu değer deney sonuna kadar ± 20 kN sapma olacak şekilde sabitlenmiştir. Daha sonra elemanın üstündeki kiriş uçlarına Çizelge 4.6'daki gibi ötelenmeler uygulanmıştır. Her bir ötelenme oranı için tersinir-tekrarlanır şekilde 3 çevrim yapılmıştır. Elemanın eğilme kapasitesinde yaklaşık %20 düşüş olana kadar deneye devam edilmiştir.

Çizelge 4.6. $\theta / \Delta = 1$ oranı için kiriş uçlarına uygulanan ötelenme miktarları

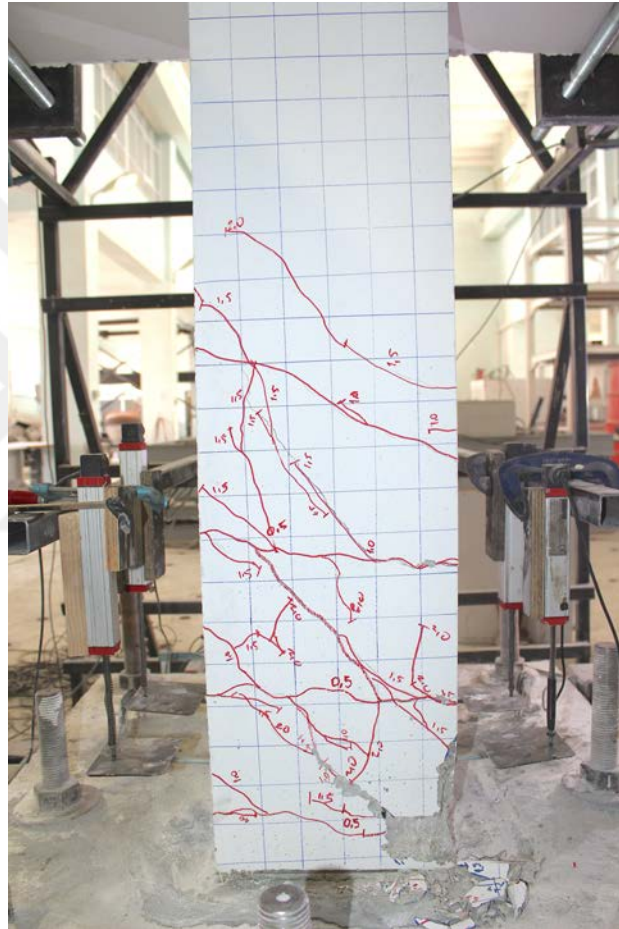
Ötelenme Oranı (%)	Kiriş Sağ Ucu (x) (mm)	Kiriş Sol Ucu (y) (mm)	(x+y)/2 (mm)
0.5	9	3	6
1.0	18	6	12
1.5	27	9	18
2.0	36	12	24

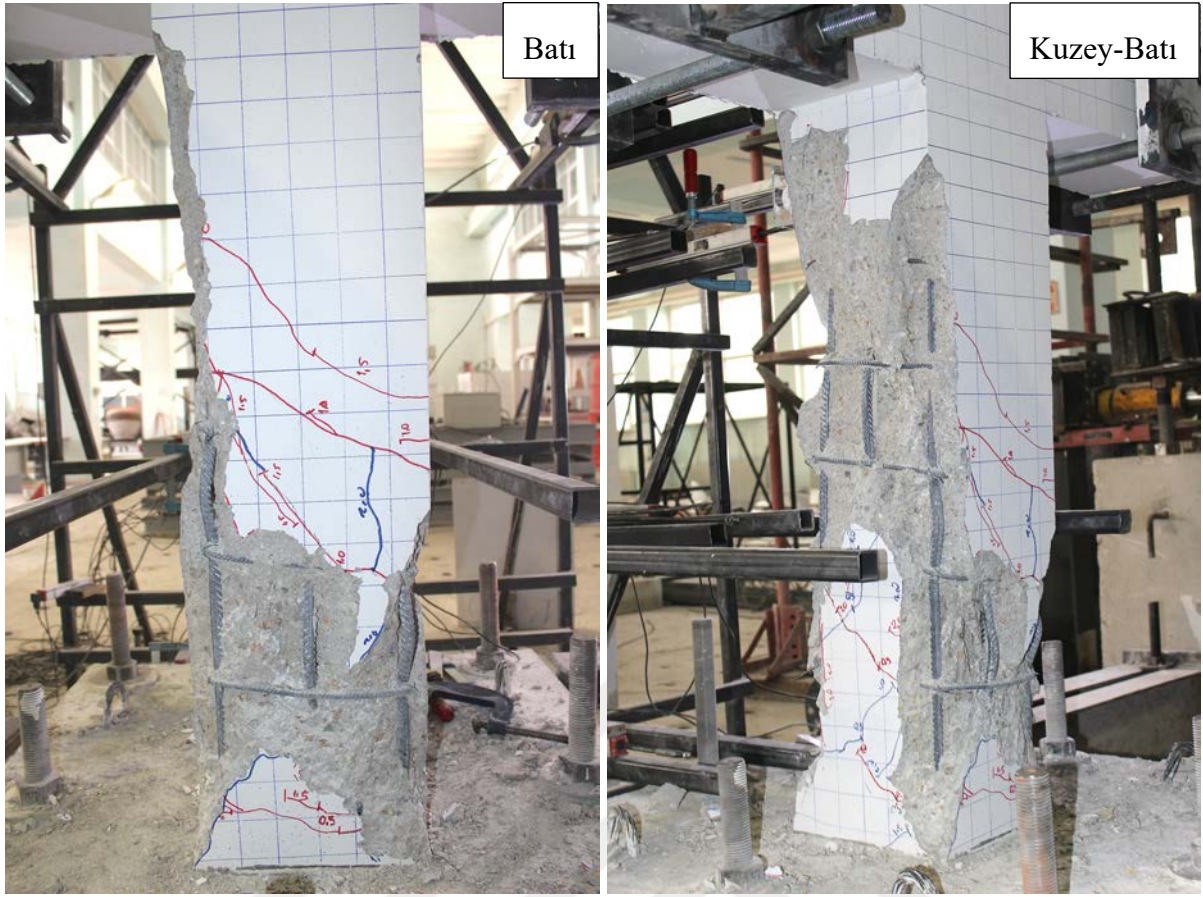
Deney elemanında ilk çatlaklar %0.5 ötelenme oranının ilk çevriminde meydana gelmiştir. İlk çatlak genişlikleri 0.2 mm genişliğinde olup, kolon boyunca eğilme ve burulma çatlakları şeklinde oluşmuştur (Şekil 4.52).



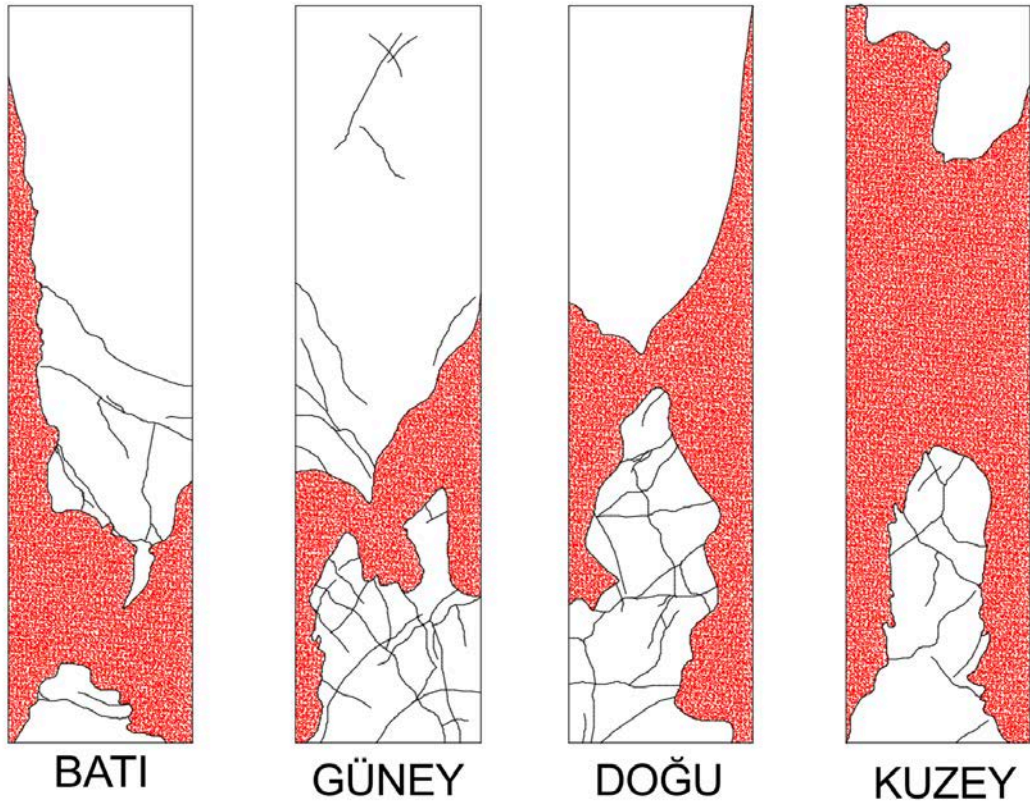
Şekil 4.52. T1-N30-S16 deney elemanında meydana gelen ilk çatlaklar

Elemanda belirli bir akma noktası gözlemlenmemiştir. İtme yönünde %2.0, çekme yönünde %1.5 yatay ötelenme oranına kadar yatay yük artmış ve en büyük değerine ulaşmıştır. Elemanın itme yönündeki yatay yük taşıma kapasitesi 90.07 kN iken, çekme yönündeki yatay yük taşıma kapasitesi ise -96.42 kN'dur. Yatay yük, itme yönünde azalmazken, çekme yönünde yaklaşık %9 düşmüştür. %2.0 yatay ötelenme oranındaki hasarlar çok büyük olduğu için, elemanda meydana gelen en büyük çatlak genişlikleri ölçülmemiştir. Elemana ait %2.0 yatay ötelenme oranındaki görüntüsü Şekil 4.53'te verilmiştir.





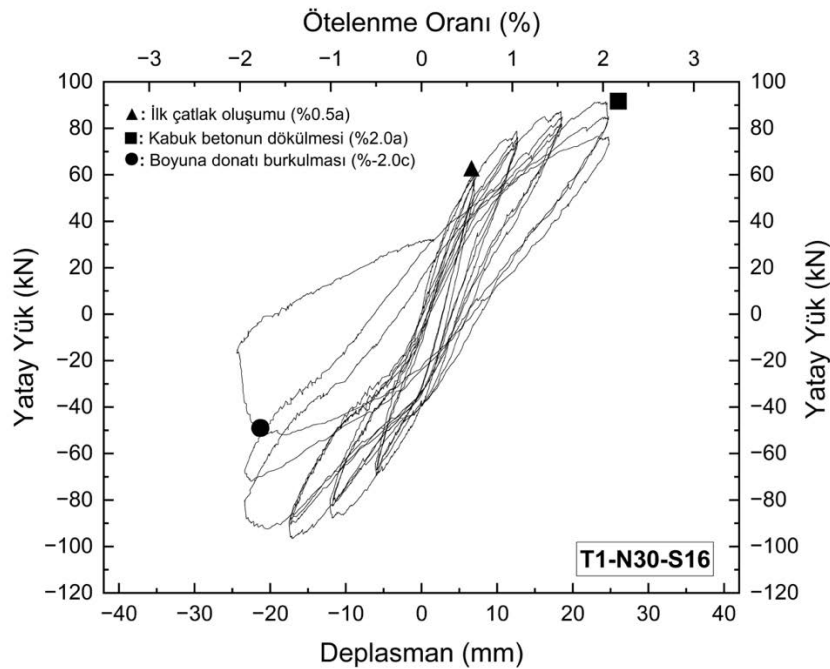
Şekil 4.54. T1-30-S16 elemanın deney sonu görüntüsü



Şekil 4.55. T1-N30-S16 elemanında oluşan çatlaklar

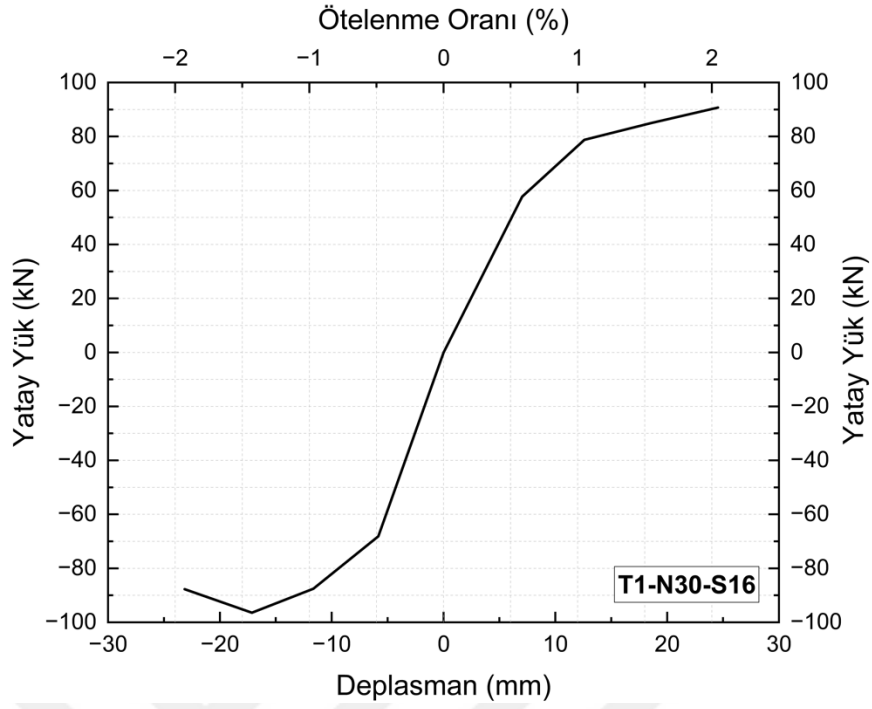
T1-N30-S16 elemanı deney sonuna kadar yük taşımaya devam etmiştir. Eğilme çatlakları ile burulma çatlakları birlikte oluşmuştur. %2.0 yatay ötelenme oranına kadar oluşan çatlaklar elemanın orta alt uzunluğu boyunca oluşurken bu değer 2. çevriminden sonra eleman yüksekliğinin tamamında büyük çatlaklar oluşmuş, kabuk beton eleman boyunca helezon şeklinde dökülmüştür. Çekme yönünün 3. çevriminde yük ani bir şekilde düşmüştür.

T1-N30-S16 elemanının davranışını belirlemek için yapılan deneye ait sayısal veriler işlenerek çeşitli grafikler çizilmiştir. Elemana ait Yatay Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.56'da verilmiştir. Bu grafik çizilirken kiriş uçlarına verilen iki yatay yükün toplamı ile elemanın üst orta noktasının yatayda yaptığı deplasman değerleri kullanılmıştır.

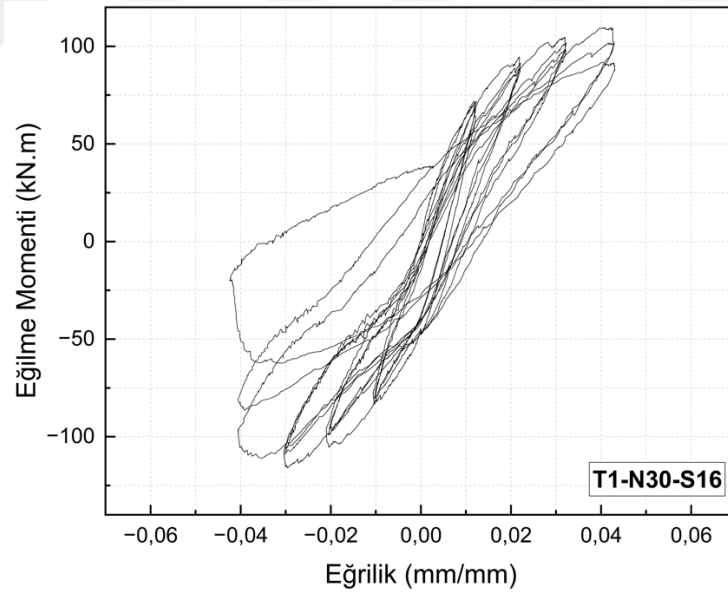


Şekil 4.56. T1-N30-S16 elemanına ait yatay yük-deplasman grafiği

Deney tersinir-tekrarlanır ve 3 çevrim olacak şekilde yapıldığı için, davranışın daha iyi anlaşılabilmesi için Zarf Eğrisi Grafiği çizilmiştir (Şekil 4.57). Bu grafik çizilirken Yatay Yük-Deplasman grafiğindeki ilk çevrimlerin son noktadaki değerleri dikkate alınmıştır. İtme yönündeki akma noktası olarak 13 mm deplasman değeri kabul edilirken, nihai deplasman değeri olarak 24 mm kabul edilmiştir. Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=24/13=1.8$ olarak tespit edilmiştir. Çekme yönündeki akma noktası olarak 7 mm deplasman değeri kabul edilirken, nihai deplasman değeri olarak 24 mm kabul edilmiştir. Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=24/7=3.4$ olarak tespit edilmiştir. Elemana ait Eğilme Momenti-Eğrilik Grafiği ise Şekil 4.58'de verilmiştir.

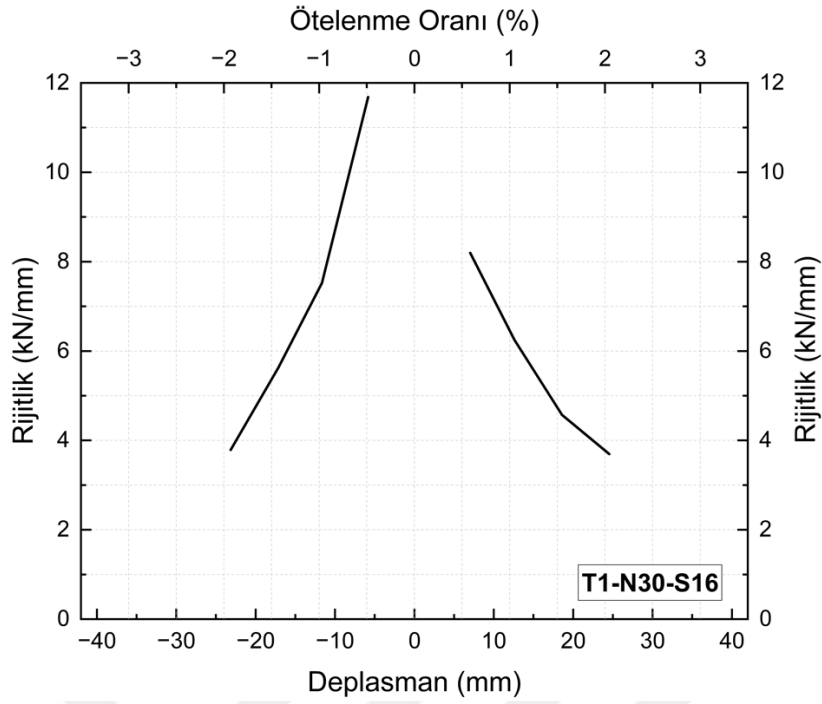


Şekil 4.57. T1-N30-S16 elemanına ait zarf eğrisi grafiği



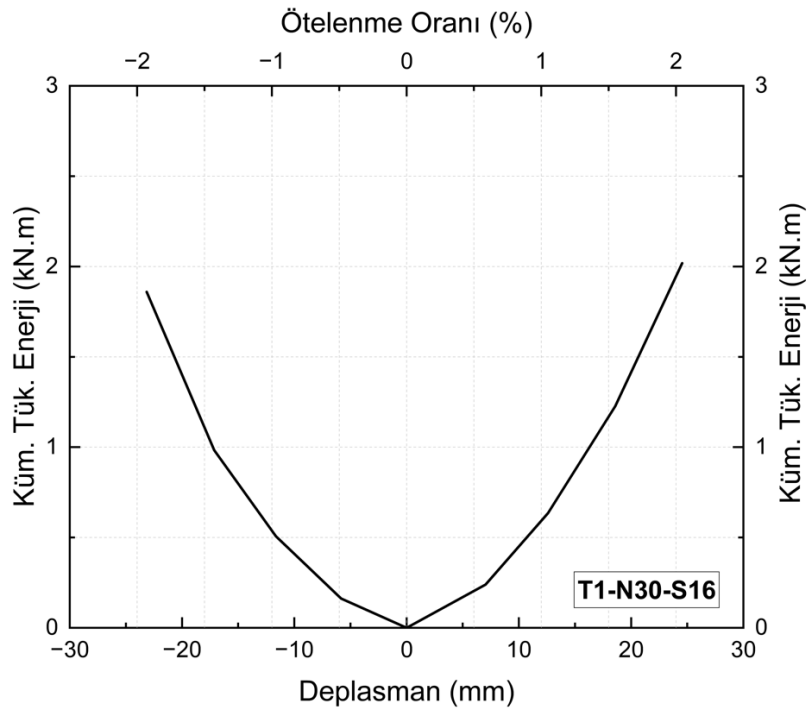
Şekil 4.58. T1-N30-S16 elemanına ait zarf eğrisi grafiği

DeneySEL çalışma boyunca ilk çevrimlerde elemana uygulanan her bir toplam yatay yük ile elemanda meydana gelen deplasman değerleri oranlanarak rijitlik değerleri bulunmuştur. Zarf Eğrisi değerleri kullanılarak oluşturulan Rijitlik-Yatay Ötelenme Oranı Grafiği Şekil 4.59'da verilmiştir.



Şekil 4.59. T1-N30-S16 elemanına ait rijitlik grafiği

Elemana ait yük-deplasman grafiğinin altında kalan alanlar, her bir yatay ötelenme oranı için hesaplanmış ve tüketilen enerji değerleri bulunmuştur. Bu tüketilen enerji değerleri her bir yatay ötelenme oranında bir önceki yatay ötelenme oranındakilerle toplanarak kümülatif tüketilen enerji grafiği çizilmiştir (Şekil 4.60).



Şekil 4.60. T1-N30-S16 elemanına ait kümülatif tüketilen enerji grafiği

4.1.7. T0-N20-S8

Bu deney elemanı, eksenel dönme/yatay ötelenme oranı $\theta/\Delta=0$, eksenel yük oranı %20 ve enine donatı aralığı 80 mm'dir. Elemanın deney düzeneğindeki görüntüsü Şekil 4.61'de verilmiştir.



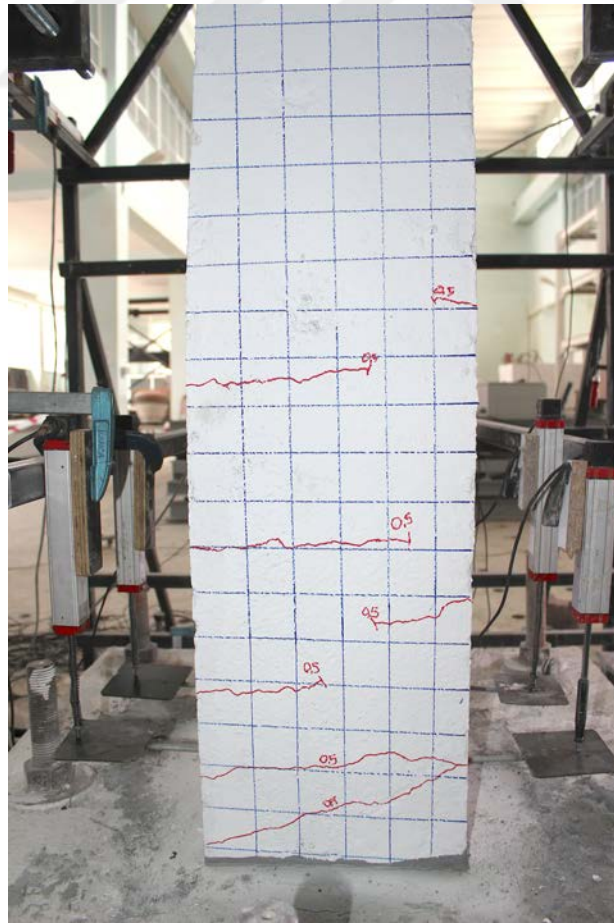
Şekil 4.61. T0-N20-S8 deney elemanının düzeneğindeki görüntüsü

Elemana ilk olarak %20 eksenel yük oranına karşılık gelen 450 kN eksenel yük verilmiş ve bu değer deney sonuna kadar ± 20 kN sapma olacak şekilde sabitlenmiştir. Daha sonra elemanın üstündeki kiriş uçlarına Çizelge 4.7'deki gibi ötelenmeler uygulanmıştır. Her bir ötelenme oranı için tersinir-tekrarlanır şekilde 3 çevrim yapılmıştır. Elemanın eğilme kapasitesinde yaklaşık %20 düşüş olana kadar deneye devam edilmiştir.

Çizelge 4.7. $\theta / \Delta = 0$ oranı için kiriş uçlarına uygulanan ötelenme miktarları

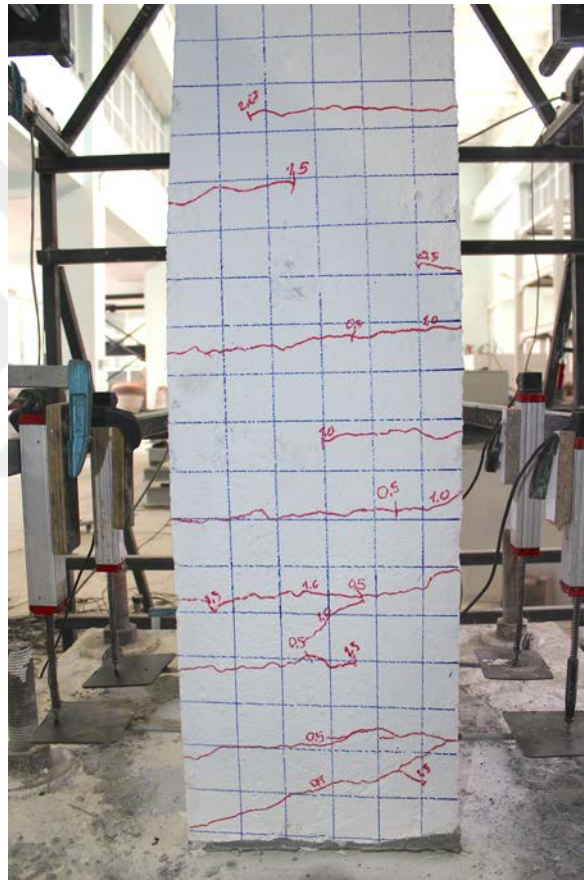
Ötelenme Oranı (%)	Kiriş Sağ Ucu (x) (mm)	Kiriş Sol Ucu (y) (mm)	(x+y)/2 (mm)
0.5	6	6	6
1.0	12	12	12
1.5	18	18	18
2.0	24	24	24
2.5	30	30	30
3.0	36	36	36
3.5	42	42	42
4.0	48	48	48
4.5	54	54	54

Deney elemanında ilk çatlaklar %0.5 ötelenme oranının ilk çevriminde meydana gelmiştir. İlk çatlak genişlikleri 0.3 mm genişliğinde olup, kolon alt bölgesinde eğilme çatlakları şeklinde oluşmuştur (Şekil 4.62).



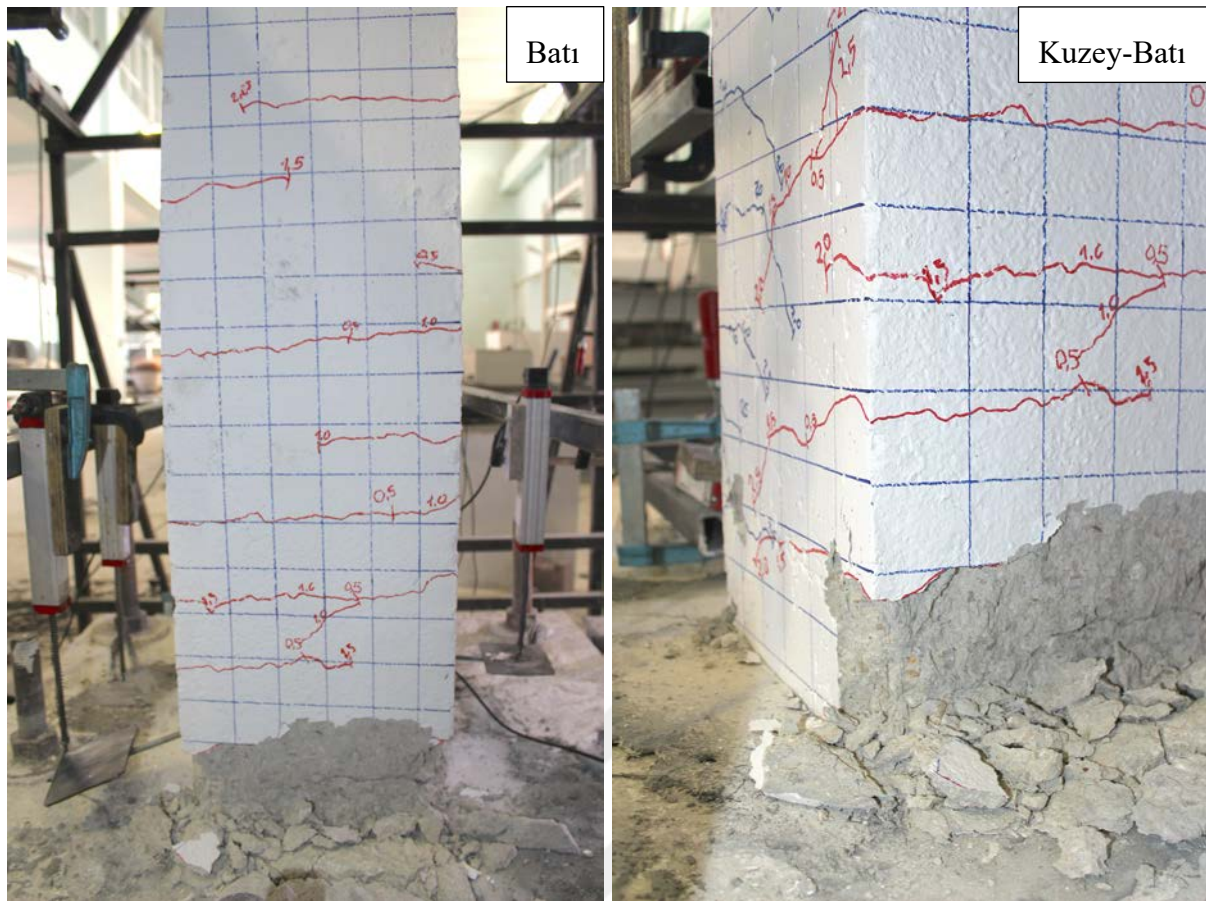
Şekil 4.62. T0-N20-S8 deney elemanında meydana gelen ilk çatlaklar

Elemanda belirli bir akma gözlemlenmemiştir. İtme ve çekme yönünde %2.5 yatay ötelenme oranına kadar yatay yük artarak en büyük değerine ulaşmış ve daha sonra azalmıştır. Elemanın itme yönündeki yatay yük taşıma kapasitesi 89.98 kN iken, çekme yönündeki yatay yük taşıma kapasitesi ise -91.69 kN'dur. Yatay yük %2.5 yatay ötelenme oranından sonra yaklaşık %27 düşmüştür. Bu durum hem itme hem de çekme yönünde benzer özellik göstermiştir. %2.0 yatay ötelenme oranında, elamanda meydana gelen en büyük çatlak genişliği 1.4 mm eğilme çatlağı olarak ölçülmüştür. Elemana ait %2.0 yatay ötelenme oranındaki görüntüsü Şekil 4.63'te verilmiştir.

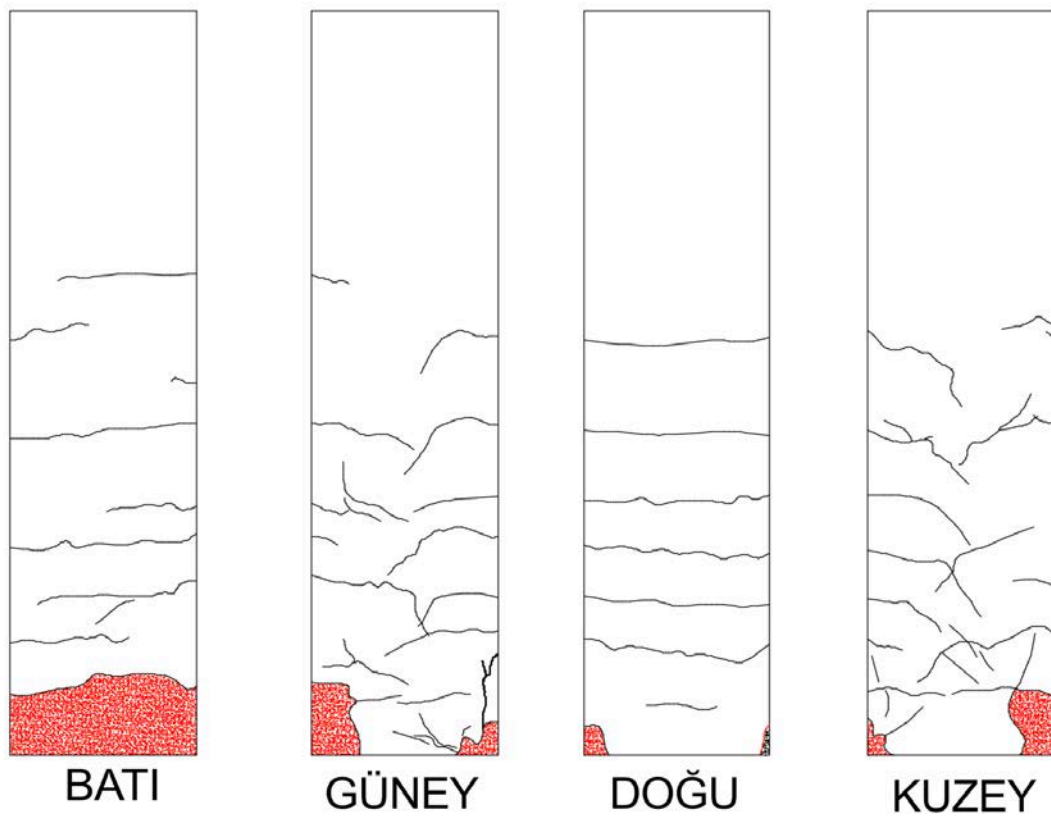


Şekil 4.63. T0-N20-S8 elemanında %2.0’de meydana gelen çatlaklar

Deneye, eleman %4.5 yatay ötelenme oranına ulaşana kadar devam edilmiştir. Bu noktada toplam yatay yük itme yönünde 65.49 kN, çekme yönünde -52.82 kN değerine ulaşmıştır. %4.0 yatay ötelenme oranında kabuk beton dökülmeye başlamıştır. Deney sonunda elamanda meydana gelen plastik mafsallık uzunluğu 150 mm olarak ölçülmüştür. Boyuna donatılarda burkulma gözlemlenmemiştir. Elemana ait deney sonu görüntüsü Şekil 4.64’te, çatlak görüntüsü ise Şekil 4.65’te verilmiştir.



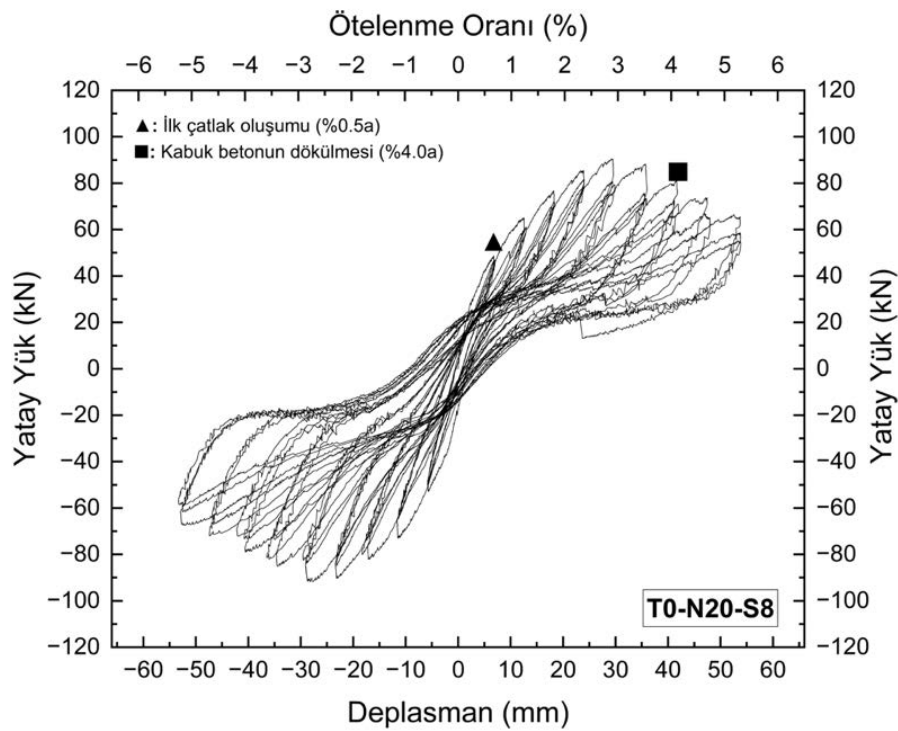
Şekil 4.64. T0-20-S8 elemanının deney sonu görüntüsü



Şekil 4.65. T0-N20-S8 elemanında oluşan çatlaklar

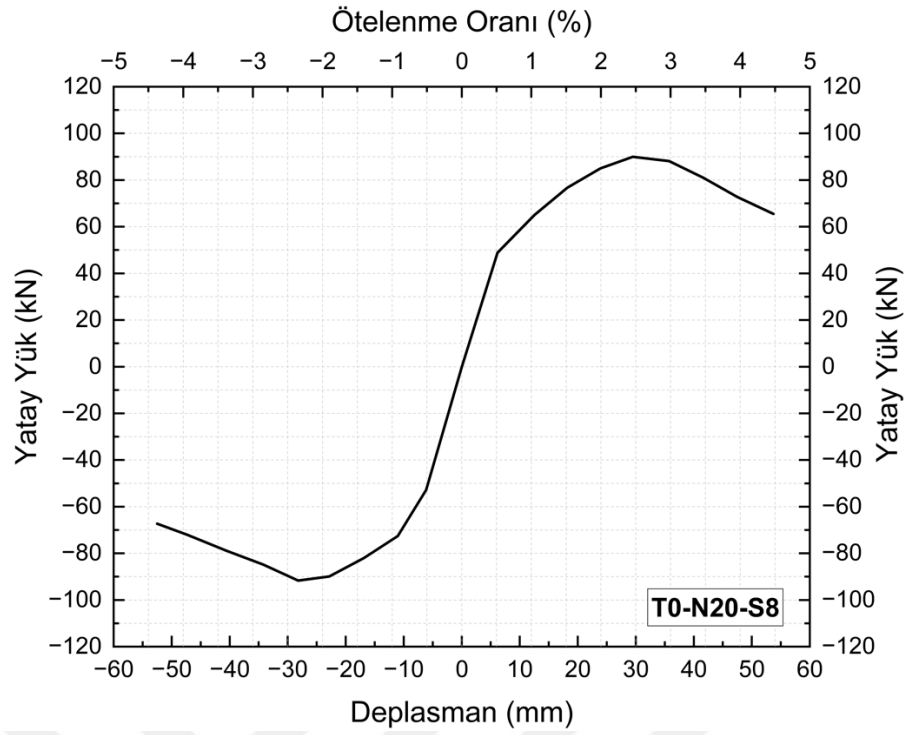
T0-N20-S8 elemanı deney sonuna kadar yük taşımaya devam etmiştir. Sadece eğilme çatlakları oluşmuştur. %2.0 yatay ötelenme oranına kadar oluşan çatlaklar elemanın orta alt uzunluğu boyunca oluşurken bu değerden sonra mesnet bölgesindeki mevcut çatlakların genişlikleri artmıştır. Kabuk beton daha çok elemanın yüzeyinde dökülmüştür.

T0-N20-S8 elemanının davranışını belirlemek için yapılan deneye ait sayısal veriler işlenerek çeşitli grafikler çizilmiştir. Elemana ait Yatay Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.66'da verilmiştir. Bu grafik çizilirken kiriş uçlarına verilen iki yatay yükün toplamı ile elemanın üst orta noktasının yatayda yaptığı deplasman değerleri kullanılmıştır.

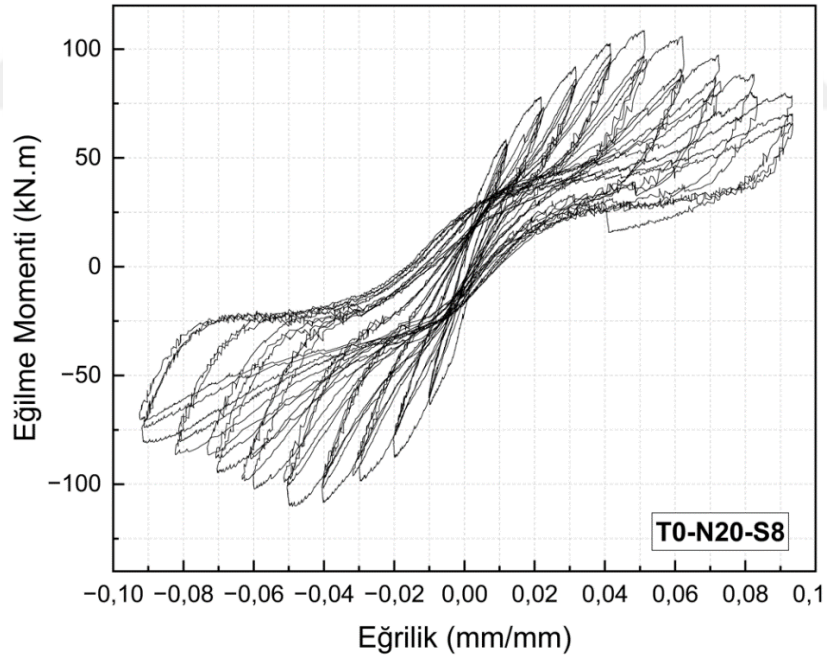


Şekil 4.66. T0-N20-S8 elemanına ait yatay yük-deplasman grafiği

Deney tersinir-tekrarlanır ve 3 çevrim olacak şekilde yapıldığı için, davranışın daha iyi anlaşılabilmesi için Zarf Eğrisi Grafiği çizilmiştir (Şekil 4.67). Bu grafik çizilirken Yatay Yük-Deplasman grafiğindeki ilk çevrimlerin son noktadaki değerleri dikkate alınmıştır. İtme yönündeki akma noktası olarak 18 mm deplasman değeri kabul edilirken, %20 kapasite kaybına denk gelen deplasman değeri olarak 47 mm kabul edilmiştir. Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=47/18=2.6$ olarak tespit edilmiştir. Çekme yönündeki akma noktası olarak 14 mm deplasman değeri kabul edilirken, %20 kapasite kaybına denk gelen deplasman değeri olarak 46 mm kabul edilmiştir. Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=46/14=3.3$ olarak tespit edilmiştir. Elemana ait Eğilme Momenti-Eğrilik Grafiği ise Şekil 4.68'de verilmiştir.

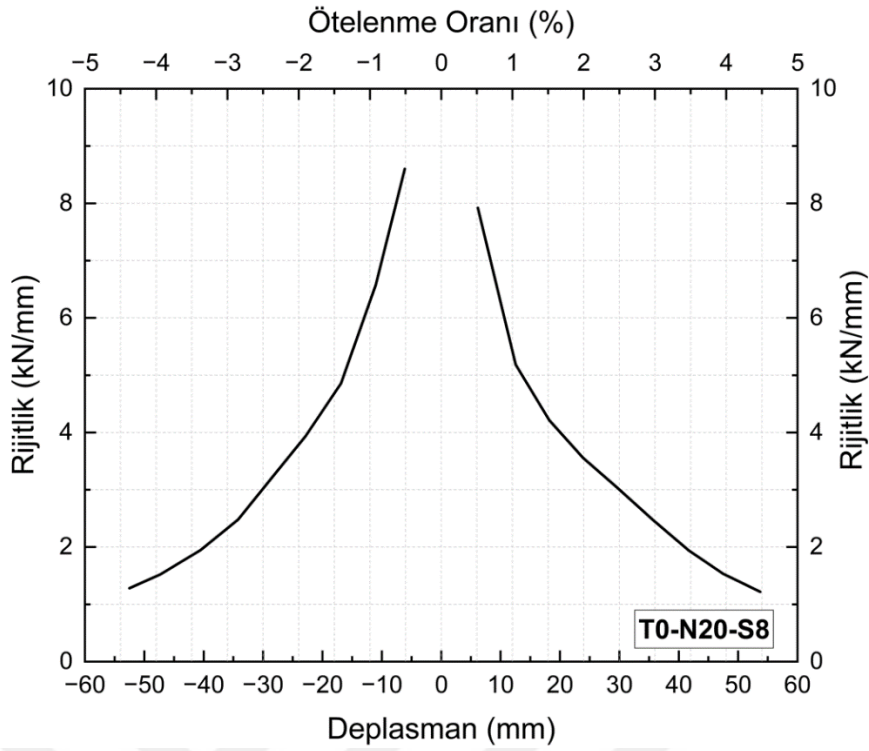


Şekil 4.67. T0-N20-S8 elemanına ait zarf eğrisi grafiği



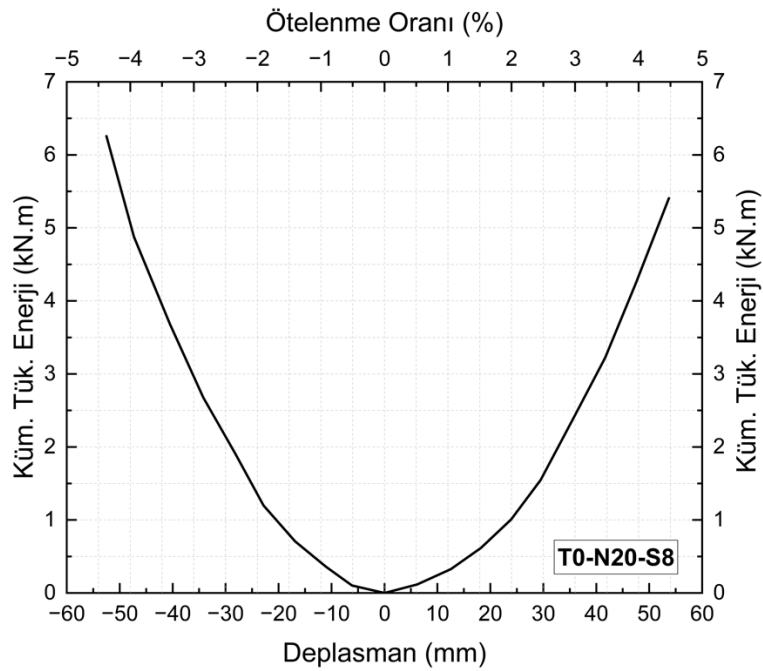
Şekil 4.68. T0-N20-S8 elemanına ait eğilme momenti-eğrilik grafiği

Deneyssel çalışma boyunca ilk çevrimlerde elemana uygulanan her bir toplam yatay yük ile elemanda meydana gelen deplasman değerleri oranlanarak rijitlik değerleri bulunmuştur. Zarf Eğrisi değerleri kullanılarak oluşturulan Rijitlik-Yatay Ötelenme Oranı Grafiği Şekil 4.69'da verilmiştir.



Şekil 4.69. T0-N20-S8 elemanına ait rijitlik grafiği

Elemana ait yük-deplasman grafiğinin altında kalan alanlar, her bir yatay ötelenme oranı için hesaplanmış ve tüketilen enerji değerleri bulunmuştur. Bu tüketilen enerji değerleri her bir yatay ötelenme oranında bir önceki yatay ötelenme oranındakilerle toplanarak kümülatif tüketilen enerji grafiği çizilmiştir (Şekil 4.70).



Şekil 4.70. T0-N20-S8 elemanına ait kümülatif tüketilen enerji grafiği

4.1.8. T0-N30-S8

Bu deney elemanı, eksenel dönme/yatay ötelenme oranı $\theta/\Delta=0$, eksenel yük oranı %30 ve enine donatı aralığı 80 mm'dir. Elemanın deney düzeneğindeki görüntüsü Şekil 4.71'de verilmiştir.



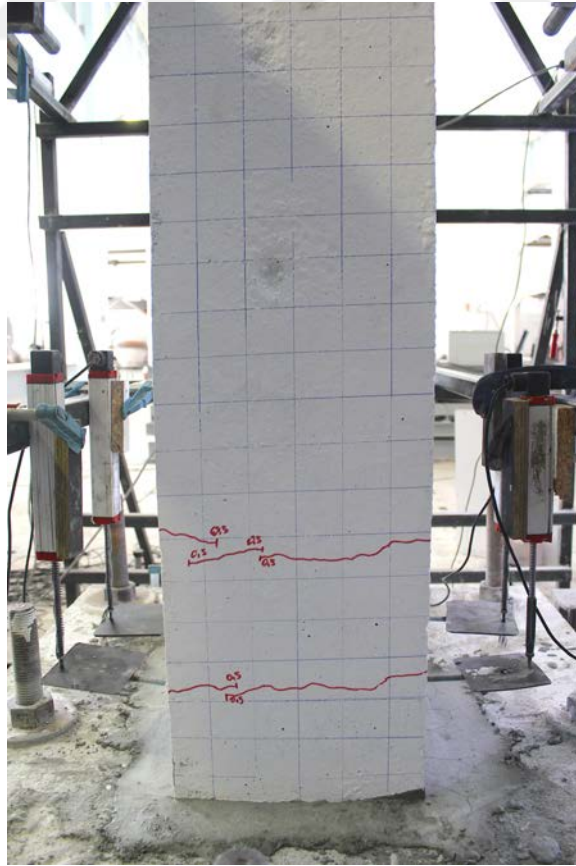
Şekil 4.71. T0-N30-S8 deney elemanının düzeneğindeki görüntüsü

Elemana ilk olarak %30 eksenel yük oranına karşılık gelen 675 kN eksenel yük verilmiş ve bu değer deney sonuna kadar ± 20 kN sapma olacak şekilde sabitlenmiştir. Daha sonra elemanın üstündeki kiriş uçlarına Çizelge 4.8'deki gibi ötelenmeler uygulanmıştır. Her bir ötelenme oranı için tersinir-tekrarlanır şekilde 3 çevrim yapılmıştır. Elemanın eğilme kapasitesinde yaklaşık %20 düşüş olana kadar deneye devam edilmiştir.

Çizelge 4.8. $\theta / \Delta = 0$ oranı için kiriş uçlarına uygulanan ötelenme miktarları

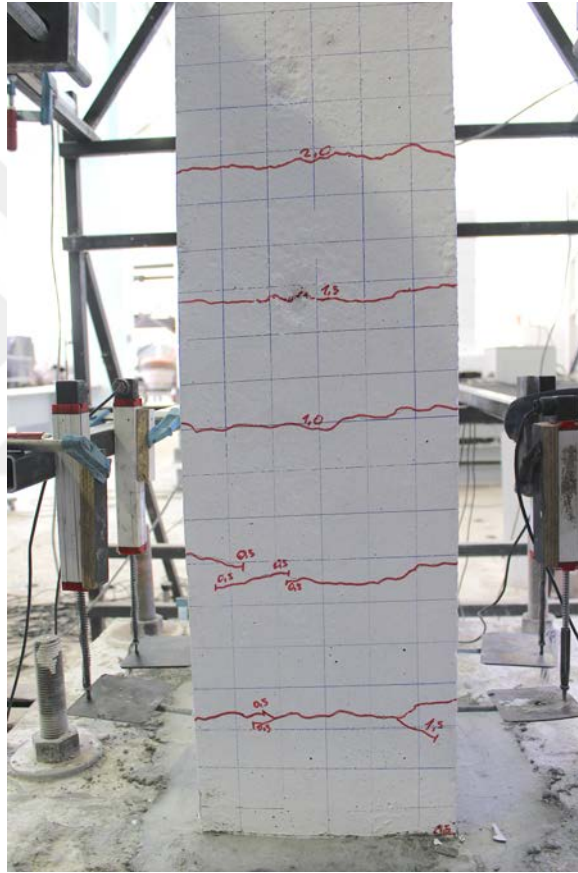
Ötelenme Oranı (%)	Kiriş Sağ Ucu (x) (mm)	Kiriş Sol Ucu (y) (mm)	(x+y)/2 (mm)
0.5	6	6	6
1.0	12	12	12
1.5	18	18	18
2.0	24	24	24
2.5	30	30	30
3.0	36	36	36
3.5	42	42	42
4.0	48	48	48
4.5	54	54	54
5.0	5.0	5.0	5.0

Deney elemanında ilk çatlaklar %0.5 ötelenme oranının ilk çevriminde meydana gelmiştir. İlk çatlak genişlikleri 0.1 mm genişliğinde olup, kolon alt bölgesinde eğilme çatlakları şeklinde oluşmuştur (Şekil 4.72).



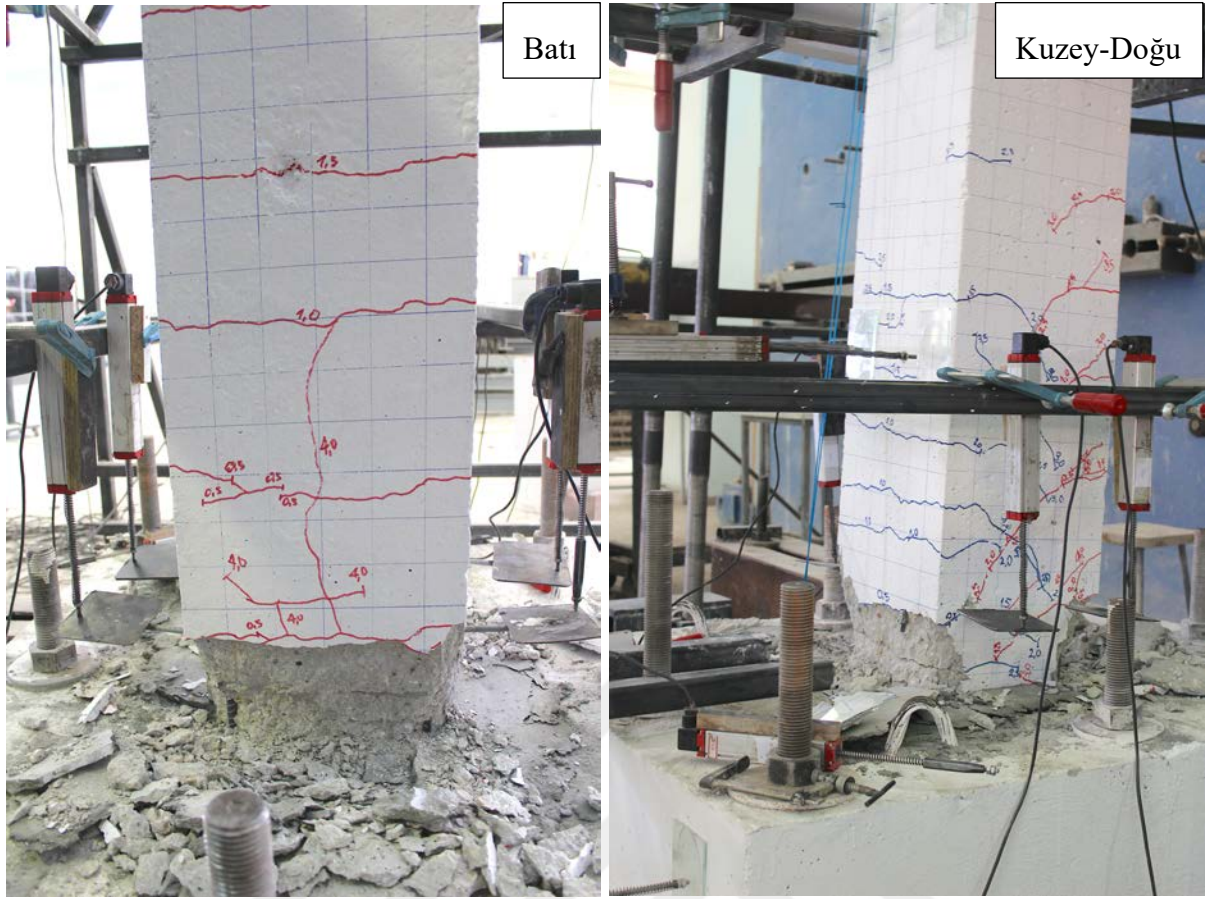
Şekil 4.72. T0-N30-S8 deney elemanında meydana gelen ilk çatlaklar

Elemanda belirli bir akma gözlemlenmemiştir. İtme ve çekme yönünde %2.0 yatay ötelenme oranına kadar yatay yük artarak en büyük değerine ulaşmış ve daha sonra azalmıştır. Elemanın itme yönündeki yatay yük taşıma kapasitesi 100.36 kN iken, çekme yönündeki yatay yük taşıma kapasitesi ise -113.81 kN'dur. Yatay yük %2.0 yatay ötelenme oranından sonra yaklaşık itme yönünde yaklaşık %21 düşerken, çekme yönünde yaklaşık %44 düşmüştür. %2.0 yatay ötelenme oranında, elemanda meydana gelen en büyük çatlak genişliği 0.9 mm eğilme çatlakları olarak ölçülmüştür. Elemana ait %2.0 yatay ötelenme oranındaki görüntüsü Şekil 4.73'te verilmiştir.

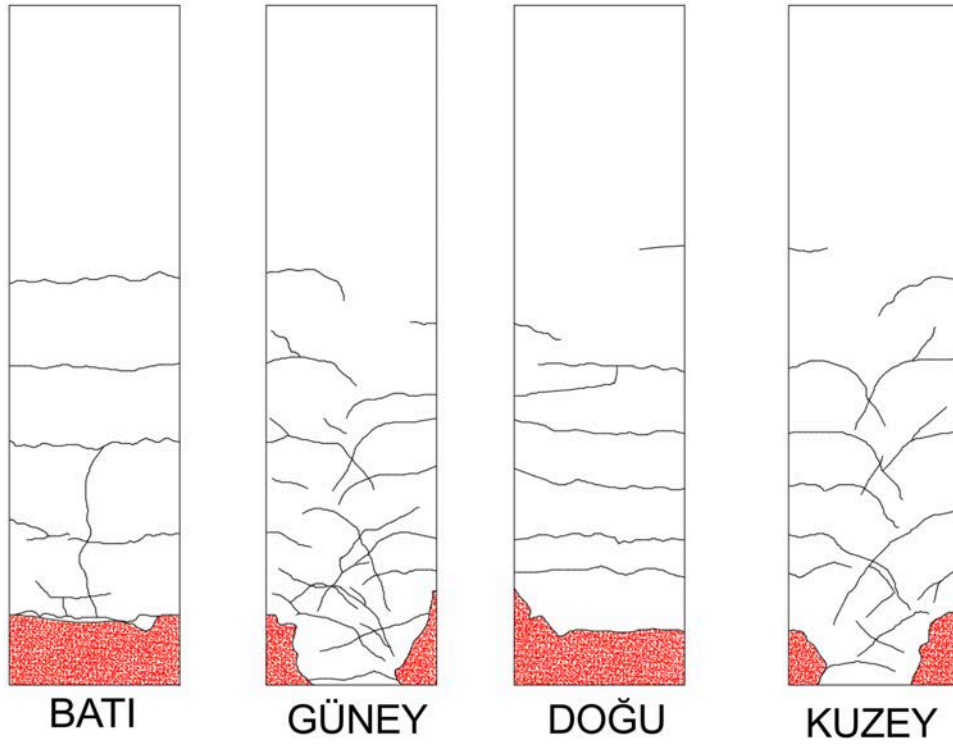


Şekil 4.73. T0-N30-S8 elemanında %2.0'de meydana gelen çatlaklar

Deneye, eleman %5.0 yatay ötelenme oranına ulaşana kadar devam edilmiştir. Bu noktada toplam yatay yük itme yönünde 79.00 kN, çekme yönünde -564.52 kN değerine ulaşmıştır. %2.5 yatay ötelenme oranında kabuk beton dökülmeye başlamıştır. Deney sonunda elemanda meydana gelen plastik mafsallık uzunluğu 200 mm olarak ölçülmüştür. Boyuna donatılarda burkulma gözlemlenmemiştir. Elemana ait deney sonu görüntüsü Şekil 4.74'te, çatlak görüntüsü ise Şekil 4.75'te verilmiştir.



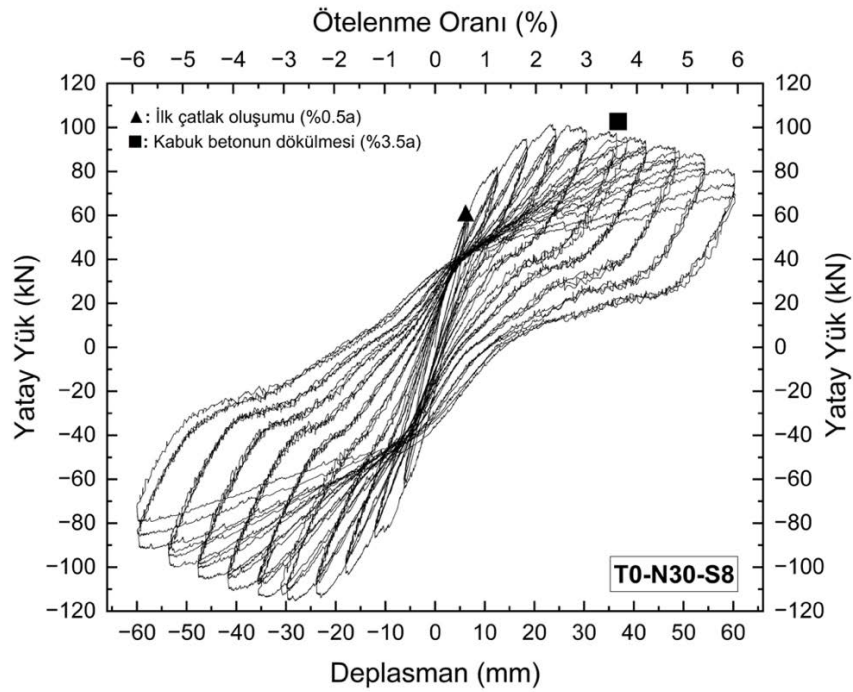
Şekil 4.74. T0-30-S8 elemanın deney sonu görüntüsü



Şekil 4.75. T0-N30-S8 elemanında oluşan çatlaklar

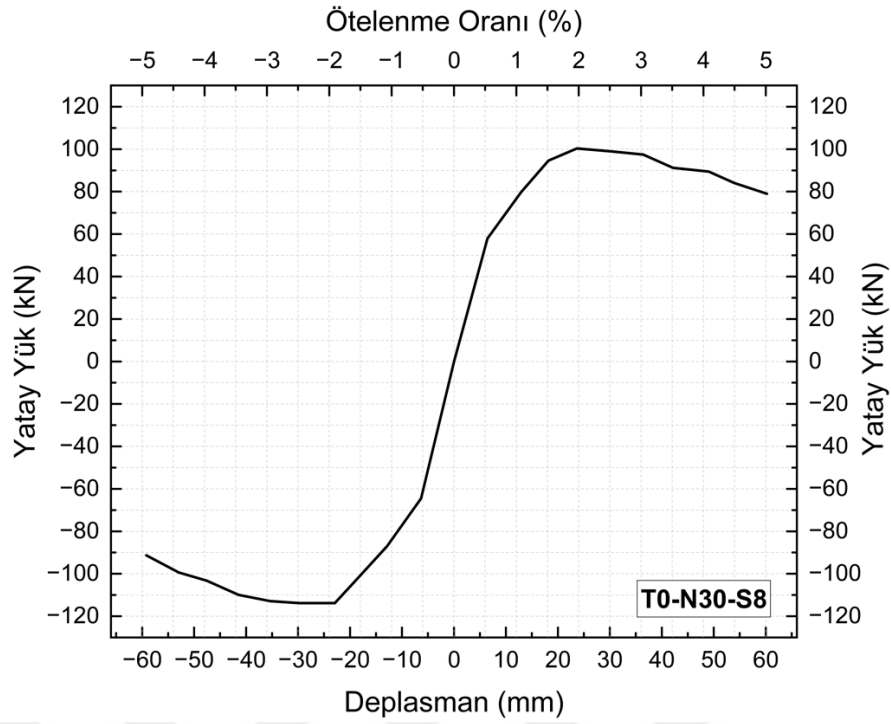
T0-N30-S8 elemanı deney sonuna kadar yük taşımaya devam etmiştir. Eğilme çatlakları ile birlikte kesme çatlakları da oluşmuştur. %2.0 yatay ötelenme oranına kadar oluşan çatlaklar elemanın orta alt uzunluğu boyunca oluşurken bu değerden sonra mesnet bölgesindeki mevcut çatlakların genişlikleri artmış ve yeni çatlaklar oluşmuştur. Kabuk beton daha çok elemanın yüzeyinde dökülmüştür.

T0-N30-S8 elemanının davranışını belirlemek için yapılan deneye ait sayısal veriler işlenerek çeşitli grafikler çizilmiştir. Elemana ait Yatay Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.76'da verilmiştir. Bu grafik çizilirken kiriş uçlarına verilen iki yatay yükün toplamı ile elemanın üst orta noktasının yatayda yaptığı deplasman değerleri kullanılmıştır.

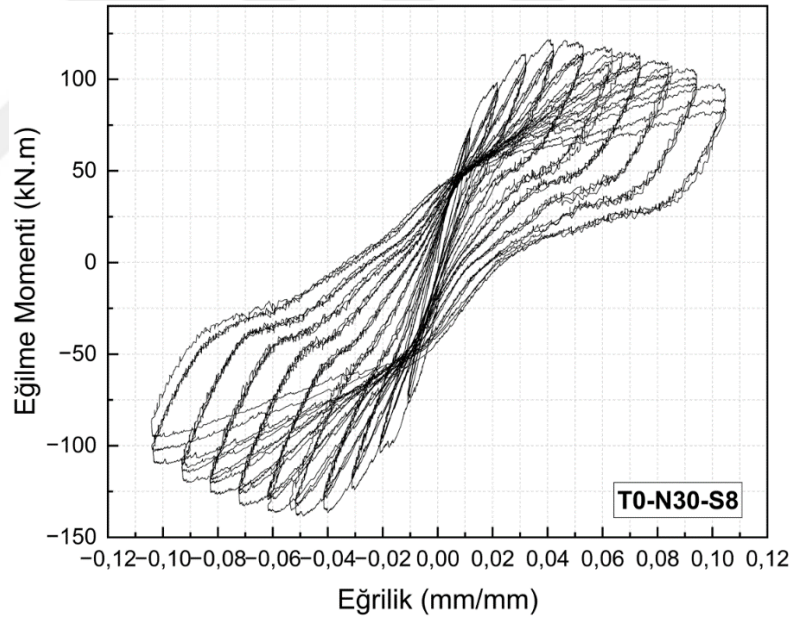


Şekil 4.76. T0-N30-S8 elemanına ait yatay yük-deplasman grafiği

Deney tersinir-tekrarlanır ve 3 çevrim olacak şekilde yapıldığı için, davranışın daha iyi anlaşılabilmesi için Zarf Eğrisi Grafiği çizilmiştir (Şekil 4.77). Bu grafik çizilirken Yatay Yük-Deplasman grafiğindeki ilk çevrimlerin son noktadaki değerleri dikkate alınmıştır. İtme yönündeki akma noktası olarak 15.5 mm deplasman değeri kabul edilirken, %20 kapasite kaybına denk gelen deplasman değeri olarak 60 mm kabul edilmiştir. Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=60/15.5=3.9$ olarak tespit edilmiştir. Çekme yönündeki akma noktası olarak 12 mm deplasman değeri kabul edilirken, %20 kapasite kaybına denk gelen deplasman değeri olarak 59 mm kabul edilmiştir. Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=59/12=4.9$ olarak tespit edilmiştir. Elemana ait Eğilme Momenti-Eğrilik Grafiği ise Şekil 4.78'de verilmiştir.

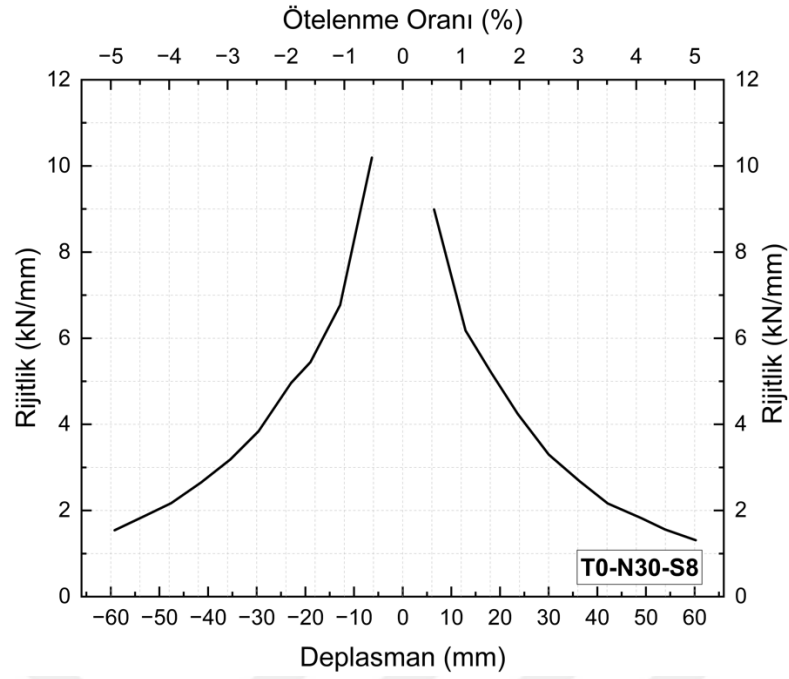


Şekil 4.77. T0-N30-S8 elemanına ait zarf eğrisi grafiği



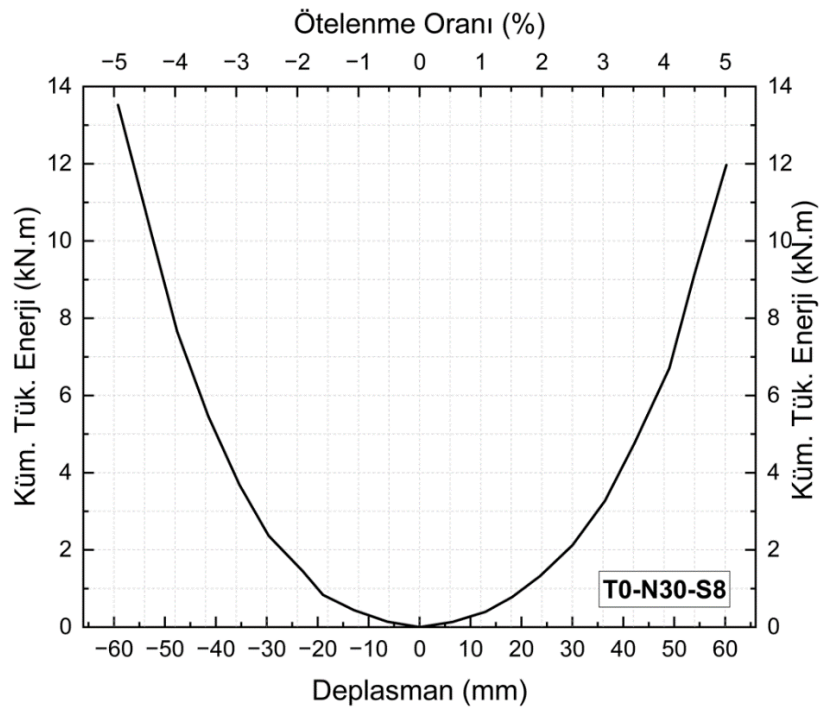
Şekil 4.78. T0-N30-S8 elemanına ait eğilme momenti-eğrilik grafiği

Deneyssel çalışma boyunca ilk çevrimlerde elemana uygulanan her bir toplam yatay yük ile elemanda meydana gelen deplasman değerleri oranlanarak rijitlik değerleri bulunmuştur. Zarf Eğrisi değerleri kullanılarak oluşturulan Rijitlik-Yatay Ötelenme Oranı Grafiği Şekil 4.63'te verilmiştir.



Şekil 4.79. T0-N30-S8 elemanına ait rijitlik grafiği

Elemana ait yük-deplasman grafiğinin altında kalan alanlar, her bir yatay ötelenme oranı için hesaplanmış ve tüketilen enerji değerleri bulunmuştur. Bu tüketilen enerji değerleri her bir yatay ötelenme oranında bir önceki yatay ötelenme oranındakilerle toplanarak kümülatif tüketilen enerji grafiği çizilmiştir (Şekil 4.80).



Şekil 4.80. T0-N30-S8 elemanına ait kümülatif tüketilen enerji grafiği

4.1.9. M0-N20-S8

Bu deney elemanı, eksenel dönme/yatay ötelenme oranı $\theta/\Delta=\infty$, eksenel yük oranı %20 ve enine donatı aralığı 80 mm'dir. Elemanın deney düzeneğindeki görüntüsü Şekil 4.81'de verilmiştir.



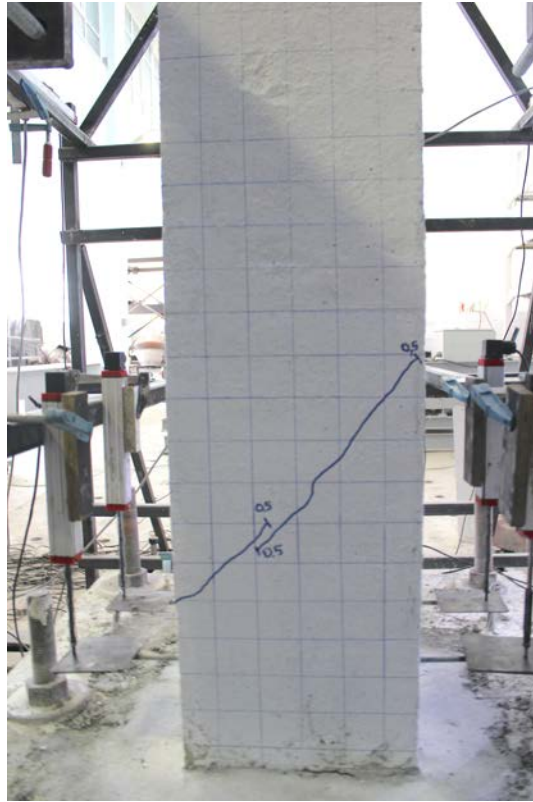
Şekil 4.81. M0-N20-S8 deney elemanının düzenekteki görüntüsü

Elemana ilk olarak %20 eksenel yük oranına karşılık gelen 450 kN eksenel yük verilmiş ve bu değer deney sonuna kadar ± 20 kN sapma olacak şekilde sabitlenmiştir. Daha sonra elemanın üstündeki kiriş uçlarına Çizelge 4.9'daki gibi ötelenmeler uygulanmıştır. Her bir ötelenme oranı için tersinir-tekrarlanır şekilde 3 çevrim yapılmıştır.

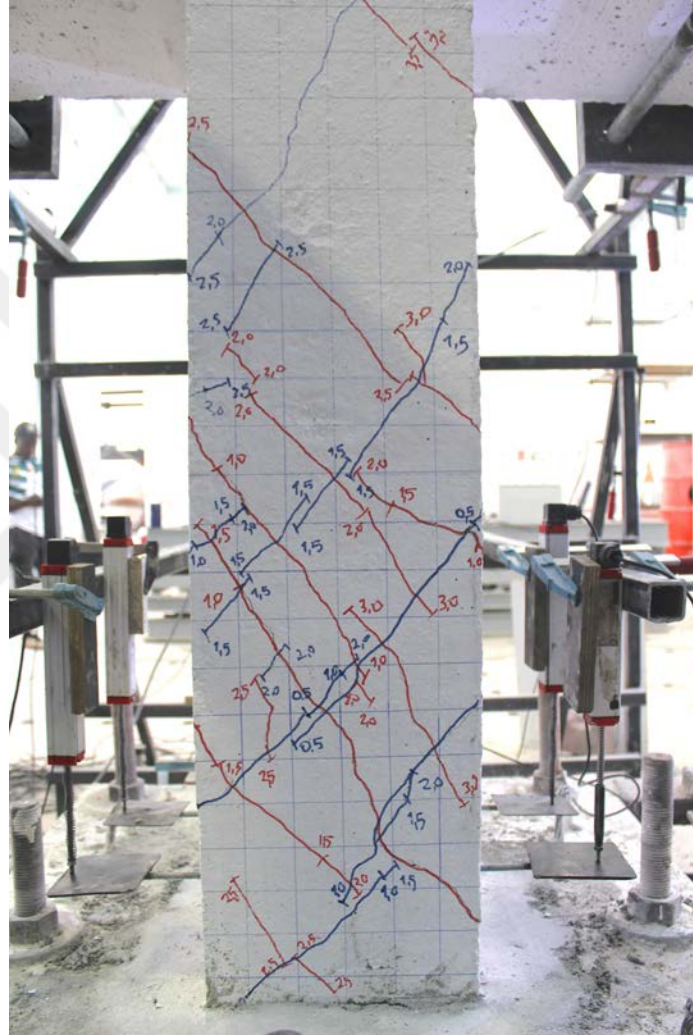
Çizelge 4.9. $\theta / \Delta = \infty$ oranı için kiriş uçlarına uygulanan ötelenme miktarları

Eksenel Dönme (rad)	Kiriş Sağ Ucu (x) (mm)	Kiriş Sol Ucu (y) (mm)	(x+y)/2 (mm)
0.005	3	-3	0
0.010	6	-6	0
0.015	9	-9	0
0.020	12	-12	0
0.025	15	-15	0
0.030	18	-18	0
0.035	21	-21	0
0.040	24	-24	0
0.045	27	-27	0
0.050	30	-30	0
0.055	33	-33	0

Deney elemanında ilk çatlaklar -0.005 radyanlık döngünün ilk çevriminde meydana gelmiştir. İlk çatlak genişlikleri 0.4 mm genişliğinde olup, kolon alt bölgesinde burulma çatlakları şeklinde oluşmuştur (Şekil 4.82).

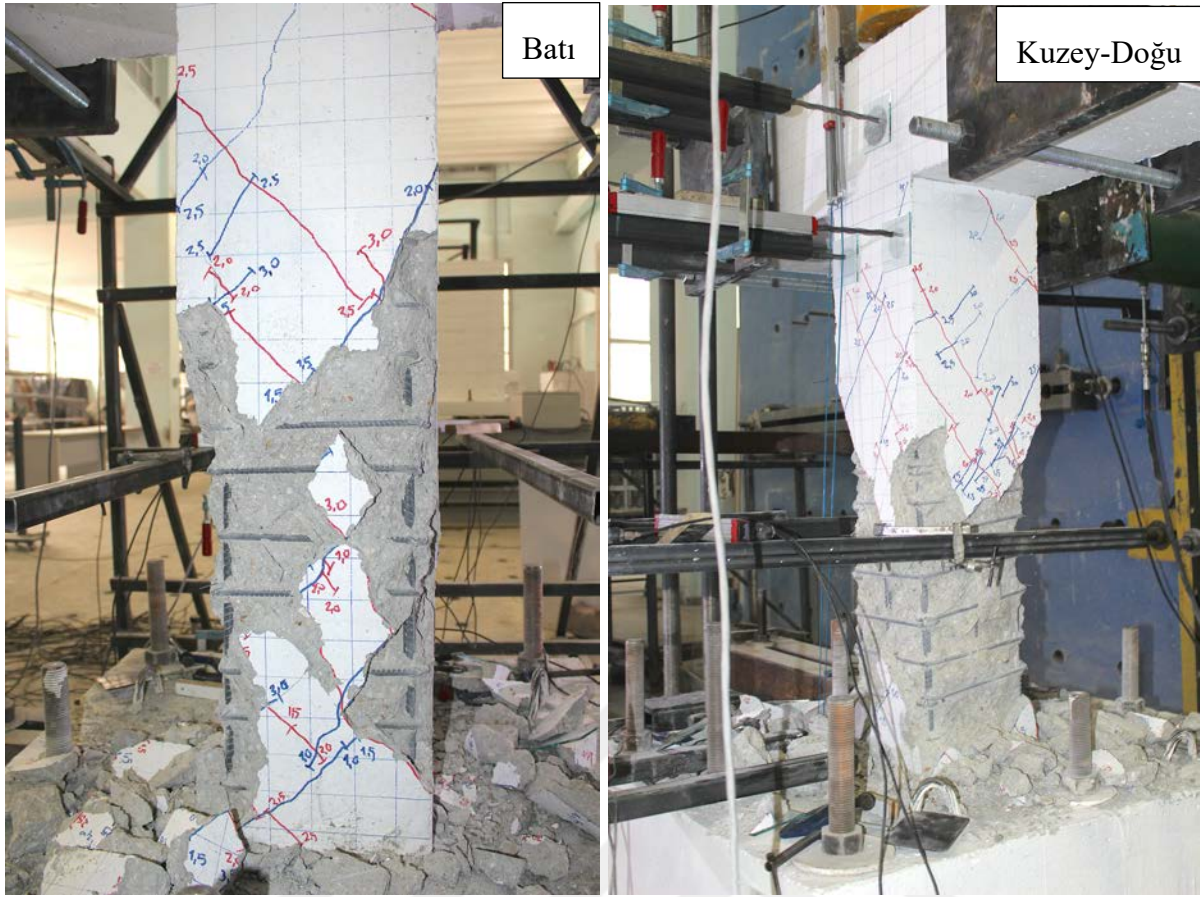
**Şekil 4.82.** M0-N30-S8 deney elemanında meydana gelen ilk çatlaklar

Elemanda belirli bir akma gözlemlenmemiştir. Deney sonuna kadar elemanın burulma dayanımında bir azalma meydana gelmemiştir. Elemanın pozitif dönme yönündeki burulma kapasitesi 143.45 kNm iken, negatif dönme yönündeki burulma kapasitesi -202.01 kNm'dir. 0.030 rad dönme değerinde, elemanda meydana gelen en büyük çatlak genişliği 1.1 mm burulma çatlağı olarak ölçülmüştür. Elemana ait 0.030 rad dönmedeki görüntüsü Şekil 4.83'te verilmiştir.

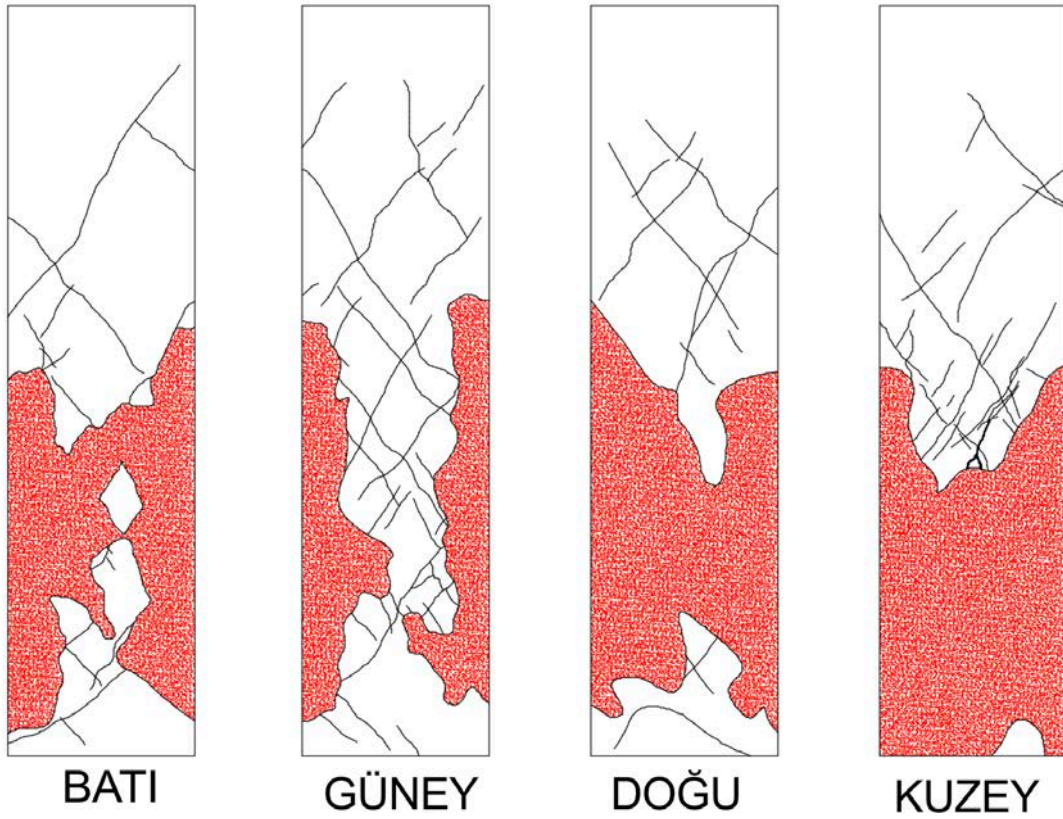


Şekil 4.83. M0-N20-S8 elemanında %2.0'de meydana gelen çatlaklar

Deneye, elemanda 0.055 rad dönme değerine ulaşana kadar devam edilmiştir. Bu noktada elemanda oluşan pozitif dönme yönündeki burulma momenti 143.45 kNm iken, negatif dönme yönündeki burulma momenti -202.01 kNm'dir. 0.035 rad dönme değerinde kabuk beton dökülmeye başlamıştır. Deney sonunda elemanda meydana gelen plastik mafsallık uzunluğu 850 mm olarak ölçülmüştür. Boyuna donatılarda burkulma gözlemlenmemiştir. Elemana ait deney sonu görüntüsü Şekil 4.84'te, çatlak görüntüsü ise Şekil 4.85'te verilmiştir.



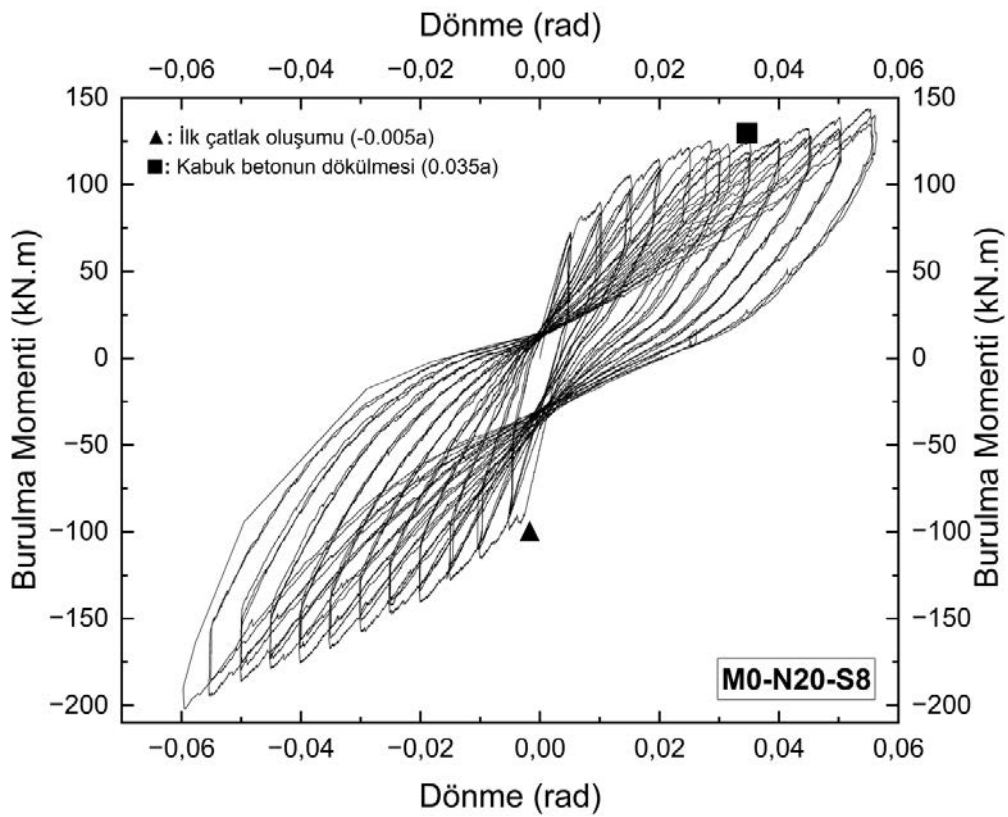
Şekil 4.84. M0-20-S8 elemanın deney sonu görüntüsü



Şekil 4.85. M0-N20-S8 elemanında oluşan çatlaklar

M0-N20-S8 elemanı deney sonuna kadar yük taşımaya devam etmiştir. Elemanda sadece burulma çatlakları oluşmuştur. 0.020 rad dönme değerine kadar oluşan çatlaklar elemanın orta alt uzunluğu boyunca oluşurken bu değerden sonra mevcut çatlakların genişlikleri artarken kolon orta üst bölgesinde yeni çatlaklar oluşmuştur. Kabuk beton elemanın tüm yüzeyinde dökülmüştür.

M0-N20-S8 elemanının davranışını belirlemek için yapılan deneye ait sayısal veriler işlenerek Burulma Momenti-Dönme grafiği çizilmiştir (Şekil 4.86). Bu grafik çizilirken kiriş uçlarına verilen iki yatay yükün farkının aralarındaki mesafeyle çarpılarak bulunan burulma momenti değeri ile kiriş uçlarında oluşan deplasman değerlerinin farklarının aralarındaki mesafeye bölünmesi ile elde edilen dönme değerleri kullanılmıştır.

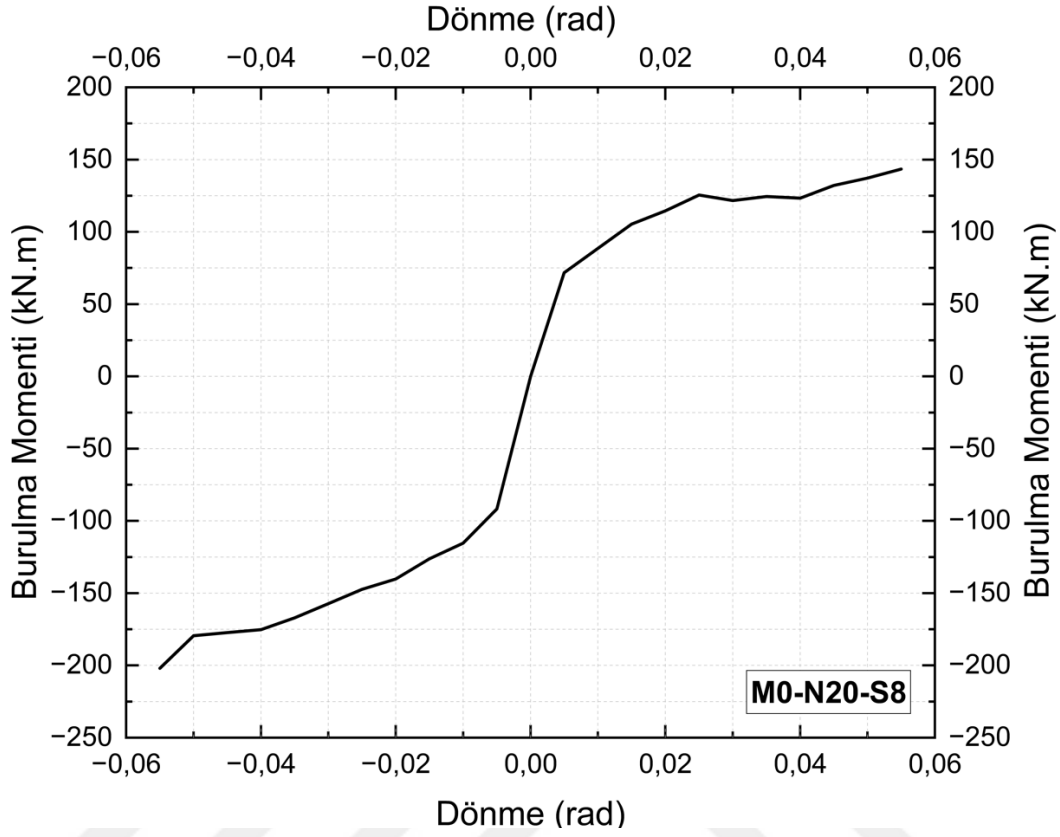


Şekil 4.85. M0-N20-S8 elemanına ait burulma momenti-dönme grafiği

Deney tersinir-tekrarlanır ve 3 çevrim olacak şekilde yapıldığı için, davranışın daha iyi anlaşılabilmesi için Zarf Eğrisi Grafiği çizilmiştir (Şekil 4.86). Bu grafik çizilirken Burulma Momenti-Dönme grafiğindeki ilk çevrimlerin son noktadaki değerleri dikkate alınmıştır. İtme yönündeki akma noktası olarak 0.021 rad dönme değeri kabul edilirken, nihai dönme değeri olarak 0.055 rad dönme değeri kabul edilmiştir. Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=0.055/0.021=2.6$ olarak tespit edilmiştir. Çekme yönündeki akma noktası olarak 0.038 rad

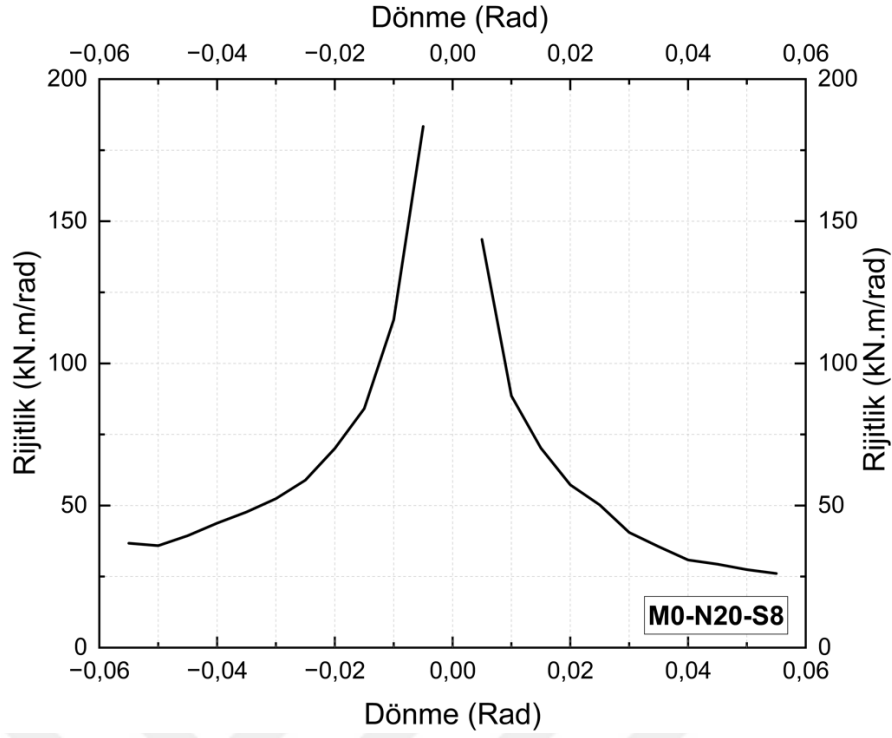
dönme değeri kabul edilirken, nihai dönme değeri olarak 0.055 rad dönme değeri kabul edilmiştir.

Bu durumda elemana ait süneklik oranı $\mu=0.055/0.038=1.4$ olarak tespit edilmiştir.



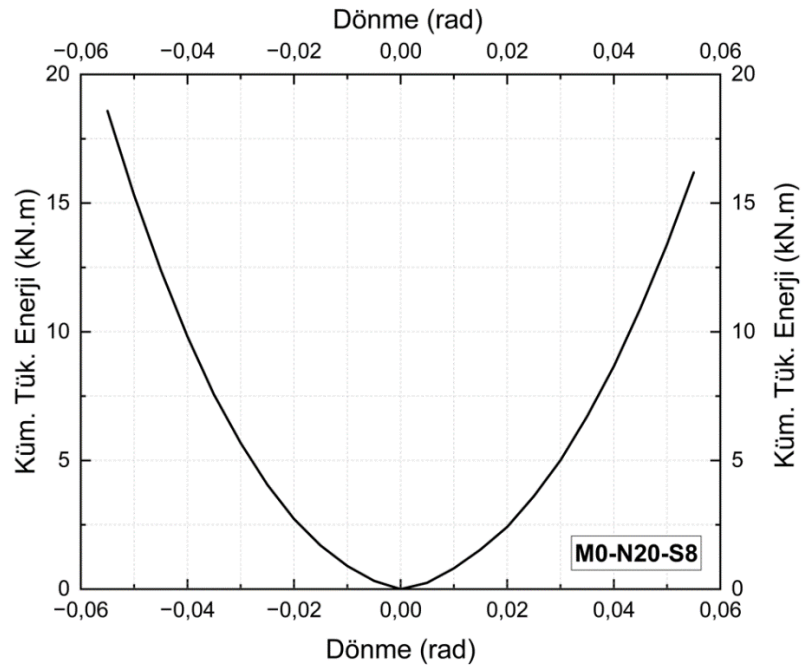
Şekil 4.86. M0-N20-S8 elemanına ait zarf eğrisi grafiği

DeneySEL çalışma boyunca ilk çevrimlerde elemana uygulanan her bir toplam yatay yük ile elemenda meydana gelen deplasman değeri oranlanarak rijitlik değeri bulunmuştur. Zarf Eğrisi değeri kullanılarak oluşturulan Rijitlik-Dönme Grafiği Şekil 4.87’de verilmiştir.



Şekil 4.87. M0-N20-S8 elemanına ait rijitlik grafiği

Elemana ait yük-deplasman grafiğinin altında kalan alanlar, her bir yatay ötelenme oranı için hesaplanmış ve tüketilen enerji değerleri bulunmuştur. Bu tüketilen enerji değerleri her bir yatay ötelenme oranında bir önceki yatay ötelenme oranındakilerle toplanarak kümülatif tüketilen enerji grafiği çizilmiştir (Şekil 4.88).



Şekil 4.88. M0-N20-S8 elemanına ait kümülatif tüketilen enerji grafiği

4.1.10. M0-N30-S8

Bu deney elemanı, eksenel dönme/yatay ötelenme oranı $\theta/\Delta=\infty$, eksenel yük oranı %30 ve enine donatı aralığı 80 mm'dir. Elemanın deney düzeneğindeki görüntüsü Şekil 4.89'da verilmiştir.



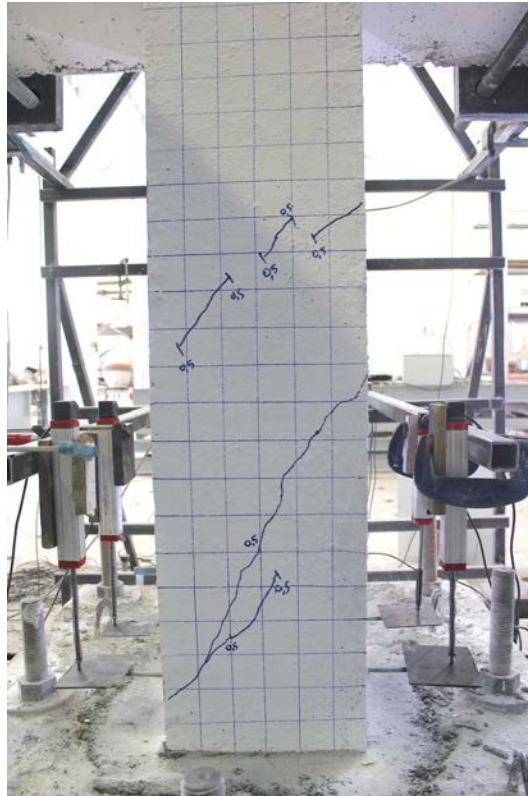
Şekil 4.89. M0-N30-S8 deney elemanının düzenekteki görüntüsü

Elemana ilk olarak %30 eksenel yük oranına karşılık gelen 675 kN eksenel yük verilmiş ve bu değer deney sonuna kadar ± 20 kN sapma olacak şekilde sabitlenmiştir. Daha sonra elemanın üstündeki kiriş uçlarına Çizelge 4.10'daki gibi ötelenmeler uygulanmıştır. Her bir ötelenme oranı için tersinir-tekrarlanır şekilde 3 çevrim yapılmıştır.

Çizelge 4.10. $\theta / \Delta = \infty$ oranı için kiriş uçlarına uygulanan ötelenme miktarları

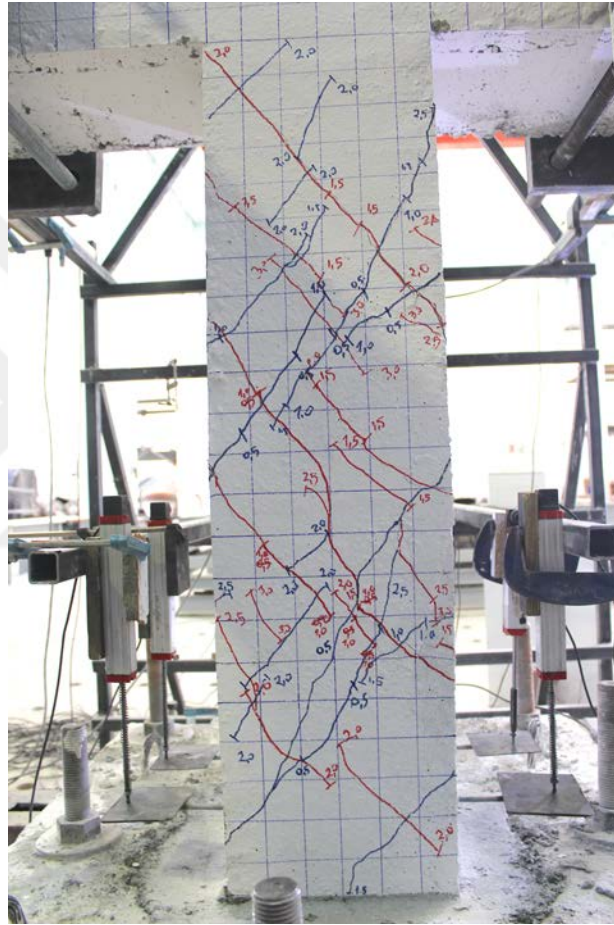
Eksenel Dönme (rad)	Kiriş Sağ Ucu (x) (mm)	Kiriş Sol Ucu (y) (mm)	(x+y)/2 (mm)
0.005	3	-3	0
0.010	6	-6	0
0.015	9	-9	0
0.020	12	-12	0
0.025	15	-15	0
0.030	18	-18	0
0.035	21	-21	0
0.040	24	-24	0
0.045	27	-27	0
0.050	30	-30	0
0.055	33	-33	0
0.060	36	-36	0

Deney elemanında ilk çatlaklar -0.005 radyanlık döngünün ilk çevriminde meydana gelmiştir. İlk çatlak genişlikleri 0.4 mm genişliğinde olup, kolon alt bölgesinde burulma çatlakları şeklinde oluşmuştur (Şekil 4.90).



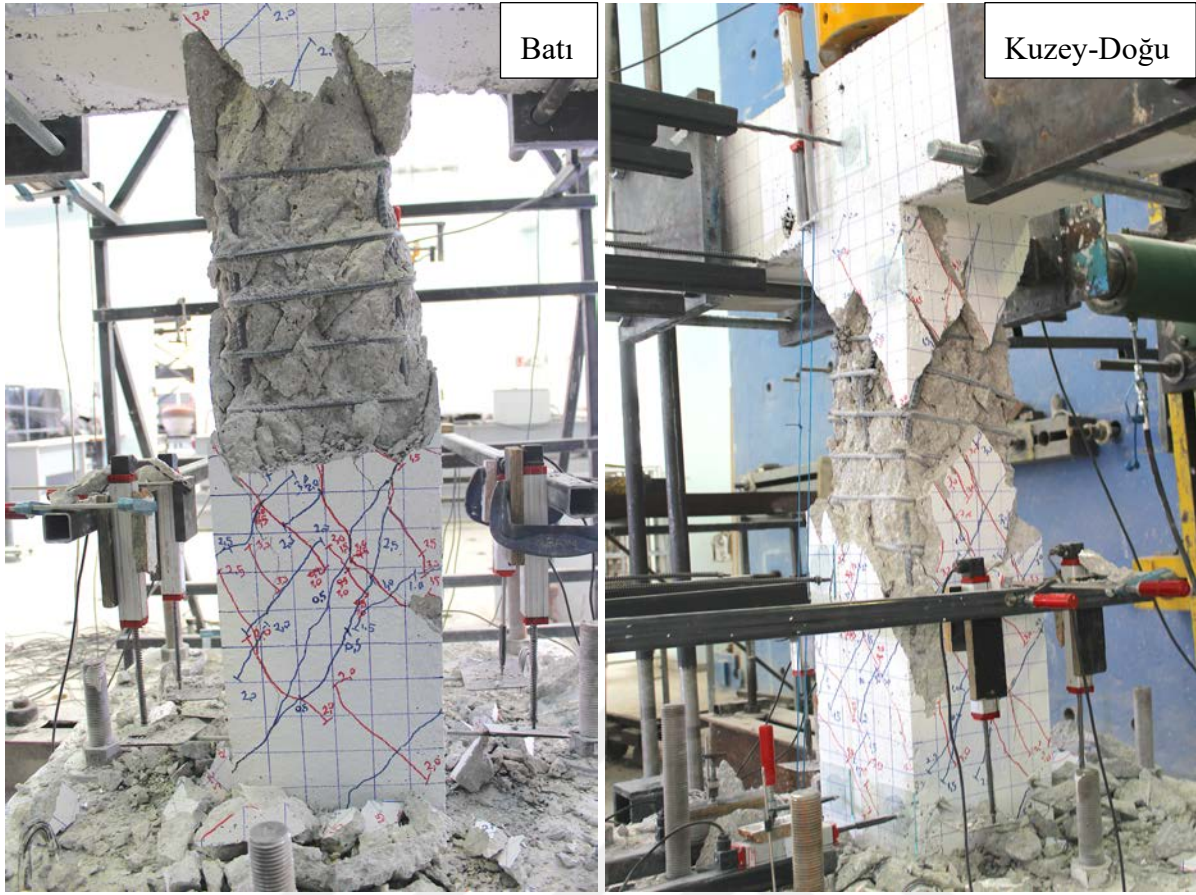
Şekil 4.90. M0-N30-S8 deney elemanında meydana gelen ilk çatlaklar

Elemanda belirli bir akma gözlemlenmemiştir. Pozitif dönme yönünde 0.025 rad değerine kadar elemanda meydana gelen burulma momenti değeri artıp daha sonra azalırken, negatif dönme yönünde elemanda oluşan burulma momenti değeri deney sonuna kadar artmıştır. Elemanın pozitif dönme yönündeki burulma kapasitesi 129.01 kNm iken, negatif dönme yönündeki burulma kapasitesi -170.01 kNm'dir. 0.030 rad dönme değerinde, elemanda meydana gelen en büyük çatlak genişliği 1.5 mm burulma çatlakları olarak ölçülmüştür. Elemana ait 0.030 rad dönmedeki görüntüsü Şekil 4.91'de verilmiştir.

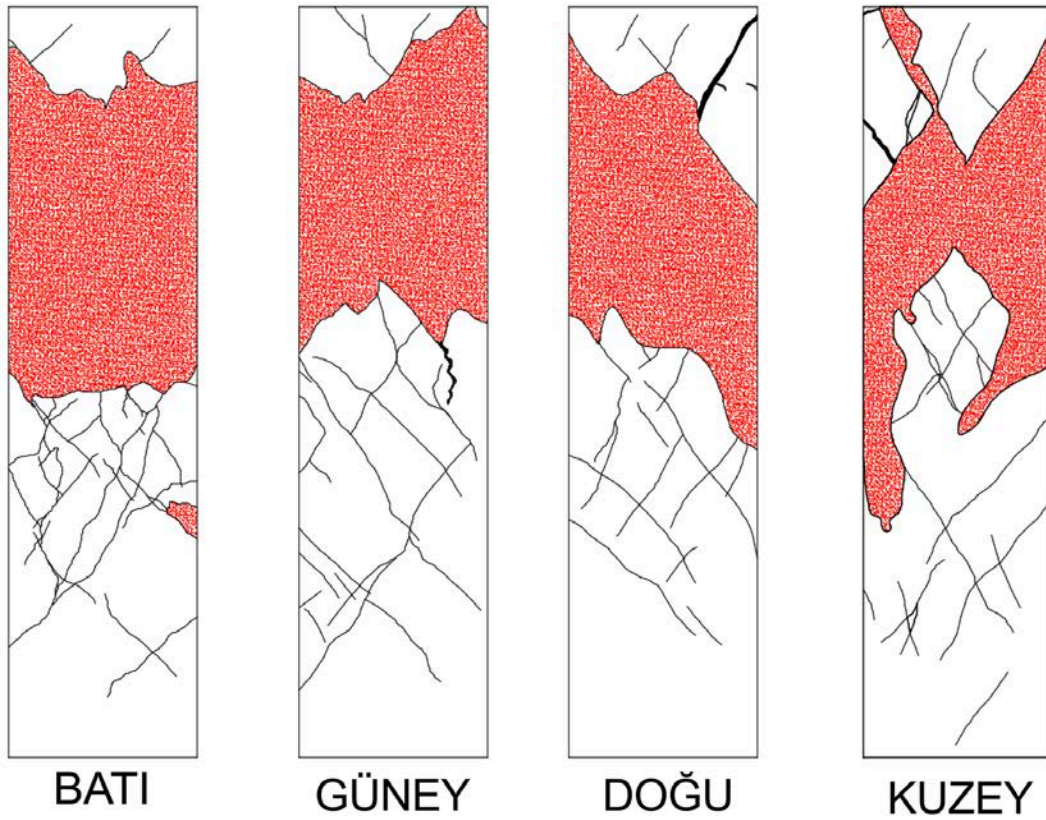


Şekil 4.91. M0-N30-S8 elemanında %2.0'de meydana gelen çatlaklar

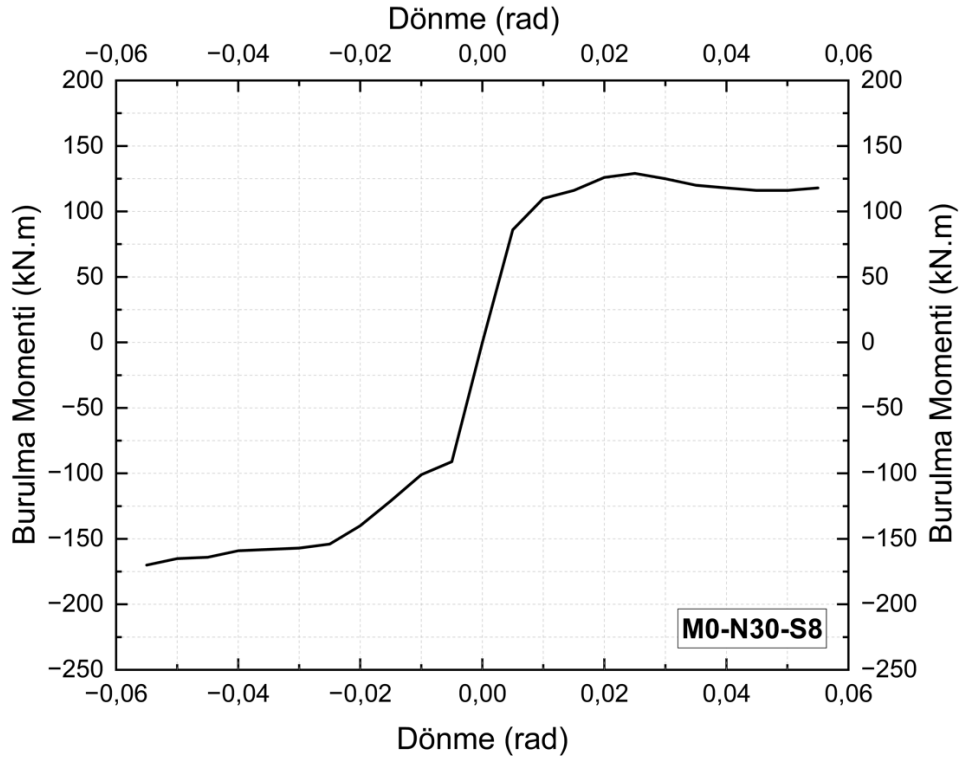
Deneye, elemanda 0.060 rad dönme değerine ulaşana kadar devam edilmiştir. Bu noktada elemanda oluşan pozitif dönme yönündeki burulma momenti 118.01 kNm iken, negatif dönme yönündeki burulma momenti -170.01 kNm'dir. 0.040 rad dönme değerinde kabuk beton dökülmeye başlamıştır. Deney sonunda elemanda meydana gelen plastik mafsallık uzunluğu 700 mm olarak ölçülmüştür. Boyuna donatılarda burkulma gözlemlenmiştir. Elemana ait deney sonu görüntüsü Şekil 4.92'de, çatlak görüntüsü ise Şekil 4.93'te verilmiştir.



Şekil 4.92. M0-30-S8 elemanın deney sonu görüntüsü

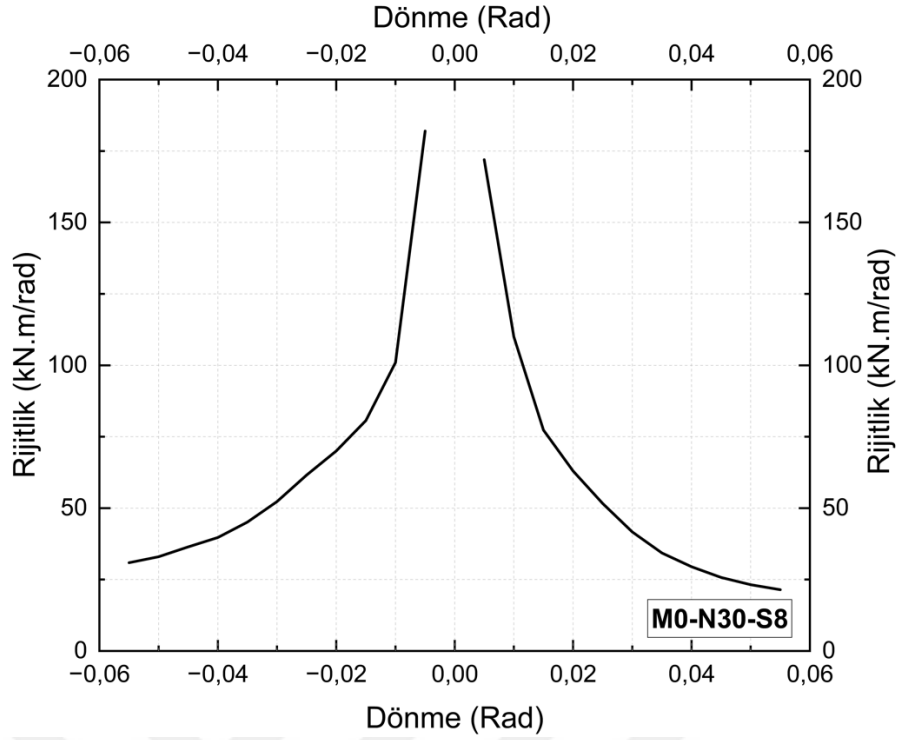


Şekil 4.93. M0-30-S8 elemanında oluşan çatlaklar



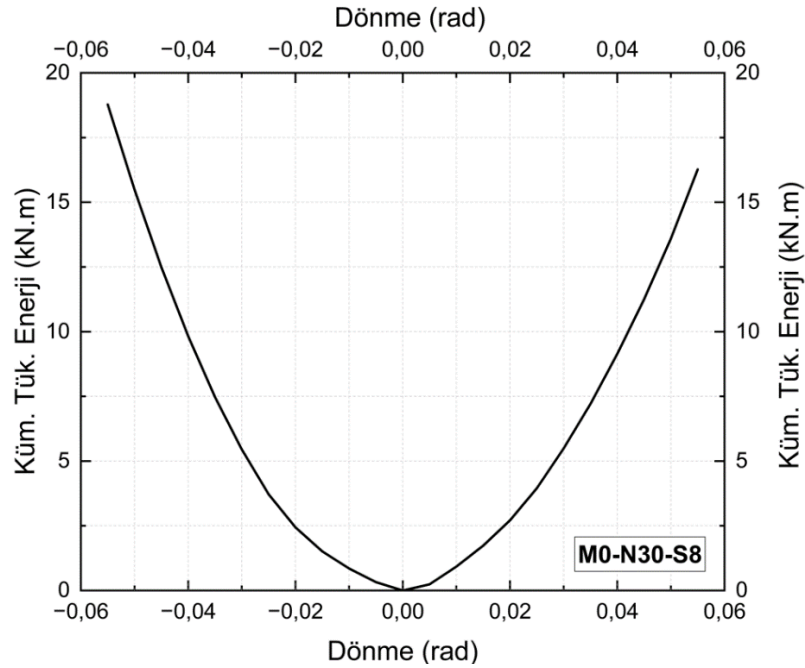
Şekil 4.97. M0-N30-S8 elemanına ait zarf eğrisi grafiği

Deneyisel çalışma boyunca ilk çevrimlerde elemana uygulanan her bir toplam yatay yük ile elemanda meydana gelen deplasman değerleri oranlanarak rijitlik değerleri bulunmuştur. Zarf Eğrisi değerleri kullanılarak oluşturulan Rijitlik-Dönme Grafiği Şekil 4.98’de verilmiştir.



Şekil 4.98. M0-N30-S8 elemanına ait rijitlik grafiği

Elemana ait yük-deplasman grafiğinin altında kalan alanlar, her bir yatay ötelenme oranı için hesaplanmış ve tüketilen enerji değerleri bulunmuştur. Bu tüketilen enerji değerleri her bir yatay ötelenme oranında bir önceki yatay ötelenme oranındakilerle toplanarak kümülatif tüketilen enerji grafiği çizilmiştir (Şekil 4.99).



Şekil 4.99. M0-N30-S8 elemanına ait kümülatif tüketilen enerji grafiği

4.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Toplam 10 adet numune kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmaya ait sonuçlar Çizelge 4.11’de toplu halde verilmiştir. Çizelgede, salt burulma etkisindeki M0-N20-S8 ve M0-N30-S8 elemanlara ait sonuçlar verilmemiştir. Bunun nedeni kıyaslama yaparken eğilme davranışının incelenmesidir. Salt burulma etkisinde ise bu davranış gözlemlenememektedir.

Tez çalışması kapsamında eksenel yük oranı, dönme/yatay ötelenme oranı ve enine donatı aralığı olmak üzere 3 farklı değişken belirlenmiş ve buna göre deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarının daha iyi yorumlanabilmesi amacıyla numuneler 3 farklı gruba ayrılarak değerlendirilmiştir. Her bir değişkene bağlı olarak gruplandırılan numunelere ait bilgiler Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Karşılaştırılan numunelere ait gruplar

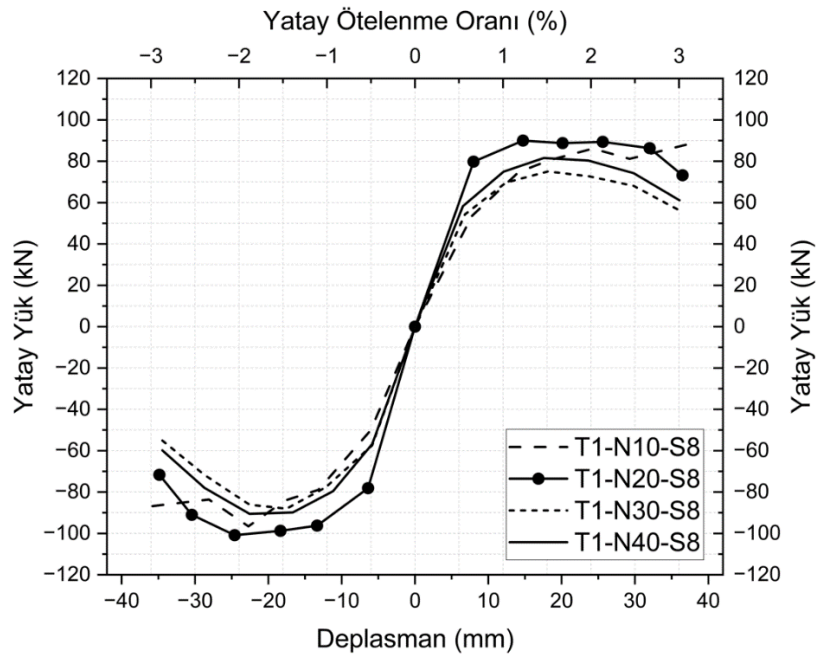
Numune	Yatay Yük Kapasitesi (kN) İtme/Çekme	%0.2 Yatay Ötelenme Oranındaki Çatlak Genişliği (mm) Eğilme/Kesme	Akma Deplasmanı (mm)		Nihai Deplasman (mm)		Süneklik		Enerji Tüketim Kapasitesi (kN.m)
			İtme	Çekme	İtme	Çekme	İtme	Çekme	
T1-N10-S8	86.11/-96.55	1.6/1.1	13.1	-12	36.0	-36.0	2.75	3.00	6.15
T1-N20-S8	89.95/-101.85	3.5/0.8	9.1	-8.1	36.0	-35.2	3.95	4.34	6.19
T1-N30-S8	75.05/-87.98	1.4/0.6	9.5	-9.5	36.0	-35.1	3.79	3.69	4.59
T1-N40-S8	81.58/-90.53	1.5/0.8	9.7	-10.1	36.0	-35.1	3.71	3.47	4.92
T2-N20-S8	70.41/-74.49	1.2/2.8	8.2	-7.0	21.5	-21.0	2.62	3.00	1.41
T1-N30-S16	90.07/-96.42	Çatlak genişliği>5	11.3	-8.1	24.0	-23.2	2.12	2.86	1.85
T0-N20-S8	89.98/-91.69	1.4/0	10.5	-10.8	48.0	-47.5	4.57	4.42	6.25
T0-N30-S8	100.36/-113.81	0.9/0	10.9	-11.1	59.1	-59.0	5.42	5.31	13.54

Çizelge 4.12. Karşılaştırılan numunelere ait gruplar

Grup No	Değişken Etkisi	Numune			
I	Eksenel yük oranı	T1-N10-S8	T1-N20-S8	T1-N30-S8	T1-N40-S8
II	Dönme/yatay ötelenme oranı		T1-N20-S8	T2-N20-S8	
III	Enine donatı aralığı		T1-N30-S8	T1-N30-S16	

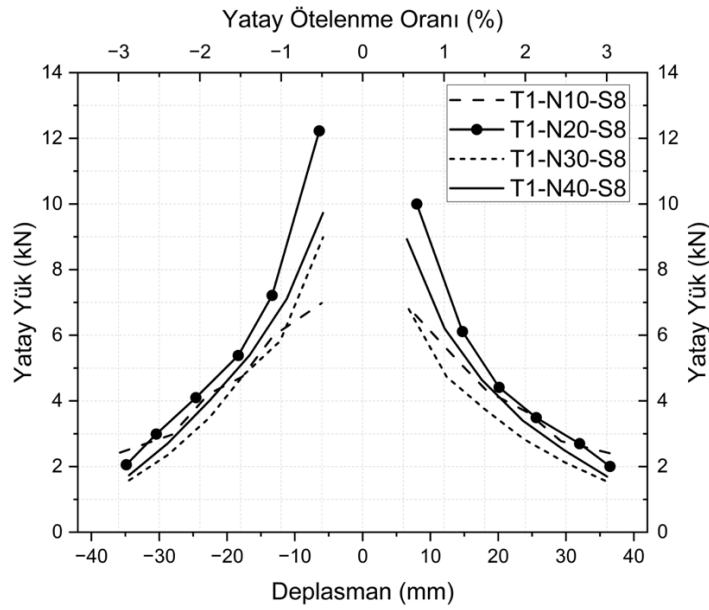
4.2.1. Eksenel yük oranının kolon davranışına etkisi

Eksenel yük oranının kolon davranışına etkisini belirlemek amacıyla Çizelge 4.12'deki I. Grup elemanları birbirleri ile kıyaslanmıştır. I. Grup elemanlarına ait Zarf Eğrisi grafiği Şekil 4.100'de verilmiştir. En büyük yatay yük taşıma kapasitesine sahip eleman T1-N20-S8 olurken, en az yük taşıma kapasitesine sahip eleman T1-N30-S8 olmuştur. T1-N10-S8 elemanı referans kabul edilerek yük taşıma kapasiteleri kıyaslanırsa, T1-N20-S8 %102, T1-N30-S8 %85, T1-N40-S8 %92 yatay yük taşıma kapasitesine sahiptir. Genel olarak %20 eksenel yük oranına kadar yatay yük taşıma kapasitesi artmış, %30'dan sonra azalmış, %40'ta ise tekrar artmıştır.



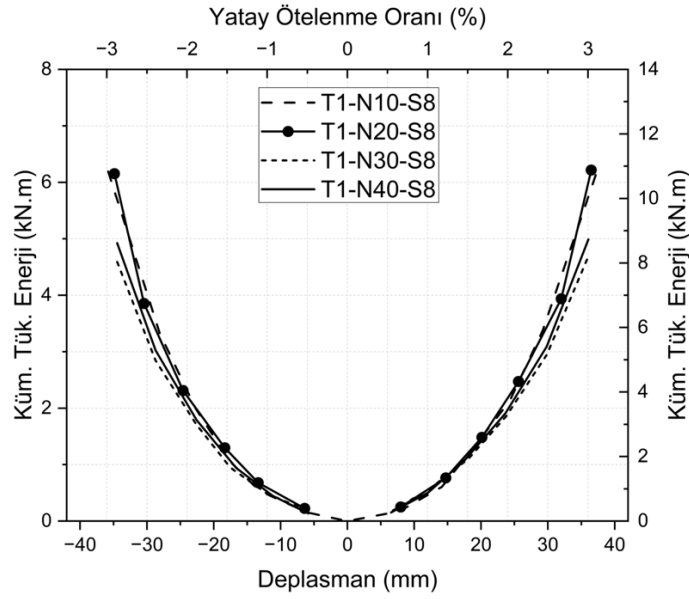
Şekil 4.100. I. gruba ait zarf eğrisi grafiği

Eksenel yük oranının, kolonların eğilme rijitliğine etkisini belirlemek amacıyla I. Grup'taki elemanlara ait Rijitlik Grafiği Şekil 4.101'de verilmiştir. En büyük başlangıç rijitliğine sahip eleman T1-N20-S8 olurken, en düşüğe sahip eleman ise T1-N10-S8 olmuştur. T1-N10-S8 elemanı referans kabul edilerek başlangıç rijitliği değerleri kıyaslanırsa, T1-N20-S8 %151, T1-N30-S8 %102, T1-N40-S8 %135 başlangıç rijitliği kapasitesine sahiptir. Genel olarak %20 eksenel yük oranına kadar başlangıç rijitliği kapasitesi artmış, %30'dan sonra azalmış, %40'ta ise tekrar artmıştır.



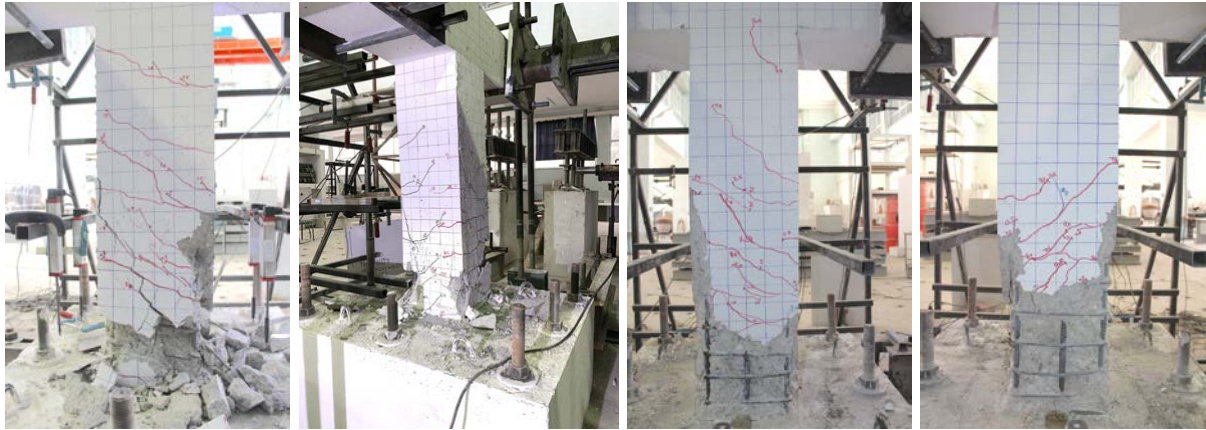
Şekil 4.101. I. gruba ait rijitlik grafiği

Eksenel yük oranının kolonlarda tüketilen enerjiye etkisini belirlemek amacıyla I. Grup'taki elemanlara ait Kümülatif Tüketilen Enerji Grafiği Şekil 4.102'de verilmiştir. En büyük enerji tüketimine sahip eleman T1-N10-S8 olurken, en düşüğe sahip eleman ise T1-N30-S8 olmuştur. T1-N10-S8 elemanı referans kabul edilerek kümülatif tüketilen enerji değerleri kıyaslanırsa, T1-N20-S8 %99, T1-N30-S8 %75, T1-N40-S8 %80 enerji tüketim kapasitesine sahiptir. Genel olarak %30 eksenel yük oranına kadar tüketilen enerji değeri azalmış, %40'ta artmıştır.



Şekil 4.102. I. gruba ait kümülatif tüketilen enerji grafiği

Eksenel yük oranına bağlı olarak numunelerde meydana gelen hasarlar değişmiştir. Plastik mafsalları boyu T1-N10-S8 elemanında 500 mm, T1-N20-S8 elemanında 350 mm, T1-N30-S8 elemanında 600 mm, T1-N40-S8 elemanında 550 mm olarak oluşmuştur. Tüm plastik mafsallarda eğilme ile birlikte burulma da etkili olmuştur. En uzun plastik mafsalları T1-N30-S8’de oluşurken en kısa plastik mafsalları T1-N20-S8’de oluşmuştur. Genel olarak hasarlar kolonların köşelerinde yoğunlaşmıştır (Şekil 4.103). %0.2 yatay ötelenme oranında T1-N10-S8 numunesinde eğilme çatlakları genişliği 1.6 mm olurken, T1-N20-S8 numunesinde 3.5 mm, T1-N30-S8 numunesinde 1.4 mm, T1-N40-S8 numunesinde 1.5 mm olmuştur. T1-N20-S8 elemanında oluşan plastik mafsalları uzunluğunun, diğer numunelerden az olmasının nedeni, %0.2 yatay ötelenme oranına kadar oluşan çatlakların genişliğinin sürekli artması ve yeni çatlakların oluşmamasıdır.



T1-N10-S8

T1-N20-S8

T1-N30-S8

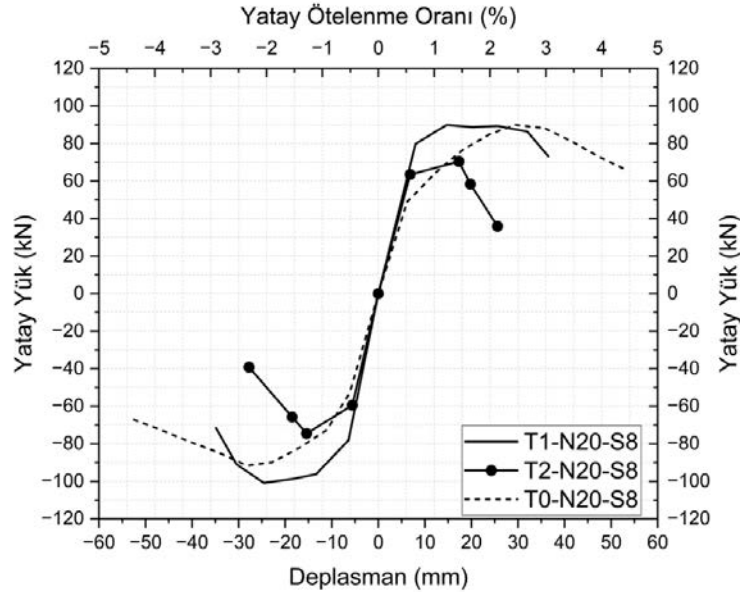
T1-N40-S8

Şekil 4.103. I. gruba ait plastik mafsalları ve hasar görüntüleri

Eksenel yük oranı, burulma etkisindeki kolonların eğilme sünekliği üzerinde de etkili olmuştur. Eğilme sünekliği değerleri T1-N10-S8’de $\mu=2.75$, T1-N20-S8’de $\mu=3.95$, T1-N30-S8’de $\mu=3.79$ ve T1-N40-S8’de $\mu=3.71$ olmuştur. Eksenel yük oranı %20’ye kadar arttıkça elemanların eğilme sünekliği artmış, daha sonra azalmıştır.

4.2.2. Burulmanın kolon davranışına etkisi

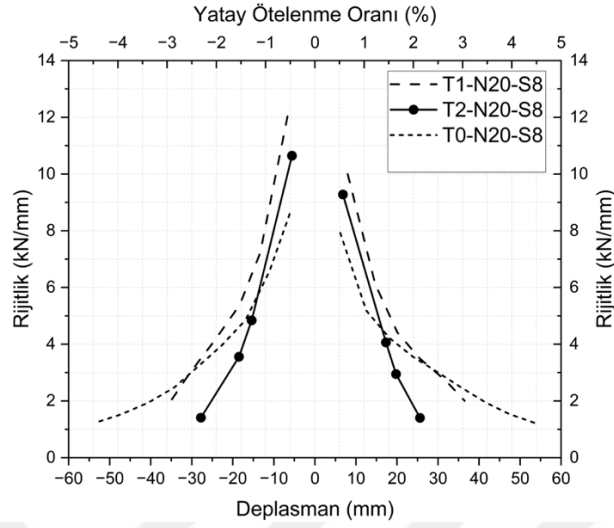
Burulmanın kolon davranışına etkisini belirlemek amacıyla Çizelge 4.12’deki II. Grup elemanları birbirleri ile kıyaslanmıştır. II. Grup elemanlarına ait Zarf Eğrisi grafiği Şekil 4.104’te verilmiştir. En büyük yatay yük taşıma kapasitesine sahip eleman T1-N20-S8 olurken, en az yük taşıma kapasitesine sahip eleman T2-N20-S8 olmuştur. T0-N20-S8 elemanı referans kabul edilerek yük taşıma kapasiteleri kıyaslanırsa, T1-N20-S8 %101, T2-N20-S8 %78 yatay yük taşıma kapasitesine sahiptir. θ/Δ oranı 0 ile 1 kıyaslandığında yatay yük taşıma kapasitesi bakımından çok büyük fark gözlemlenmemişken, bu oran 2’ye çıktığında, yani burulma arttığında, yatay yük taşıma kapasitesinin %22 azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.104. II. gruba ait zarf eğrisi grafiği

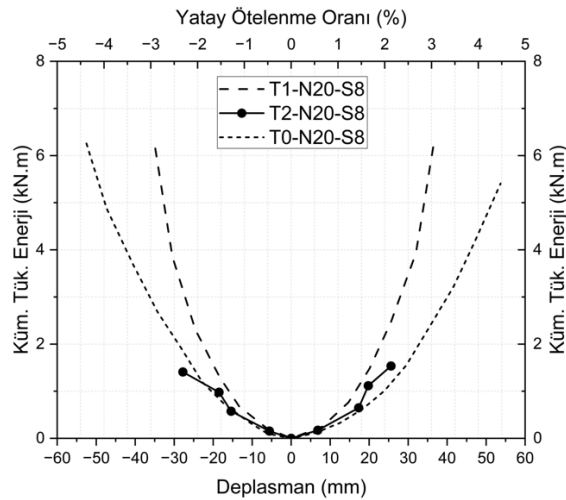
Burulmanın, kolonların eğilme rijitliğine etkisini belirlemek amacıyla II. Grup’taki elemanlara ait Rijitlik Grafiği Şekil 4.105’te verilmiştir. En büyük başlangıç rijitliğine sahip eleman T1-N20-S8 olurken, en düşüğe sahip eleman ise T0-N20-S8 olmuştur. T0-N20-S8 elemanı referans kabul edilerek başlangıç rijitliği değerleri kıyaslanırsa, T1-N20-S8 %126, T2-N20-S8

%117 başlangıç rijitliği kapasitesine sahiptir. Her ne kadar T2-N20-S8 elemanının başlangıç rijitliği T0-N20-S8 elemanının başlangıç rijitliğinden %17 daha fazla olsa da yatay ötelenme oranı arttıkça hızla düşmüştür.



Şekil 4.105. II. gruba ait rijitlik grafiği

Burulmanın kolonlarda tüketilen enerjiye etkisini belirlemek amacıyla II. Grup'taki elemanlara ait Kümülatif Tüketilen Enerji Grafiği Şekil 4.106'da verilmiştir. En büyük enerji tüketimine sahip eleman T1-N20-S8 olurken, en düşüğe sahip eleman ise T2-N20-S8 olmuştur. T0-N20-S8 elemanı referans kabul edilerek kümülatif tüketilen enerji değerleri kıyaslanırsa, T1-N20-S8 %115, T2-N20-S8 %28 enerji tüketim kapasitesine sahiptir. θ/Δ oranı 0 ile 1 kıyaslandığında enerji tüketim kapasitesi bakımından %15'lik bir fark gözlemlenirken, bu oran 2'ye çıktığında, yani burulma arttığında, enerji tüketim kapasitesinin %62 azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.106. II. gruba ait kümülatif tüketilen enerji grafiği

Burulmaya bağılı olarak numunelerde meydana gelen hasarlar değişmiştir. Plastik mafsal boyu T0-N20-S8 elemanında 150 mm, T1-N20-S8 elemanında 350 mm, T2-N20-S8 elemanında 750 mm olarak oluşmuştur. Burulmanın olmadığı T0-N20-S8 elemanında sadece eğilme çatlakları meydana gelirken, burulmanın olduğu T1-N20-S8 ve T2-N20-S8 elemanlarında hem eğilme hem de burulma çatlakları meydana gelmiştir. En uzun plastik mafsal T2-N20-S8’de oluşurken en kısa plastik mafsal T0-N20-S8’de oluşmuştur. Genel olarak hasarlar kolonların köşelerinde yoğunlaşmıştır (Şekil 4.107). %0.2 yatay ötelenme oranında T0-N20-S8 numunesinde eğilme çatlakları genişliği 1.4 mm olurken, T1-N20-S8 numunesinde 3.5 mm, T2-N20-S8 numunesinde 1.2 mm olmuştur. θ/Δ oranı 0’dan 1’e çıktığında eğilme çatlakları genişliği 2.5 kat artmış ve burulmaya bağılı olarak kesme çatlakları da oluşmuştur. θ/Δ oranı 1’den 2’ye çıktığında ise eğilme çatlakları genişliği 0.34 kat azalırken, kesme çatlakları genişliği 3.5 kat artmıştır.

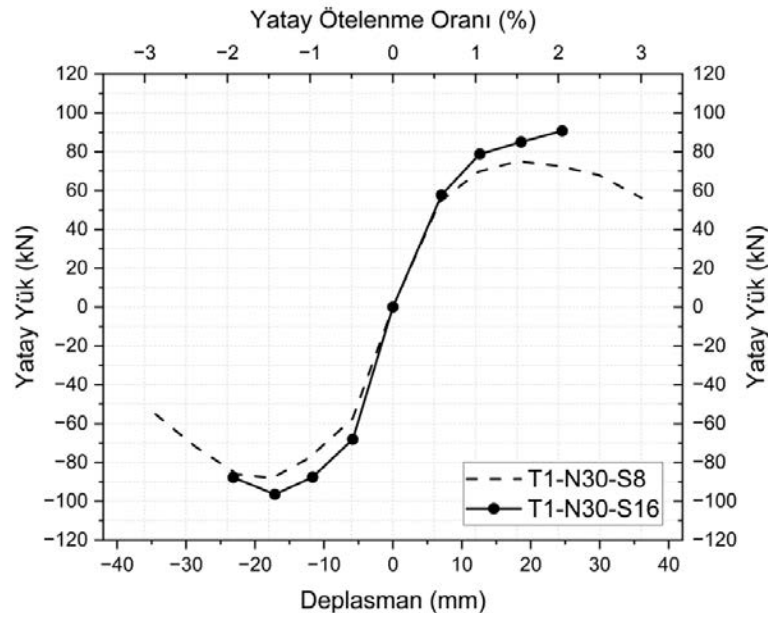


Şekil 4.107. II. gruba ait plastik mafsal ve hasar görüntüleri

Burulma, kolonların eğilme sünekliği üzerinde de etkili olmuştur. Eğilme sünekliği değerleri T0-N20-S8’de $\mu=4.57$, T1-N20-S8’de $\mu=3.95$ ve T2-N20-S8’de $\mu=2.62$ olmuştur. Burulma ile elemanların eğilme sünekliğinin ve yatay ötelenme kapasitelerinin ciddi oranda azaldığı görülmüştür.

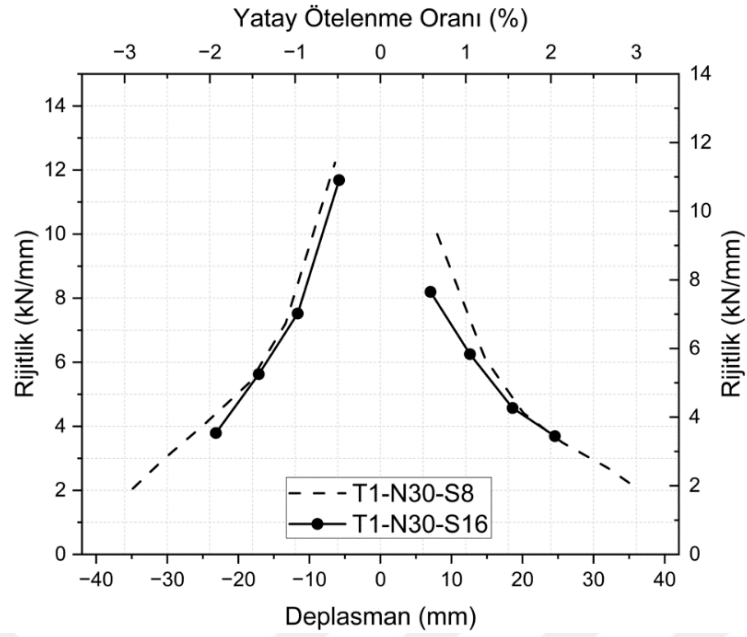
4.2.3. Enine donatı aralığının kolon davranışına etkisi

Enine donatı aralığının kolon davranışına etkisini belirlemek amacıyla Çizelge 4.12'deki III. Grup elemanları birbirleri ile kıyaslanmıştır. III. Grup elemanlarına ait Zarf Eğrisi grafiği Şekil 4.108'de verilmiştir. En büyük yatay yük taşıma kapasitene sahip eleman T1-N30-S16 olurken, en az yük taşıma kapasitesine sahip eleman T1-N30-S8 olmuştur. T1-N30-S8 elemanı referans kabul edilerek yük taşıma kapasiteleri kıyaslanırsa, T1-N30-S16 %120 yatay yük taşıma kapasitesine sahiptir.



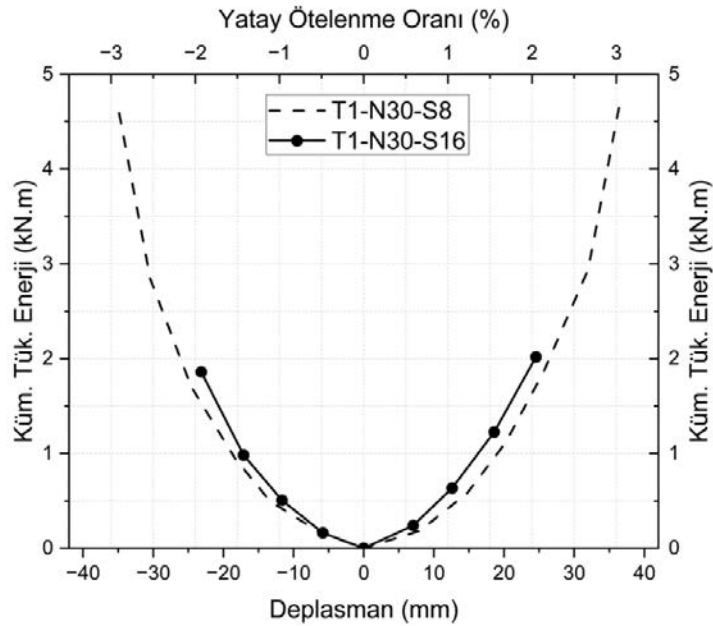
Şekil 4.108. III. gruba ait zarf eğrisi grafiği

Enine donatı aralığının, burulma etkisindeki kolonların eğilme rijitliğine etkisini belirlemek amacıyla III. Grup'taki elemanlara ait Rijitlik Grafiği Şekil 4.109'da verilmiştir. Çekme yönünde iki eleman benzer rijitlik değerlerine sahipken, itme yönünde en büyük başlangıç rijitliğine sahip eleman T1-N30-S8 olurken, en düşüğe sahip eleman ise T1-N30-S16 olmuştur. T1-N30-S8 elemanı referans kabul edilerek başlangıç rijitliği değerleri kıyaslanırsa, T1-N30-S16 %82 başlangıç rijitliği kapasitesine sahiptir.



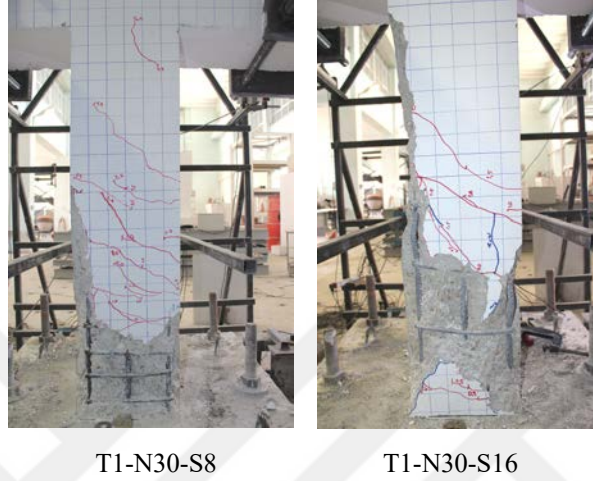
Şekil 4.109. III. gruba ait rijitlik grafiği

Enine donatı aralığının, burulma etkisindeki kolonlarda tüketilen enerjiye etkisini belirlemek amacıyla III. Grup'taki elemanlara ait Kümülatif Tüketilen Enerji Grafiği Şekil 4.110'da verilmiştir. En büyük enerji tüketimine sahip eleman T1-N30-S8 olurken, en düşüğe sahip eleman ise T1-N30-S16 olmuştur. T1-N30-S8 elemanı referans kabul edilerek kümülatif tüketilen enerji değerleri kıyaslanırsa, T1-N30-S16 %43 enerji tüketim kapasitesine sahiptir.



Şekil 4.110. III. gruba ait kümülatif tüketilen enerji grafiği

Enine donatı aralığına bağlı olarak numunelerde meydana gelen hasarlar değişmiştir. Plastik mafsalsal boyu T1-N30-S8 elemanında 600 mm, T1-N30-S16 elemanında 1200 mm olarak oluşmuştur. Her iki elemanda da hem eğilme hem de burulma çatlakları meydana gelmiştir. Genel olarak hasarlar kolonların köşelerinde yoğunlaşmıştır (Şekil 4.111). %0.2 yatay ötelenme oranında T1-N30-S8 numunesinde eğilme çatlakları genişliği 1.4 mm olurken, T1-N30-S16 numunesinde 5.0 mm'den fazla oluşmuştur.



Şekil 4.111. III. gruba ait plastik mafsalsal ve hasar görüntüleri

Enine donatı aralığı, burulma etkisindeki kolonların eğilme sünekliği üzerinde de etkili olmuştur. Eğilme sünekliği değerleri T1-N30-S8'de $\mu=3.79$, T1-N30-S16'da $\mu=2.12$ olmuştur. Enine donatı aralığı arttıkça elemanların eğilme sünekliği azalmıştır.

4.3. Plastik Mafsalsal Boyu Hesabı

Betonarme kolonların sismik performansını değerlendirmede plastik mafsalsal boyu (L_p), kritik bir parametredir. Bu bölümde, farklı eksenel yük oranları (n), dönme/ötelenme oranları ($r=\theta/\Delta$) ve enine donatı aralıkları (s) altında yapılan deneysel çalışmadan elde edilen plastik mafsalsal boyları analiz edilmiş ve ampirik bir tahmin modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model, mevcut literatürdeki yaklaşımlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

4.3.1 Deneysel veriler ve parametreler

Deneylerde, 300 mm $\times$ 300 mm kare kesitli betonarme kolonlar kullanılmıştır. Değişkenler ve seviyeleri Çizelge 4.13'te özetlenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen plastik mafsalsal boyları Çizelge 4.14'te verilmiştir.

Çizelge 4.13. Deneysel Parametreler ve Seviyeleri

Parametre	Sembol	Seviye
Eksenel Yük Oranı	n	0.1, 0.2, 0.3, 0.4
Dönme/Ötelenme Oranı	r	0 (salt eğilme), 1, 2
Enine Donatı Aralığı (mm)	s	80, 160

Çizelge 4.14. Plastik Mafsal Boyu (L_p) Ölçümleri

Numune	n	r	s (mm)	L_p (mm)
T1-N10-S8	0.1	1	80	500
T1-N20-S8	0.2	1	80	350
T1-N30-S8	0.3	1	80	600
T1-N40-S8	0.4	1	80	550
T2-N20-S8	0.2	2	80	750
T1-N30-S16	0.3	1	160	1200
T0-N20-S8	0.2	0	80	150
T0-N30-S8	0.3	0	80	200

4.3.2. Ampirik model geliştirilmesi

Plastik mafsal boyu, eksenel yük oranı (n), dönme/ötelenme oranı (r) ve enine donatı aralığının (s) bir fonksiyonu olarak modellenmiştir. Boyutsuz analiz ve çoklu regresyon yöntemleri kullanılarak aşağıdaki ampirik denklem türetilmiştir (Denklem 4.1):

$$L_p = \alpha \cdot (1 + \beta \cdot r) \cdot (1 + \gamma \cdot n) \cdot \left(\frac{s}{H}\right)^\delta \quad (4.1)$$

Burada:

- $\alpha=0.7H$: Kolon kesiti ile orantılı olacak şekilde plastik mafsal boyu (mm).
- $\beta=1.5$: Dönme/ötelenme oranının (r) etki katsayısı.
- $\gamma=2.0$: Eksenel yük oranının (n) etki katsayısı.
- $\delta=0.8$: Enine donatı aralığının normalize edilmiş etki üssü.
- H: Kolon kesiti uzunluğu (300 mm).
- s: Enine donatı aralığı (80 mm veya 160 mm).

4.3.3. Regresyon analizi ve katsayıların belirlenmesi

Python ile yapılan nonlinear regresyon analizi sonucunda aşağıdaki katsayılar elde edilmiştir (Denklem 4.2):

$$L_p = 0.7 \cdot H \cdot (1 + 1.5 \cdot r) \cdot (1 + 2 \cdot n) \cdot \left(\frac{s}{H}\right)^{0.8} \quad (4.2)$$

Katsayıların Fiziksel Yorumu:

- $\alpha=0.7H$: Plastik mafsal boyu, kolon boyunun %70'i (0.7H) ile temsil edilir. Bu, deneysel verilerdeki ortalama eğilimle uyumludur.
- Dönme/Ötelenme Etkisi (β): $(1+1.5r)$ terimi, yatay ötelenmenin dönme ile bileşik etkisini yansıtır.
- Eksenel Yük Etkisi (γ): $(1+2n)$ terimi, eksenel yükün plastik mafsal boyunu doğrusal olarak artırdığını gösterir.
- Enine Donatı Etkisi (δ): $\left(\frac{s}{H}\right)^{0.8}$ ile enine donatı aralığının artmasıyla L_p 'nin üssel olarak artışı modellenir.

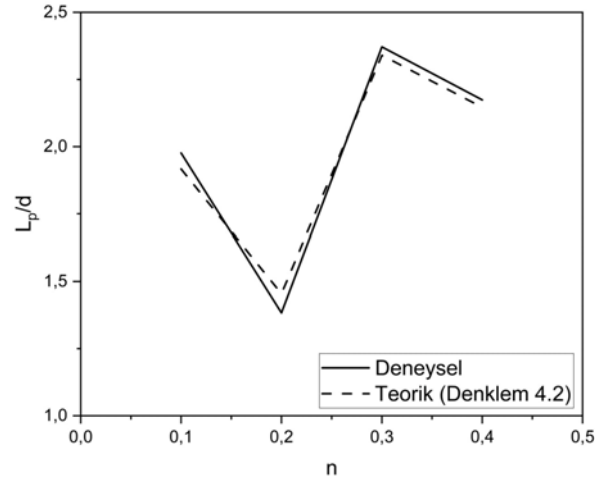
4.3.4. Modelin doğrulanması

Geliştirilen model ile deneysel sonuçlar Çizelge 4.15'te karşılaştırılmıştır. Buna ek olarak eksenel yük oranına (n), eksenel dönme/yatay ötelenme oranına ($r=\theta/\Delta$) ve enine donatı aralığına (s) bağlı olarak 3 farklı grafik çizilmiştir. Plastik mafsalsal boyunun; $r=\theta/\Delta=1$ olan betonarme kolonlarda eksenel yük oranına (n) bağlı olarak değişimi Şekil 4.112'de, eksenel dönme/yatay ötelenme oranına ($r=\theta/\Delta$) bağlı olarak değişimi Şekil 4.113'te, enine donatı aralığına bağlı olarak değişimi Şekil 4.114'te gösterilmiştir. Söz konusu grafiklerde plastik mafsalsal boyu ile ifade edilen düşey eksenin boyutsuz hale getirilmesi, konunun kapsamı bakımından daha açıklayıcı olacağı düşünülmüş ve bunun için hem deneysel hem de teorik olarak bulunan plastik mafsalsal boyları, elemanların kesitlerinin faydalı yüksekliği olan $d=253$ mm değerine bölünmüştür ($d = H-d'-\phi_w-\phi/2 = 300-30-10-7 = 253$). Benzer şekilde enine donatı aralığı tek başına bir anlam ifade etmediği gerekçesiyle boyutsuz hale getirilmesi uygun görülmüş ve enine donatı aralığı değerleri (80 mm ve 160 mm) elemanların kesitlerinin faydalı yüksekliğine (d) bölünmüştür. Şekil 4.94-96'dan görüleceği üzere deneysel plastik mafsalsal boyları ile Denklem 4.2 ile ifade edilen teorik plastik mafsalsal boyları oldukça yakın değerlere sahiptir.

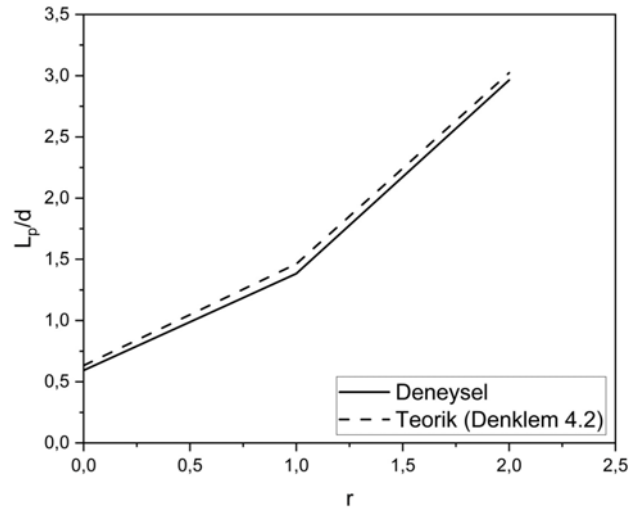
Çizelge 4.15. Deneysel ve teorik modelin karşılaştırılması

Numune	Deneysel L_p (mm)	Teorik L_p (mm)	Hata (%)
T1-N10-S8	500	490	-2.0
T1-N20-S8	350	345	-1.4
T1-N30-S8	600	595	-0.8
T1-N40-S8	550	540	-1.8
T2-N20-S8	750	740	1.3
T1-N30-S16	1200	1210	0.8
T0-N20-S8	150	150	0.0
T0-N30-S8	200	195	-2.5

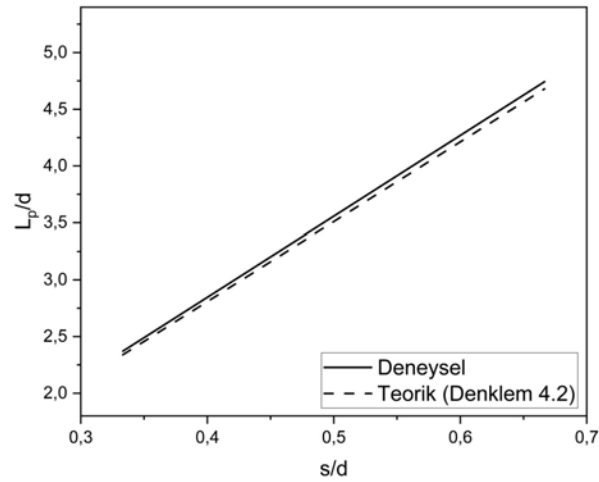
Not: Ortalama hata: %1.3 (kabul edilebilir uyum).



Şekil 4.112. Eksenel yük oranının $r=\theta/\Delta=1$ olan betonarme kolonlarda plastik mafsal boyuna etkisi



Şekil 4.113. Eksenel dönme/yatay ötelenme oranının $r=\theta/\Delta$ betonarme kolonlarda plastik mafsal boyuna etkisi



Şekil 4.114. Enine donatı aralığı oranının (s/d) betonarme kolonlarda plastik mafsal boyuna etkisi

4.4. Etkileşim Modeli

Betonarme kolonların tasarımı yapılırken iki tür etki göz önüne alınır ve hesaplar bu etkilere göre yapılır. Bunlar eksenel yük ve eğilme momentidir. Bu iki etkinin aynı anda kullanımı için sunulan modele “*Karşılıklı Etkileşim Diyagramı*” adı verilmiştir. Bu diyagramda burulma etkisi ihmal edilmiştir. Yapılan bu tez çalışmasından elde edilen veriler ışığında Eksenel Yük – Eğilme – Burulma (N-M-T) etkilerini aynı anda içerecek yeni bir etkileşim modeli sunulmuştur (Denklem 4.3). Model oluşturulurken her bir numuneye ait burulma momenti kapasitesi (T), eğilme momenti kapasitesi (M), basit burulma etkisindeki burulma dayanımı (T_0), basit eğilme etkisindeki eğilme dayanımı (M_0) değerleri dikkate alınmıştır. Etkileşim modelinin boyutsuz olması için T/T_0 ve M/M_0 oranları yapılmıştır. (T_0 ve M_0 değerlerinin ayrıntılı hesabı EK-1’de verilmiştir.) Numunelere ait ilgili veriler Çizelge 4.16’da gösterilmiştir.

$$\left(\frac{N}{N_0}\right)^{1.2} + \left(\frac{M}{M_0}\right)^{1.5} + \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.8} = 1 \quad (4.3)$$

Çizelge 4.16. Etkileşim modeli için kullanılan veriler

Numune	Yüklemeye Tipi	Burulma Momenti Kapasitesi (T) (kN.m)	Eğilme Momenti Kapasitesi (M) (kN.m)	T/T_0	M/M_0
T1-N10-S8	Eğilme-Burulma	97.74	103.54	1.85	0.94
T1-N20-S8	Eğilme-Burulma	103.47	107.94	1.96	0.98
T1-N30-S8	Eğilme-Burulma	120.80	90.06	2.29	0.82
T1-N40-S8	Eğilme-Burulma	135.43	96.42	2.57	0.87
T2-N20-S8	Eğilme-Burulma	182.34	84.49	3.45	0.77
T1-N30-S16	Eğilme-Burulma	88.84	108.84	3.24	0.99
M0-N20-S8	Salt Burulma	143.45	-	2.72	-
M0-N30-S8	Salt Burulma	129.00	-	2.44	-
T0-N20-S8	Salt Eğilme	-	107.97	-	0.98
T0-N30-S8	Salt Eğilme	-	118.78	-	1.08

4.5. Kolonların Plastik Dönme Limitleri

Plastik dönme limiti (θ_p), bir betonarme elemanın elastik sınırın ötesine geçtikten sonra şekil değiştirme kapasitesini tanımlar. Bu limit, özellikle sünek davranışın ön planda olduğu performansa dayalı değerlendirme yöntemlerinde kritik bir parametredir. TBDY-2018, betonarme kolonlar için bu parametreyi doğrudan tanımlayan ve performans düzeyleriyle ilişkilendiren yönetmeliklerden biridir. Bu performans düzeyleri Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçmenin Önlenmesi (GÖ) olarak tanımlanmıştır. Çizelge 4.17’de TBDY-2018’de tanımlanan bu performans düzeylerinin limit değerleri verilmiştir. Formüllerde φ_u kolondaki göçme öncesi eğriliği, φ_y akma eğriliğini, L_p plastik mafsallık boyunu ($L_p=0.5H$), L_s kesme açıklığını, d_b boyuna donatı çapını ifade etmektedir.

Çizelge 4.17. Farklı performans düzeylerine göre plastik dönme sınırları (TBDY, 2018)

Performans Düzeyi	Plastik Dönme Sınırı
Sınırlı Hasar (SH)	$\theta_p^{(SH)} = 0$
Kontrollü Hasar (KH)	$\theta_p^{(KH)} = 0.75\theta_p^{(GÖ)}$
Göçmenin Önlenmesi (GÖ)	$\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3} \left[(\varphi_u - \varphi_y) L_p \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right) + 4.5 \varphi_u d_b \right]$

Her performans düzeyinde betonarme kolonun göstermesi gereken maksimum plastik dönme limiti farklılık gösterir. Bu limitler, hem doğrusal olmayan analizlerde hedef deformasyonların belirlenmesinde hem de doğrusal değerlendirmelerde performans kontrolü amacıyla kullanılır.

Bu tez çalışmasında betonarme kolonlara uygulanan yatay yüklerden dolayı oluşan hasar seviyelerine bağlı performans düzeyleri belirlenmiştir. Bu düzeyler Çizelge 4.17’de verilen limit değerler ile kıyaslanmıştır. Elemanlarda oluşan $\theta_p^{(GÖ)}$ hesaplanırken, Çizelge 4.17’de verilen denklemdeki φ_u ve φ_y değerleri, elemanlara ait Eğilme Momenti-Eğrilik grafiklerinden elde edilmiştir. Elemanlara ait performans düzeyleri ile TBDY-2018 limit değerlerinin kıyaslanması amacıyla farklı eksenel yük oranlarına bağlı olarak kesit analizi yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.18’de gösterilmiştir. Analiz sonuçları kullanılarak farklı eksenel yük oranlarına bağlı olarak

TBDY-2018 için belirlenen plastik dönme limitleri bulunmuş ve deney elemanları ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.19). Plastik dönme limitleri bulunurken kesme açıklığı (L_s) 1200 mm, boyuna donatı (d_b) 14 mm alınmıştır. Plastik mafsalları için ise deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır.

Çizelge 4.18. Farklı eksenel yük oranlarına bağlı kolonlara ait moment-eğrilik değerleri

Eksenel Yük Oranı	Akma Eğriliği (rad/m)	Nihai Eğrilik (rad/m)	Akma Momenti (kN.m)	Maksimum Moment (kN.m)	Nihai Moment (kN.m)
0.10	0.012	0.100	113.5	130.0	115.0
0.20	0.014	0.090	135.2	148.6	132.0
0.30	0.016	0.080	152.8	162.4	145.0
0.40	0.018	0.070	165.0	170.5	150.0
T1-N10-S8	0.013	0.066	68.1	103.5	92.8
T1-N20-S8	0.014	0.063	95.5	108.2	88.4
T1-N30-S8	0.015	0.052	75.1	91.3	73.2
T1-N40-S8	0.015	0.058	79.9	97.2	77.9
T2-N20-S8	0.012	0.036	78.2	83.5	66.8
T0-N20-S8	0.013	0.079	89.6	108.5	86.54
T0-N30-S8	0.019	0.098	105.9	121.6	97.3
T1-N30-S16	0.011	0.042	72.0	109.3	109.3

Çizelge 4.19. Elemanlarda oluşan plastik dönme sınırları

Eleman	Sınırlı Hasar $\theta_p^{(SH)}$	Kontrollü Hasar $\theta_p^{(KH)}$	Göçmenin Önlenmesi $\theta_p^{(GÖ)}$
TBDY-2018 (N10)	0	0.0093	0.0124
TBDY-2018 (N20)	0	0.0082	0.0109
TBDY-2018 (N30)	0	0.0070	0.0093
TBDY-2018 (N40)	0	0.0058	0.0078
T1-N10-S8	0	0.0057	0.0077
T1-N20-S8	0	0.0054	0.0072
T1-N30-S8	0	0.0042	0.0056
T1-N40-S8	0	0.0048	0.0065
T2-N20-S8	0	0.0027	0.0037
T0-N20-S8	0	0.0071	0.0095
T0-N30-S8	0	0.0086	0.0115
T1-N30-S16	0	0.0034	0.0046

4.6. Tartışma

Eksenel yük, eğilme ve burulma etkisindeki betonarme kolonların davranışını araştırmak amacıyla bu tez çalışması yapılmıştır. Çalışmada 10 adet 1/1 ölçekli betonarme kolona değişik eksenel yük, eğilme ve burulma momentleri uygulanmıştır. Deneysel verilerden elde edilen sonuçlar kullanılarak, söz konusu üç etki aynı anda betonarme kolonlara uygulandığında oluşan plastik mafsalsal boyu ile ilgili bir model sunulmuştur ve eksenel yük, eğilme ve burulma etkilerini aynı anda içerecek yeni bir üçlü etkileşim diyagramı oluşturulmuştur.

Bu bölümde, deneysel çalışmadan elde edilen veriler ile literatürde betonarme kolonlardaki plastik mafsalsal boyu için önerilen modeller ile bu tez çalışmasından elde edilen plastik mafsalsal boyu modeli karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Benzer şekilde literatürdeki etkileşim modelleri ile bu tez çalışmasında sunulan üçlü etkileşim modelinin farkları ve etkinlikleri tartışılmıştır.

4.6.1. Yük taşıma kapasitelerinin değerlendirilmesi

Deney sonuçları, eksenel yük oranının artmasıyla birlikte numunelerin başlangıç yatay yük taşıma kapasitelerinde belirgin bir artış sağladığını, ancak bu artışın yük taşıma kapasitesi düştükten sonraki süneklik ve enerji tüketim performansını olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir. Örneğin, %10 eksenel yük taşıyan T1-N10-S8 numunesi 88.45 kN'a kadar yük taşıırken, %40 eksenel yüke sahip T1-N40-S8 numunesi 81.58 kN ile daha düşük bir kapasiteye ulaşmıştır. Bu durum, yüksek eksenel yüklerin eğilme çatlaklarını daha fazla sıkıştırarak rijitliği artırdığını; fakat burkulma ve gevrek göçme riskini de beraberinde getirdiğini göstermektedir. Literatürde bu bulgu, Paulay ve Priestley (1992) tarafından da benzer şekilde ifade edilmiştir.

4.6.2. Çatlakların değerlendirilmesi

Deneyisel çalışmadaki elemanlarda oluşan çatlak genişlikleri değerlendirildiğinde, eksenel yük oranı ile çatlakların karakteri arasında doğrudan bir ilişki gözlemlenmiştir. Düşük eksenel yük taşıyan numunelerde çatlaklar daha erken yatay ötelenme oranlarında ortaya çıkmış ve çatlak genişliği yüksek eksenel yük oranı taşıyan numunelere göre daha fazla oluşmuştur. Örneğin, T1-N10-S8 numunesinde eğilme çatlağı genişliği 1.6 mm'ye kadar ulaşırken, T1-N30-S8 gibi daha yüksek eksenel yüklü numunelerde bu değer 1.4 mm civarındadır. Bunun nedeni, yüksek eksenel yükün çatlakların açılmasını daha çok engellemesidir. Ancak burulmanın etki ettirilmesi ile çatlak desenlerinde spiral eğilimli çatlaklar gözlenmiştir; bu da eksenel yük ile burulmanın etkileşimini göstermiştir.

4.6.3. Eksenel yük etkisinin değerlendirilmesi

Eksenel yük oranı (n), betonarme kolonların taşıma kapasitesi ve sismik performansı üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Deney sonuçları, eksenel yük oranının %10'dan %20'ye çıkmasıyla yatay yük taşıma kapasitesinin arttığını (%102), ancak %30'a çıkıldığında bu kapasitenin %85'e düştüğünü göstermiştir. Bu davranış, eksenel yükün beton basınç dayanımını artırmasıyla açıklanabilirken, yüksek eksenel yüklerde ($n \geq 0.3$) kolonun sünek davranışının azalması ve gevrek kırılma eğiliminin artması nedeniyle kapasite kaybı gözlemlenmiştir. Özellikle T1-N20-S8 numunesinde en yüksek yük taşıma kapasitesi (89.95 kN itme, -101.85 kN çekme)

elde edilirken, T1-N30-S8 numunesinde bu değerlerin düşmesi (75.05 kN itme, -87.98 kN çekme), kritik eksenel yük sınırının aşılmasıyla ilişkilendirilebilir.

Eksenel yük oranının plastik mafsal boyu (L_p) üzerindeki etki incelendiğinde, eksenel yük arttıkça plastik mafsal boyunun kısaldığı görülmüştür. Örneğin, T1-N10-S8 numunesinde L_p 650 mm iken, T1-N20-S8’de 350 mm’ye düşmüş, T1-N40-S8’de ise 550 mm olarak ölçülmüştür. Bu durum, yüksek eksenel yüklerin kolonun deformasyon kabiliyetini sınırlandırarak hasarın daha lokalize bir bölgede yoğunlaşmasına neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca, süneklik oranı (μ) da eksenel yük artışıyla azalmıştır. Bu sonuçlar, yüksek eksenel yük altındaki kolonların deprem performansının daha düşük olabileceğini göstermiştir.

4.6.4. Burulmanın etkisinin değerlendirilmesi

Burulmanın kolonlar üzerindeki etkisi, θ/Δ parametresi ile değerlendirilmiştir. Deneyler, burulma etkisinin artmasıyla yatay yük taşıma kapasitesinin önemli ölçüde azaldığını ortaya koymuştur. Örneğin, T0-N20-S8 (salt eğilme) numunesinde yük kapasitesi 89.98 kN iken, T1-N20-S8 ($\theta/\Delta=1$) numunesinde benzer değerler korunmuş, ancak T2-N20-S8 ($\theta/\Delta=2$) numunesinde kapasite %22 düşerek 70.41 kN’a gerilemiştir. Bu durum, burulmanın kesme çatlaklarını tetiklemesi ve betonun çekme dayanımını aşmasıyla açıklanabilir.

Çatlak desenleri incelendiğinde, burulma etkisi altında helisel çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların eğilme çatlaklarına kıyasla daha geniş ve dağınık bir yapı sergilediği gözlemlenmiştir. Özellikle T2-N20-S8 numunesinde, %2.0 öteleme oranında 2.8 mm’ye varan kesme çatlakları oluşmuş, bu da burulmanın betonun kesme dayanımını ciddi şekilde zorladığını göstermiştir. Ayrıca, burulma etkisi plastik mafsal boyunu uzatmış (T0-N20-S8: 150 mm → T2-N20-S8: 600 mm), bu da hasarın daha geniş bir bölgeye yayıldığını kanıtlamıştır.

4.6.5. Enine donatı etkisinin değerlendirilmesi

Enine donatı aralığının (s) kolon davranışı üzerindeki etkisi, T1-N30-S8 ($s=80$ mm) ve T1-N30-S16 ($s=160$ mm) numuneleri karşılaştırılarak incelenmiştir. Sonuçlar, enine donatı aralığının artmasıyla çatlak genişliklerinin belirgin şekilde arttığını göstermiştir. T1-N30-S16 numunesinde, %2.0 öteleme oranında çatlak genişlikleri 5 mm’yi aşmış, bu da sargı etkisinin azalmasıyla betonun daha erken dağılmasına neden olmuştur.

Plastik mafsalsal boyu, enine donatı aralığı arttıkça önemli ölçüde uzamıştır (T1-N30-S8: 400 mm; T1-N30-S16: 1200 mm). Bununla birlikte, enerji tüketim kapasitesi %43 oranında düşmüş ve süneklik (μ) 3.3'ten 1.7'ye gerilemiştir. Bu sonuçlar, sık aralıklı enine donatının betonun sınırlı deformasyon kabiliyetini artırmadaki kritik rolünü doğrulamaktadır.

4.6.6. Plastik mafsalsal boyu modellerinin karşılaştırmalı analizi

Plastik mafsalsal boyunun (L_p) belirlenmesi, betonarme kolonların sismik performansının değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada geliştirilen model (Denklem 4.2), eksenel yük oranı (n), dönme/ötelenme oranı (r) ve enine donatı aralığı (s) gibi parametreleri entegre ederek literatürdeki modellerden ayırmaktadır. Aşağıda, bu modelin literatürdeki 8 önemli çalışma ile kapsamlı karşılaştırması ve metodolojik farklılıkların kökenleri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Çizelge 4.17'de bu çalışmada geliştirilen ve Denklem 4.2 ile sunulan model ile literatürdeki diğer modeller arasındaki temel farklılıklar ve benzerlikler özetlenmiştir.

Çizelge 4.17. Plastik mafsals boyu modellerinin karşılaştırması

Kaynak	Model Formülü	Bu Çalışma ile Farklılıklar	Temel Varsayımlar
Mattock (1967)	$L_p = 0.5d + 0.05z$	Yüklemeye koşulları ve enine donatı etkisi ihmal edilmiş	Erken dönem basit yaklaşımları.
Park ve Paulay (1975)	$L_p = 0.5h$	Yüklemeye koşulları ve enine donatı etkisi ihmal edilmiş	Erken dönem basit yaklaşımları.
Priestley ve Park (1987)	$L_p = 0.08L + 6d_b$	Yüklemeye koşulları ve enine donatı etkisi ihmal edilmiş; fakat boyuna donatı katkısı dahil edilmiş	Boyuna donatı odaklı
Priestley ve diğ. (1996)	$L_p = 0.08h + 0.022d_b f_y$	Yüklemeye koşulları ve enine donatı etkisi ihmal edilmiş; fakat boyuna donatı katkısı dahil edilmiş	Boyuna donatı odaklı
Tirasit ve Kawashima (2007)	$L_p = 0.5D(r + 1)^{0.43} \leq 1.5D$	Eksenel yük ve enine donatı etkisi ihmal edilmiş	Burulma-eğilme etkileşimi odaklı
Berry ve Eberhard (2008)	$L_p = 0.05L + 0.1d_b \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}}$	Eksenel yük ve enine donatı etkisi ihmal edilmiş; fakat boyuna donatı ile beton dayanımı dahil edilmiş	Malzeme odaklı
Bae ve Bayrak (2008)	$\frac{L_p}{h} = \left[0.3 \left(\frac{P}{P_0} \right) + 3 \left(\frac{A_s}{A_g} \right) - 0.1 \right] \left(\frac{L}{h} \right) + 0.25 \geq 0.25$	Burulma etkisi dahil edilmemiş; fakat donatı ve beton katkısı dahil edilmiş	Eksenel yük ve malzeme odaklı
Barbagallo ve diğ. (2022)	$\frac{L_p}{h} = 0.19\rho_{st}^{-0.35}$	Yüklemeye koşulları ihmal edilmiş	Enine donatı odaklı
Bu tez çalışması (Denklem 4.2)	$L_p = 0.7 \cdot H \cdot (1 + 1.5 \cdot r) \cdot (1 + 2 \cdot n) \cdot \left(\frac{s}{H} \right)^{0.8}$	-	Eksenel yük, eğilme, burulma, enine donatı odaklı

Betonarme kolonlarda oluşan plastik mafsalsal boyu ile ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur. Özellikle XX. yüzyılın ikinci yarısından itibaren bu konuya olan ilgi artmış ve farklı yükler ve malzeme özellikleri altında betonarme kolonlarda meydana gelen plastik mafsalların yapısı araştırılmış, çeşitli plastik mafsalsal boyu modelleri sunulmuştur. İlk başlarda malzeme ve yükleme özellikleri dikkate alınmadan sadece kesit boyutları ile yaklaşık sonuç veren basit modeller geliştirilse de teknolojinin ve bu konudaki bilgi birikiminin artması ile daha kapsamlı çalışmalar yapılarak farklı etkiler de plastik mafsalsal modellerine dahil edilmiştir. Boyuna donatı çapının, betonarme kolonların plastik mafsalsal boyunu etkilediğini ilk olarak Priestley ve Park (1987) tarafından ortaya konmuştur. Fakat bu modelde herhangi bir yük etkisi mevcut olmadığı için model oldukça basit kalmıştır. 2007 yılına kadar plastik mafsalsal uzunluğu ile ilgili yapılan çalışmaların çoğu mevcut modellerdeki katsayıların iyileştirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Daha sonra Tirasit ve Kawashima (2007), farklı eğilme ve burulma etkilerinin betonarme kolonlarda oluşan plastik mafsalsal boyunu nasıl değiştirdiğini incelemişlerdir. Yazarlar eğilme-burulma etkileşimini kullanarak yeni bir plastik mafsalsal modeli ortaya koyarak bu konuya oldukça yenilikçi bir yaklaşım getirmişlerdir. Fakat bu modelde de en büyük sorunlardan birisi eksenel yük etkisinin ihmal edilmiştir. Bu sorunu çözmek için Bae ve Bayrak (2008) eksenel yük etkisini de dahil ederek literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmuşlardır. Buna rağmen söz konusu modelde burulma etkisinin dahil edilmemesi yine önemli bir eksiğin olduğu göstermiştir. 2025 yılında tamamlanan bu tez çalışması ile hem eksenel yük hem eğilme-burulma etkileşimi hem de enine donatı etkisi modele dahil edilerek literatüre oldukça yenilikçi bir çözüm sunulmuştur. Farklı eksenel yük oranı, eksenel dönme/yatay ötelenme oranı ve enine donatı aralığı etkilerinde betonarme kolonlarda oluşabilecek plastik mafsalsal uzunluğu %3.7 hata oranı ile tahmin edilebilmektedir.

4.6.7. Etkileşim modellerinin karşılaştırmalı analizi

Bu bölümde, betonarme elemanların basınç (N), eğilme (M), kesme (V) ve burulma (T) gibi kombine yükler altındaki etkileşim davranışı, literatürdeki önemli çalışmalar referans alınarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, bu çalışmada geliştirilen etkileşim modelinin (Denklem 4.3) önceki modellerden farkları ve getirdiği yenilikler değerlendirilmiştir. Son olarak, tüm formüllerin karşılaştırmalı bir özeti Çizelge 4.18'de sunulmuştur.

Ersoy ve Ferguson (1968), enine donatısız 25 betonarme kiriş üzerinde yaptıkları deneylerde, kesme ve burulmanın birlikte etkimesi durumunda taşıma kapasitesinin çeyrek daire yayı şeklinde bir ilişki gösterdiğini tespit etmişler ve Denklem 4.4 ile verilen modeli sunmuşlardır.

$$\left(\frac{T}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 = 1 \quad (4.4)$$

Bu model, sadece kesme ve burulma etkileşimini ele alarak eğilme ve basınç etkilerini göz ardı etmektedir. Enine donatısız elemanlar için geçerli olan bu model, enine donatılı elemanlarda farklı davranış gözlenebilmektedir. Deneysel veriler, kırılma modunun kesme-burulma çatlaklarının birleşimi olduğunu göstermektedir.

Ewida ve McMullen (1981), eksik donatılı kirişlerde eğilme, kesme ve burulmanın bir arada etkimesi durumunda taşıma kapasitesini boyutsuz bir denklemle ifade etmişlerdir (Denklem 4.5).

$$\left(\frac{T_u}{T_{u0}}\right)^2 + \left(\frac{V_u}{V_{u0}}\right)^2 + \left(\frac{M_u}{M_{u0}}\right) = 1 \quad (4.5)$$

Bu model, üç yük tipinin (M, V, T) bir arada etkisini dikkate alan ilk çalışmalardan biridir. Eğilme momentinin lineer, kesme ve burulmanın ise karesel olarak modele dahil edilmesi, eğilmenin diğer yükler üzerindeki baskın etkisini yansıtmaktadır. Eksenel basınç etkisi bu modelde ihmal edilmiştir.

Hsu ve Mo (2010), "Unified Theory of Concrete Structures" adlı çalışmalarında, betonarme elemanların kombine yükler altındaki davranışını üç farklı hasar moduna ayırarak incelemişlerdir (Denklem 4.6-4.8). Denklemlerdeki R katsayısı, üst donatıların akma kapasitesinin alt donatıların akma kapasitesine oranıdır.

$$\left(\frac{M}{M_0}\right) + \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 R + \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 R = 1 \quad (4.6)$$

$$-\left(\frac{M}{M_0}\right)\frac{1}{R} + \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 = 1 \quad (4.7)$$

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 + \sqrt{2} \left(\frac{VT}{V_0 T_0}\right) = \frac{1+R}{2R} \quad (4.8)$$

Sunulan modellerde,

- Kesitin alt boyuna donatıları akmışsa Denklem 4.6,
- Kesitin üst boyuna donatıları akmışsa Denklem 4.7,
- Kesitin sağ veya sol tarafındaki boyuna donatılar akmışsa Denklem 4.8'in kullanılması önerilmiştir.

Bu model, kesme-burulma-eğilme etkileşimini kapsamlı şekilde ele almaktadır. Ancak eksenel basınç etkisini ihmal etmektedir. Üç farklı hasar modu tanımlanarak, elemanın farklı yük kombinasyonlarındaki davranışı daha gerçekçi şekilde modellenmiştir.

Yu ve Shan (2021), T-kesitli betonarme kolonların basınç, eğilme, kesme ve burulma gibi kombine yükler altındaki davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Özellikle köprü kolonlarının karmaşık yük etkileşimlerini analiz etmek hedeflenmiştir. 12 adet T-kesitli kolon üzerinde yapılan deneylerle, farklı yük kombinasyonları altında taşıma kapasitesi, çatlak gelişimi ve hasar modları incelenmiştir. Yazarlar, yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler kullanılarak üçlü etkileşim diyagramı oluşturmuşlar ve Denklem 4.9 ile verildiği şekilde sunmuşlardır.

$$-3.12 \left(\frac{N}{N_0} \right) + 1.01 \left(\frac{M}{M_0} \right)^2 + 1.35 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 1.01 \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 = 1 \quad (4.9)$$

Denklem 4.9 ile önerilen modelde, T-kesitli betonarme kolonların basınç (N), eğilme (M), kesme (V) ve burulma (T) yüklerinin birleşik etkisi dikkate alınmıştır. Model, eksenel basıncın belirli seviyede ($N/N_0 \leq 0.25$) eğilme kapasitesini artırdığını (negatif terim), ancak kesme ve burulmanın karesel etkilerle taşıma kapasitesini azalttığını göstermektedir. Özellikle $T/T_0=0.62$ 'nin burulma hasarı için kritik eşik olduğu vurgulanmıştır. Literatürden farklı olarak dört yük tipini bir arada ele alan bu model, eğri köprü girişleri gibi karmaşık yapıların tasarımında, yük etkileşimlerinin daha gerçekçi şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Ancak modelin farklı beton sınıfları ve dinamik yükler için genişletilmesi önerilmiştir.

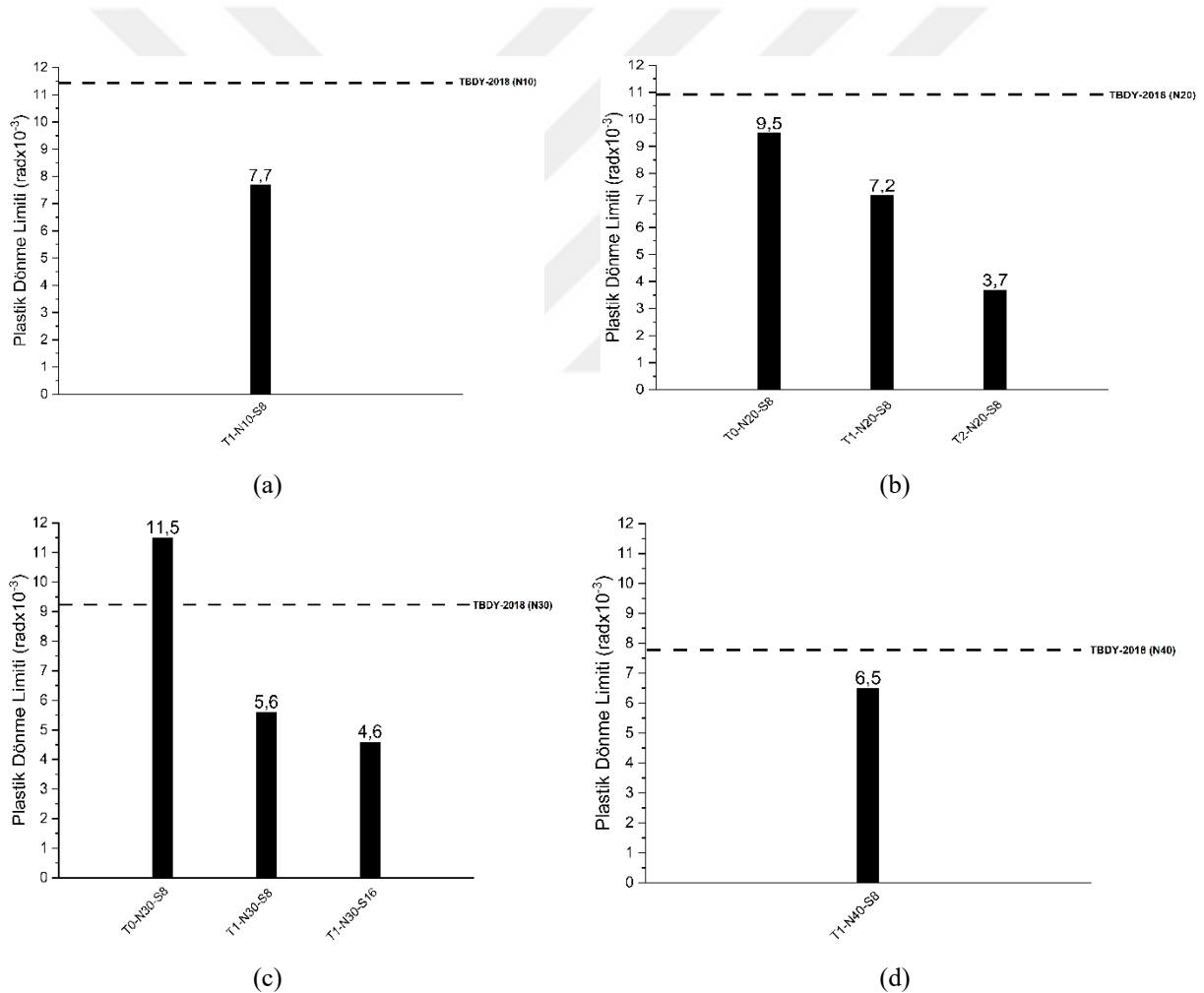
Bu tez çalışması kapsamında Denklem 4.3 ile önerilen etkileşim modeli oluşturulurken, farklı eksenel yük, eğilme ve burulma etkileri dikkate alınmıştır. Söz konusu modelin, Denklem 4.9 ile ifade edilen Yu ve Shan (2021) modelinden en önemli farkı kesit özelliğidir. Bu tez çalışmasında kare kesitli kolonlar kullanılırken Yu ve Shan (2021) modelinde T kesitli kolonlar kullanılmıştır. Gerek eğilme gerekse burulma etkilerinde kesitin farklılaşması davranışı ciddi oranda etkilemektedir.

Çizelge 4.18. Etkileşim modellerinin karşılaştırması

Çalışma	Formül	Yük Türleri	Temel Varsayımlar	Sınırlamalar
Ersoy ve Ferguson (1968)	$\left(\frac{T}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 = 1$	V, T	Enine donatısız kirişler	Eğilme ve basınç ihmal edilmiştir.
Ewida ve McMullen (1981)	$\left(\frac{T_u}{T_{u0}}\right)^2 + \left(\frac{V_u}{V_{u0}}\right)^2 + \left(\frac{M_u}{M_{u0}}\right) = 1$	M, V, T	Eksik donatılı kirişler	Basınç ihmal edilmiştir.
Hsu ve Mo (2010)	$\left(\frac{M}{M_0}\right) + \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 R + \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 R = 1$ $-\left(\frac{M}{M_0}\right)\frac{1}{R} + \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 = 1$ $\left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 + \sqrt{2} \left(\frac{VT}{V_0 T_0}\right) = \frac{1+R}{2R}$	M, V, T	Donatı akma durumuna göre mod değişimi	Basınç ihmal edilmiştir.
Yu ve Shan (2021)	$-3.12 \left(\frac{N}{N_0}\right) + 1.01 \left(\frac{M}{M_0}\right)^2 + 1.35 \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + 1.01 \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 = 1$	N, M, V, T	T-kesitli kolonlar	Yüksek basınç oranlarında geçerlilik sınırlı. Dikdörtgen kesitler farklı sonuçlar verebilir.
Bu tez çalışması (Denklem 4.3)	$\left(\frac{N}{N_0}\right)^{1.2} + \left(\frac{M}{M_0}\right)^{1.5} + \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.8} = 1$	N, M, T	Kare kesitli kolonlar	Farklı kesit özelliklerinde farklı sonuçlar verebilir.

4.6.8. Plastik dönme limitlerinin karşılaştırılması

Deneyisel çalışmanın sonuçları, betonarme kolonların plastik dönme kapasitelerinin burulma, eksenel yük ve enine donatı parametrelerinin karmaşık etkileşimine bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu üç parametrenin ortak etkisi incelendiğinde, plastik dönme kapasitelerinde gözlemlenen değişimler, genel olarak doğrusal bir davranış sergilemiştir. Özellikle burulmanın varlığı, diğer parametrelerin etkilerini önemli ölçüde değiştirmiş ve kolon davranışını şekillendiren temel faktör olarak öne çıkmıştır. Elemanlara ait *Göçmenin Önlenmesi* plastik dönme limitleri, Çizelge 4.19'daki veriler kullanılarak oluşturulmuş ve eksenel yük oranlarına bağlı olarak Şekil 4.116'da verilmiştir.



Şekil 4.116. Elemana ait Göçmenin Önlenmesi plastik dönme limiti,

- a) Eksenel yük oranı 0.10 olan numune, b) Eksenel yük oranı 0.20 olan numuneler,
c) Eksenel yük oranı 0.30 olan numuneler, d) Eksenel yük oranı 0.40 olan numune

Çizelge 4.19 ve Şekil 4.116'da sunulan veriler, betonarme kolonların farklı hasar seviyelerindeki plastik dönme kapasitelerinin eksenel yük, burulma ve enine donatı parametrelerine bağlı olarak bir değişim gösterdiğini kanıtlamıştır.

Eksenel Yük Etkisi: Yönetmelik değerlerinde eksenel yük artışıyla (0.10'dan 0.40'a) kontrollü hasar dönme sınırının 0.0093 rad'dan 0.0058 rad'a düşmesi, teorik beklentilerle uyumludur. DeneySEL verilerde de bu eğilim gözlemlenmiştir. Ancak T0-N30-S8 numunesinde 0.0086 rad gibi yüksek değer, burulma yokluğunda optimum eksenel yükün (0.30) kapasiteyi artırabileceğini göstermiştir.

Burulma Etkisi: Burulmanın betonarme kolonların plastik dönme kapasiteleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Burulma etkisinin olmadığı T0 serisi numuneler ile burulmalı T1 ve T2 serileri arasındaki performans farkları, bu etkinin boyutlarını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Özellikle 0.20 eksenel yük seviyesindeki karşılaştırmalar, burulma arttıkça kapasitenin ciddi şekilde azaldığını göstermiştir. Burulmanın olmadığı T0-N20-S8 numunesinde 0.0071 rad olan *Kontrollü Hasar* dönme sınırı, T1-N20-S8'de 0.0054 rad'a (%24 azalma), T2-N20-S8'de ise 0.0027 rad'a (%62 azalma) düşmüştür. Bu düşüş, burulmanın kolon davranışı üzerindeki etkisini açıkça kanıtlamıştır.

Enine Donatı Etkisi: Enine donatı aralığının 80 mm'den 160 mm'ye çıkarılması (T1-N30-S8 ile T1-N30-S16 karşılaştırması), *Kontrollü Hasar* dönme sınırını 0.0042 rad'dan 0.0034 rad'a düşürerek %19'luk bir azalmaya neden olmuştur. Bu durum, sık donatının beton sargılamadaki kritik rolünü teyit etmiştir.

Tüm numuneler incelendiğinde ise T0-N30-S8 numunesi hariç tüm numunelerin TBDY-2018 sınır değerinin altında kaldığı görülmüştür. Bu durum, yönetmelikteki mevcut hesap modellerinin, özellikle burulma etkisi de dikkate alınarak revize edilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı bünyesinde yürütülen bu doktora tez çalışması kapsamında, betonarme kolonlarda eksenel yük oranı ve burulma momentinin, eğilme dayanımına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın değişkenleri;

- Eksenel yük oranı ($n = 0.1 - 0.2 - 0.3 - 0.4$),
- Eksenel dönme/yatay ötelenme oranı ($r = \theta/\Delta = 0 - 1 - 2$),
- Enine donatı aralığıdır ($s = 8 \text{ mm} - 16 \text{ mm}$).

Toplamda 10 adet 1/1 ölçekli betonarme kolon kullanılan bu tez çalışmasındaki numuneler, Konya’da bulunan bir prefabrik tesisinde üretilmiş ve daha sonra Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Deprem Araştırma Laboratuvarı’na taşınmıştır. Laboratuvarda söz konusu deneylerin gerçekleştirileceği deney düzeneği mevcut olmadığı için yeni bir deney düzeneği imal edilmiştir. Her bir deneysel çalışmadan elde edilen veriler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Elde edilen veriler ışığında eksenel yük ve burulma momenti değişiminin, betonarme kolonların eğilme davranışı üzerindeki etkinliği araştırılmıştır. Kolonlarda oluşan plastik mafsalları boyaları incelenerek eksenel yük oranı (n), eksenel dönme/yatay ötelenme oranı (r) ve enine donatı aralığına (s) bağlı olarak yeni bir plastik mafsalları boyu modeli sunulmuştur. Deneysel verileri kullanılarak, betonarme kolonların eksenel yük, eğilme ve burulma (N-M-T) etkileri altındaki dayanım zarfı olarak yeni bir etkileşim modeli sunulmuştur. Her iki model, literatürdeki diğer modeller ile kıyaslanarak tartışılmıştır.

5.1. Sonuçlar

Deneyler sırasında gözlemlenen çatlaklar, uygulanan yük türüne bağlı olarak belirgin farklılıklar sergilemiştir. Eğilme etkisinin baskın olduğu durumlarda (T0 serisi), çatlaklar genellikle yatay ve kolonun alt bölgesinde yoğunlaşmıştır. Özellikle T0-N20-S8 numunesinde, %0.5 öteleme oranında oluşan ilk çatlaklar 0.3 mm genişliğinde ve kolon alt ucunda belirginleşmiştir. Çatlak açıları yaklaşık 0° ile 10° arasında değişmiş, bu da klasik eğilme-çekme çatlaklarının tipik özelliklerini yansıtmıştır. Çatlak uzunlukları ise mesnete yakın kısımda dağılım göstermiş ve plastik mafsallık bölgesinde yoğunlaşmıştır.

Burulmanın etkili olduğu numunelerde (T1 ve T2 serisi), çatlak desenleri daha karmaşık bir yapı sergilemiştir. T1-N20-S8 numunesinde, %2.0 öteleme oranında hem eğilme (3.5 mm) hem de kesme çatlakları (0.8 mm) aynı anda gözlemlenmiştir. Burulmanın artmasıyla birlikte, çatlaklar helisel bir form almış ve kolon yüzeyini sarmal şekilde takip etmiştir. Özellikle T2-N20-S8 numunesinde, kesme çatlaklarının genişliği 2.8 mm'ye ulaşmış ve çatlak açıları 30° - 45° aralığında oluşmuştur. Bu durum, burulmanın kesme gerilmelerini artırarak betonun çekme dayanımını aştığını ve daha geniş çatlaklara yol açtığını göstermektedir. $\theta/\Delta=1$ oranında hem yatay eğilme çatlakları ($\approx 0^\circ$) hem de diyagonal kesme çatlakları ($\approx 45^\circ$) birlikte görülmüş, bu durumda eğilme çatlaklarının genişliği 1.8 mm'ye, kesme çatlaklarının genişliği ise 0.8 mm'ye ulaşmıştır. θ/Δ oranının 2'ye çıkarılmasıyla birlikte kesme çatlaklarının belirgin şekilde baskın hale geldiği, genişliklerinin 2.8 mm'ye ulaştığı ve kolon taşıma kapasitesinde ciddi azalmaya yol açtığı tespit edilmiştir.

Çatlak genişlikleri, numunelerin yük taşıma kapasitesi ve sünekliği hakkında önemli bilgiler vermiştir. Enine donatı aralığının artması, çatlak genişliklerinde belirgin bir artışa neden olmuştur. Örneğin, T1-N30-S8 numunesinde ($s=80$ mm) eğilme çatlakları 1.4 mm genişliğinde iken, T1-N30-S16 numunesinde ($s=160$ mm) bu değer 5 mm'yi aşmıştır. Bu fark, enine donatının sargı etkisinin azalmasıyla betonun daha erken dağılmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, yüksek eksenel yük altındaki numunelerde (T1-N40-S8), çatlak genişliklerinin nispeten daha küçük kalması, eksenel yükün betonun çatlak ilerlemesini kısmen engellediğini göstermiştir.

Çatlak uzunlukları ise hasarın yayılımı hakkında önemli bilgiler sunmuştur. Burulma etkisinin arttığı numunelerde, çatlaklar kolon boyunca daha geniş bir alana yayılmış ve plastik mafsallık boyu uzamıştır. Örneğin, T2-N20-S8 numunesinde plastik mafsallık boyu 600 mm olarak ölçülmüş, bu da hasarın lokalize olmadığını ve daha geniş bir bölgede meydana geldiğini

kanıtlamıştır. Buna karşılık, salt eğilme etkisindeki T0-N20-S8 numunesinde plastik mafsal boyu 150 mm ile sınırlı kalmıştır.

Salt eğilme etkisindeki numuneler (T0 serisi), burulma ve eğilmenin aynı anda yüklendiği numunelere kıyasla daha yüksek süneklik sergilemiştir. Örneğin, T0-N30-S8 numunesinin süneklik değeri 5.42 olarak ölçülmüş olup, aynı eksenel yük oranına sahip T1-N30-S8 numunesinden %43 daha yüksektir. Benzer şekilde T0-N20-S8 numunesinin süneklik değeri, T1-N20-S8 numunesine göre %15, T2-N20-S8 numunesine göre %74 daha fazladır. Bu fark, burulma ve kesme etkilerinin olmaması nedeniyle plastik mafsal bölgesinde daha kontrollü bir hasar dağılımının gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Salt eğilme durumunda elemanların deformasyon ve enerji tüketim kapasiteleri, burulma etkisindekilere göre daha fazladır. Bu bulgular, özellikle deprem bölgelerindeki yapıların tasarımında yükleme kombinasyonlarının iyi analiz edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Betonarme kolonlarda artan burulma etkisinin kolon kesitinde oluşturduğu ek kayma gerilmeleri nedeniyle plastik dönme kapasitesini önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Eksenel yükün etkisi ise burulma seviyesine bağlı olarak değişmiş, T1 serisinde belirli bir seviyeye kadar sünekliği artırırken, yüksek eksenel yük oranlarında bu olumlu etki kaybolmuştur.

Bu tez çalışmasında geliştirilen modellerin teorik altyapısı ve pratik uygulamalara yansımaları, mevcut yönetmeliklerle karşılaştırmalı olarak ele alındığında önemli bir bilimsel boşluğu doldurduğu görülmektedir. Plastik mafsal boyu modeli, özellikle burulma etkisini niceliksel olarak tanımlayan ve eksenel yük ile enine donatı aralığının etkilerini entegre eden yapısıyla literatürdeki benzer çalışmalardan ayrılmaktadır. Modelin yönetmeliklerle olan ilişkisi incelendiğinde, mevcut standartların (TS 500, Eurocode 8, ACI 318) plastik mafsal boyunu basit geometrik parametrelerle sınırlandırdığı, ancak burulma gibi karmaşık etkileşimleri göz ardı ettiği anlaşılmaktadır. Örneğin, Eurocode 8'de önerilen plastik mafsal boyu tahmini ($L_p \approx 0.5h$), bu çalışmada burulma etkisi altında elde edilen değerlerin (örneğin T2-N20-S8 numunesinde $L_p = 600$ mm) çok altında kalmakta ve bu durum, yönetmeliklerin revizyon ihtiyacını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, geliştirilen üçlü etkileşim diyagramı, mevcut tasarım yaklaşımlarında ihmal edilen eksenel yük-burulma-eğilme etkileşimlerini kapsamlı bir şekilde ele alarak, köprü kolonları ve asimetrik yüklü yapı elemanlarının tasarımında yeni bir perspektif sunmaktadır.

Geliştirilen modellerin geleceğe yönelik etkileri, hem akademik hem de endüstriyel uygulamalar açısından oldukça geniş bir yelpazede değerlendirilebilir. Bilimsel açıdan, bu çalışmanın bulguları, deprem mühendisliği alanında burulma etkisinin yeniden tanımlanmasına

ve sismik tasarım kriterlerinin gözden geçirilmesine önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Özellikle deprem açısından yüksek riskli bölgelerdeki mevcut binaların değerlendirilmesinde, geliştirilen plastik mafsallı modeli sayesinde burulma kaynaklı hasarların daha doğru bir şekilde tahmin edilmesi mümkün olacaktır. Pratik uygulamalarda ise mühendisler, üçlü etkileşim diyagramını kullanarak karmaşık yük kombinasyonları altındaki kolonların taşıma kapasitelerini daha güvenilir şekilde belirleyebileceği ve buna bağlı olarak daha ekonomik tasarımlar geliştirebileceği tahmin edilmektedir. Ayrıca, bu çalışmanın sonuçlarının, yapı performansı değerlendirmeleri ve güçlendirme projeleri için yeni metodolojilerin geliştirilmesine zemin hazırlayacağı, özellikle tarihi yapılar gibi burulmaya maruz kalan özel yapıların korunmasına yönelik stratejilerin oluşturulmasında kritik bir rol oynayacağı düşünülmektedir.

5.2. Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen veriler ve edinilen bilgi birikimi ışığında, gelecekte yapılacak çalışmalar için aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur:

- Eksenel yük, eğilme ve burulma etkisindeki betonarme kolonların davranışına, beton dayanımının etkisi incelenebilir.
- Bu tez çalışmasındaki değişkenlerin ölçeği artırılabilir (örneğin etriye aralığı 50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm; eksenel dönme/yatay ötelenme oranı 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 gibi).
- Kesit özelliklerinin, eksenel yük-eğilme-burulma altındaki betonarme kolonların davranışına etkisi incelenerek bu tez çalışmasında sunulan plastik mafsallı ve etkileşim modelleri iyileştirilebilir.
- Numunelerdeki donatılara gerinim ölçerler (strain-gauge) yapıştırılarak, eksenel yük-eğilme-burulma altındaki betonarme kolonların donatılarında meydana gelen gerilmeler tespit edilerek davranış daha kapsamlı hale getirilebilir. Bu sayede beton ve donatının etkinliği araştırılabilir.
- Deneysel çalışmada servo motor sistemi kullanılarak, elemanlara verilen yükler daha hassas hale getirilebilir.
- Literatürde betonarme kolonların güçlendirilmesi ile ilgili çok sayıda çalışma vardır. Fakat aynı anda eksenel yük-eğilme-burulma etkisindeki betonarme elemanlarda ilgili güçlendirme çalışması yoktur. Mevcut yapı stoğundaki betonarme kolonlar dikkate

alınarak üretilen elemanlar üzerinde çeşitli güçlendirme yöntemleri uygulanarak, eksenel yük-eğilme-burulma etkisindeki betonarme kolonlarda en uygun güçlendirme yöntemi tespit edilebilir.

- Yapılan bu çalışmaya ilave olarak eksenel yük oranı artırılarak, büyük eksenel yük oranlarında eğilme-burulma etkileşimi incelenebilir.
- Geliştirilen plastik mafsallı modelinin TS 500, Eurocode 8 ve ACI 318 gibi yönetmeliklere "burulma düzeltme katsayısı" olarak entegre edilebilir.
- Üçlü etkileşim diyagramı, köprü kolonları ve asimetrik yapılar için tasarım kılavuzlarında yer alabilir. Mevcut deprem yönetmeliklerinde (TBDY-2018, Eurocode-8, ASCE/SEI), burulma etkisinin betonarme kolon tasarımına nasıl entegre edileceği açıkça tanımlanmalıdır. Ayrıca, burulma-eğilme etkileşimini dikkate alan yeni tasarım kriterleri geliştirilmeli ve bu kriterler yönetmeliklere eklenmelidir.
- Pratik mühendislik uygulamalarında, burulma etkisi altındaki kolonlar için "N-M-T" etkileşim diyagramları kullanılmalıdır.
- Burulma hasarı gözlemlenen mevcut yapılarda, köşe kolonlarının FRP sargılarla veya çelik plakalarla güçlendirilmesi önerilmektedir. Güçlendirme tasarımında, burulmanın neden olduğu kesme gerilmelerinin tam olarak karşılanmasına özel önem verilmelidir.

KAYNAKLAR

- ABYYHY, 1975, *Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik*.
- ABYYHY, 1998, *Afet Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*.
- ACI SP-18, 1968, ACI SP-18. *ACI Symposium Volume on Torsion*.
- ACI-445, 2013, *Report on Torsion in Structural Concrete ACI-445.1R-12*.
- AFAD, 2023, *06 Şubat 2023 PAZARCIK (KAHRAMANMARAŞ) MW 7.7 ELBİSTAN (KAHRAMANMARAŞ) MW 7.6 DEPREMLERİNE İLİŞKİN ÖN DEĞERLENDİRME RAPORU*.
- AFAD, 2024, *Deprem Kataloğu*. <https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog>.
- Attarchian, N., Attari, N. K. A. ve Waezi, Z., 2020, Experimental Investigation of the Seismic Performance of Rectangular Reinforced Concrete Columns Subjected to Combined Flexure-torsion Cyclic Loading. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(8), 3954-3976.
- Bach, C., 1890, *Elastizität und Festigkeit*. Die für die Technik wichtigsten Sätze und deren erfahrungsmässige Grundlage.
- Bae, S., & Bayrak, O., 2008, Plastic Hinge Length of Reinforced Concrete Columns. *Structural Journal* , 105(3), 290-300.
- Barbagallo, F., Bosco, M., Floridia, A., Marino, M. E., Panarelli, D., Rossi, P. P., ve Spinella, N., 2022, Calibration of the length of the plastic hinge for numerical models of reinforced concrete members. *Buildings* , 12(10), 1603.
- Berry, M. P. ve Eberhard, M. O., 2008, *PEER Report 2007/07*. https://peer.berkeley.edu/sites/default/files/web_peer707_michael_p._berry_marc_o._eberhard.pdf
- Bishara, A. ve Peir, J. C., 1968, Reinforced concrete rectangular columns in torsion. *Journal of the Structural Division*, 94(12), 2913-2934.
- Bruneau, M., 2002, Building damage from the Marmara, Turkey earthquake of August 17, 1999. *Journal of Seismology*, 6, 357-377.

- Cao, X., Wu, L. ve Li, Z., 2020, Behaviour of steel-reinforced concrete columns under combined torsion based on ABAQUS FEA. *Engineering Structures*, 209, 109980.
- Celep, Z., 2019, *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*. Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş.
- Chen, S., Peng, W. ve Yan, W., 2018, Experimental study on steel reinforced concrete columns subjected to combined bending–torsion cyclic loading. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(11), e1479.
- Coulomb, C. A., 1784, Theoretical and Experimental Research on the Force of Torsion, and on the Elasticity of Metal Wires. *M'emoires de l'Acad'emie Royale des Sciences*.
- Deng, J., Ma, Z. J., Liu, A., Cao, S., ve Zhang, B., 2017, Seismic performance of reinforced concrete bridge columns subjected to combined stresses of compression, bending, shear, and torsion. *Journal of Bridge Engineering*, 22(11), 04017099.
- Elfgren, L. G., 1971, *REINFORCED CONCRETE BEAMS LOADED IN COMBINED TORSION, BENDING AND SHEAR: A STUDY OF THE ULTIMATE LOAD-CARRYING CAPACITY*. Chalmers Tekniska Hogskola.
- Ersoy, U., 1975, *Betonarmede burulma: davranış mukavemet şartnameler hesap için öneriler*. Güven Kitabevi.
- Ersoy, U., 2016, Yönetmeliklerdeki Taşıma Gücü Yöntemleri. *Teknik Dergi*, 27(2), 7453-7467.
- Ersoy, U. ve Ferguson, P. M., 1968, Concrete Beams Subjected to Combined Torsion and Shear-Experimental Trends. *ACI Symposium Volume on Torsion, ACISP-18*, 441-460.
- Ersoy, U., Özcebe, G. ve Canbay, E., 2019, *Betonarme: Davranış ve Hesap İlkeleri* (C. 9). EvrimYayınevi.
- Eurocode-8., 2005, *Design of structures for earthquake resistance*.
- Ewida, A. A. ve McMullen, A. E., 1981, Torsion–shear–flexure interaction in reinforced concrete members. *Magazine of Concrete Research*, 33(115), 113-122.
- Gokdemir, H., Ozbasaran, H., Dogan, M., Unluoglu, E. ve Albayrak, U., 2013, Effects of torsional irregularity to structures during earthquakes. *Engineering Failure Analysis*, 35, 713-717. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2013.06.028>

- Gourley, B. C., Tort, C., Denavit, M. D., Schiller, P. H. ve Hajjar, J. F., 2008, A Synopsis of Studies of the Monotonic and Cyclic Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Members, Connections, and Frames. *Newmark Structural Engineering Laboratory Report Series 008*. <https://hdl.handle.net/2142/5218>
- He, Y. ve Zhang, K., 2020, Finite element analysis of the reinforced concrete specialshaped columns under axial force and torsion. *Materials Science and Engineering*, 892, 012083.
- Hoogenboom, P. C. J., 2006, *Vlasov Torsion Theory*. https://cdm.ing.unimo.it/dokuwiki/_media/wikitelaio2016/b16_chap7.pdf.
- Hsu, T. T., 1968, Torsion of structural concrete-behavior of reinforced concrete rectangular members. *ACI Symposium Volume on Torsion, ACISP-18*, 261-306.
- Hsu, T. T., 1990, Shear flow zone in torsion of reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering*, 116(11), 3206-3226.
- Hsu, T. T., 2017, *Unified theory of reinforced concrete*. Routledge.
- Hsu, T. T. C., & Mo, Y.-L. (2010). *Unified theory of concrete structures*. John Wiley & Sons.
- Hsu, T. T. ve Kemp, E. L., 1969, Background and practical application of tentative design criteria for torsion. *Journal Proceedings*, 66(1), 12-23.
- Hsu, T. T. ve Mo, Y.-L., 1985), Softening of concrete in torsional members-theroy and tests. *Journal Proceedings*, 82(3), 290-303.
- Irani, F. ve Daniali, S., 1993, Reinforced Concrete Columns in Torsion. *Journal of Engineering*, 6(4).
- İlki, A. ve Celep, Z., 2012, Earthquakes, existing buildings and seismic design codes in Turkey. *Arabian Journal for Science Engineering*, 37, 365-380.
- İMO, 2023, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Pazarcık ve Elbistan Depremleri Ön Değerlendirme Raporu .
- Jiao, C., Liu, Y., Wei, B., Li, J., Hu, Z. ve Zhu, G., 2021, Seismic performance of circular reinforced concrete columns subjected to compression, bending and torsion with low and moderate shear span ratio. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21(135).

- Kemp, E. L., Sozen, M. A. ve Siess, C. P., 1961, *Torsion in reinforced concrete*. Civil Engineering Studies SRS-226.
- Koçer, M. ve Ünal, A., 2023, RC structural damages observed after October 30, 2020, Seferihisar—İZMİR earthquake and analytical evaluation of existing sample RC buildings. *Natural Hazards*, 117(1), 237-265.
- Kurrer, K.-E., 2008, The history of the theory of structures: from arch analysis to computational mechanics. *International Journal of Space Structures*, 23(3), 193-197.
- Lessig, N. N., 1959, Determination of the load-bearing capacity of reinforced concrete elements with rectangular cross-section subjected to flexure with torsion. *Beton i Zhelezobeton*, 3.
- Mattock, A. H., 1967, Discussion of "Rotational Capacity of Hinging Regions in Reinforced Concrete Beams," *Journal of the Structural Division*, ASCE, V. 93, No. ST2, Apr. 1967, pp. 519-522. *Journal of Structural Division*, 93(2), 519-522.
- Mitchell, D. ve Collins, M. P., 1974, Diagonal compression field theory-a rational model for structural concrete in pure torsion. *Journal Proceedings*, 71(8).
- Mullapudi, T. R. S. ve Ayoub, A., 2013, Analysis of Reinforced Concrete Columns Subjected to Combined Axial, Flexure, Shear, and Torsional Loads. *Journal of Structural Engineering*, 139(4), 139.
- Naeim, F. ve Marshall, L., 2000, The 1999 earthquake disasters worldwide: how many times do we have to re-learn the fundamentals of seismic engineering? *he Structural Design of Tall Buildings*, 9(2), 161-182.
- Navier, C. L., 1826, *R'esum'e des Lecons Donn'ees `a L'ecole des Ponts et Chaussées sur L'application de la M'ecanique `a L'establissement des Constructions et des Machines*. Firmin Didot p`ere et Fils.
- Nie, J. G., Wang, Y. H. ve Fan, J. S., 2012, Experimental study on seismic behavior of concrete filled steel tube columns under pure torsion and compression–torsion cyclic load. *Journal of Constructional Steel Research*, 79, 115-126. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2012.07.029>
- Nie, J., Wang, Y. ve Fan, J., 2012, Experimental study on seismic behavior of concrete filled steel tube columns under pure torsion and compression–torsion cyclic load. *Journal of Constructional Steel Research*, 79, 115-126.

- Otsuka, H., Takeshita, E., Yabuki, W., Wang, Y., Yoshimura, T. ve Tsunomoto, M., 2004, Study on the seismic performance of reinforced concrete columns subjected to torsional moment, bending moment and axial force. *3th World Conference on Earthquake Engineering No:393*.
- Öcal, C. ve İnce, H. H., 2012, Türkiyede Mevcut Yapı Stoğu ve Kentsel Dönüşüm. *International Journal of Technological Sciences*, 4(2), 89-95.
- Pandit, G. S. ve Mawal, M. B., 1973, Tests of concrete columns in torsion. *Journal of the Structural Division*, 99(7), 1409-1421.
- Park, R., 1989, Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 22(3), 155-166.
- Park, R. ve Paulay, T., 1975, *Reinforced Concrete Structures*. John Wiley & Sons.
- Prakash, S., Belarbi, A. ve You, Y.-M. (2010). Seismic performance of circular RC columns subjected to axial force, bending, and torsion with low and moderate shear. *Engineering Structures*, 32(1), 46-59.
- Priestley, M. J. N., Seible, F. ve Calvi, G. M., 1996, *Seismic design and retrofit of bridges* (1. bs). John Wiley & Sons.
- Priestley, M. J. ve Park, R., 1987, Strength and ductility of concrete bridge columns under seismic loading. *Structural Journal*, 84(1), 61-76.
- Rahal, K. ve Collins, M. P., 1995, Analysis of sections subjected to combined shear and torsion-a theoretical model. *ACI Structural Journal*, 92(4), 1-13.
- Rahal, K. ve Collins, M. P., 2003, Combined torsion and bending in reinforced and prestressed concrete beams. *Structural Journal*, 100(2), 157-165.
- Rausch, E., 1929, *Design of reinforced concrete in torsion*. Technische Hochschule.
- Reid, H. F., 1910, *The California Earthquake of April 18, 1906*.
- Saint-Venant, A. J. C. B., 1855, *Memoire Sur La Torsion Des Prismes*. M'emoires Pr'esent'es Par Divers Savants.
- Solak, A., 2023, *Betonarme Kolonların Eksenel Yük ve Burulma Altındaki Davranışının Deneyisel Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.

TBDY, 2018, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*.

TDY, 2007, *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*.

Timoshenko, S., 1905, On the stability of the flat form of bending of an I-beam under the influence of forces acting in the plane of its greatest stiffness. *Bulletin of St. Petersburg Polytechnic Institute*, 4(3-4), 151-219.

Timoshenko, S., 1948a, *Strength of Materials.-1: Elementary Theory and Problems*. D. Van Nostrand Company, Inc.

Timoshenko, S., 1948b, *Strength of Materials.-2: Advanced Theory and Problems*. D. Van Nostrand Company, Inc.

Tirasit, P. ve Kawashima, K., 2007, Seismic Performance of Square Reinforced Concrete Columns under Combined Cyclic Flexural and Torsional Loadings. *Journal of Earthquake Engineering*, 11(3), 425-452.

TÜİK, 2022, *Bina ve Konut Nitelikleri Araştırması, 2021*.
<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bina-ve-Konut-Nitelikleri-Arastirmasi-2021-45870>.

Ünal, A., 2016, *Sabit Dikdörtgen Kesitli Kirişlerin Farklı Mesnet Koşullarında Kesme Kapasitesinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Valencia, C. S. G., 2018, *Overview of Torsion Design Methods* [PhD]. UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO.

Vlasov, V. Z., 1959, *Thin-walled elastic beams*. PST Catalogue No:428.

Wang, P., Han, Q. ve Du, X., 2014, Seismic performance of circular RC bridge columns with flexure–torsion interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66, 13-30.

Wang, Y.-H., Wang, W. ve Chen, J., 2018, Seismic behavior of steel tube confined RC columns under compression-bending-torsion combined load. *Journal of Constructional Steel Research*, 143, 83-96.

- Yu, Z. ve Shan, D., 2021, An Experimental Study on Behaviour of Reinforced Concrete T-shaped Columns Subjected to Combined Loads. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(3), 906-919.
- Yudin, V. K., 1962, Determination of the load-carrying capacity of rectangular reinforced concrete elements subjected to combined torsion and bending. *Beton i Zhelezobeton [Concrete and Reinforced Concrete]*, 265-269.
- Zhou, J., Chen, Z., Zeng, W. ve Liao, H., 2022, Seismic behavior of steel reinforced concrete column with welded studs subjected to combined action of compression-bending-shear-torsion. *Engineering Structures*, 252, 113727.



EKLER

EK-1

80 mm enine donatı aralığına sahip betonarme kolonun T_0 ve M_0 değerlerinin ayrıntılı hesabı

Verilen bilgiler:

- Kolon boyutları: $b=h=300$ mm
- Kolon yüksekliği: $L=1200$ mm
- Enine donatı aralığı: $s=80$ mm
- Boyuna donatı: $8\phi 14$ (S420)
- Donatı akma dayanımı: $f_y=420$ MPa
- Beton basınç dayanımı: $f_c=25$ MPa

Basit eğilme dayanımı hesabı (M_0)

1. Boyuna donatı alanı (A_s):

$$A_s = 8 \left(\frac{\pi 14^2}{4} \right) = 1231.5 \text{ mm}^2$$

2. Basınç bloğu derinliği (a):

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c b} = \frac{1231.5 \times 420}{0.85 \times 25 \times 300} = 81.2 \text{ mm}$$

3. Basit moment dayanımı (M_0):

$$d = b - d' - \phi_w - \frac{\phi}{2} = 300 - 30 - 10 - 7 = 253 \text{ mm}$$

$$M_0 = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 1231.5 \times 420 \times \left(253 - \frac{81.2}{2} \right) \times 10^{-6} = 109.8 \text{ kN.m}$$

Basit burulma dayanımı hesabı (T_0)

$$\frac{A_0}{s} = \frac{T_0}{2 A_e f_{yw}} \text{ (TS500 Denklem 8.15)} \Rightarrow \frac{78.5}{80} = \frac{T_0}{2 \times 253 \times 253 \times 420} \Rightarrow T_0 = 52.7 \text{ kN.m}$$

160 mm enine donatı aralığına sahip betonarme kolonun T_0 ve M_0 değerlerinin ayrıntılı hesabı

Verilen bilgiler:

- Kolon boyutları: $b=h=300$ mm
- Kolon yüksekliği: $L=1200$ mm
- Enine donatı aralığı: $s=160$ mm
- Boyuna donatı: $8\phi 14$ (S420)
- Donatı akma dayanımı: $f_y=420$ MPa
- Beton basınç dayanımı: $f_c=25$ MPa

Basit eğilme dayanımı hesabı (M_0)

1. Boyuna donatı alanı (A_s):

$$A_s = 8 \left(\frac{\pi 14^2}{4} \right) = 1231.5 \text{ mm}^2$$

2. Basınç bloğu derinliği (a):

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c b} = \frac{1231.5 \times 420}{0.85 \times 25 \times 300} = 81.2 \text{ mm}$$

3. Basit moment dayanımı (M_0):

$$d = b - d' - \phi_w - \frac{\phi}{2} = 300 - 30 - 10 - 7 = 253 \text{ mm}$$

$$M_0 = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 1231.5 \times 420 \times \left(253 - \frac{81.2}{2} \right) \times 10^{-6} = 109.8 \text{ kN.m}$$

Basit burulma dayanımı hesabı (T_0)

$$\frac{A_0}{s} = \frac{T_0}{2A_e f_{yw}} \text{ (TS500 Denklem 8.15)} \Rightarrow \frac{78.5}{160} = \frac{T_0}{2 \times 253 \times 253 \times 420} \Rightarrow T_0 = 26.3 \text{ kN.m}$$