



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**BETONARME KOLONLARIN EKSENEL YÜK
VE BURULMA ETKİSİ ALTINDAKİ
DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Abdulkadir SOLAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Abdulkadir SOLAK tarafından hazırlanan ‘‘Betonaarme Kolonların Eksenel Yük ve Burulma Etkisi Altındaki Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi’’ adlı tez çalışması 13/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri yeleri

Başkan

Doç. Dr. Fatih Süleyman BALIK

Danışman

Prof. Dr. Mehmet KAMANLI

ye

Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez alışması Konya Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından 221004021 no’lu 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.

Abdulkadir SOLAK

Tarih:13.01.2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BETONARME KOLONLARIN EKSENEL YÜK ve BURULMA ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Abdulkadir SOLAK

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mehmet KAMANLI

2023, 168 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Mehmet KAMANLI
Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL
Doç. Dr. Fatih Süleyman BALIK**

Geçmişte, dünyanın birçok yerinde ve özellikle ülkemizde meydana gelen yıkıcı depremlerden sonra yapılan saha incelemelerinde, hasar gören veya yıkılan düzensiz yapılarda burulma hasarları gözlemlenmiştir. Bu hasarların özellikle kolonlarda meydana geldiği de bilinmektedir. Deprem durumunda binalara etkiyen tersinir-tekrarlanır yüklemenin, bina içerisindeki bazı kolonların eksenel yük seviyesinin mevcut durumdan daha yüksek seviyelere ulaştığı bilinmektedir. Bu çalışma ile yapılardaki kolonların farklı seviyelerdeki eksenel yük ve burulma etkisindeki davranışı incelenmesi amaçlanmaktadır.

Literatürde yapılan çalışmalarda betonarme yapılarda mevcut düzensizlikler nedeniyle kolonlarda oluşabilecek burulma etkileri üzerinde yeterince durulmamıştır. Bu nedenle betonarme yapılarda burulma etkisi altındaki kolonların betonarme davranışı incelenmelidir. Bu amaçla yapılan tez çalışmasında, farklı seviyelerde eksenel yük etkisindeki 7 adet kolon üretilmiştir. Üretilen kolonlar üzerinde tersinir-tekrarlanır burulma yüklemesi oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında burulma etkisinin kolona verilmesi amacıyla deney düzeneği tasarımı yapılmıştır.

Test edilen deney numunelerinin burulma ve eksenel yük etkisindeki davranışlarının belirlenmesi için her bir deney numunesine ait deney sonuçları ve deneylerden elde edilen davranış özellikleri, her numunede tespit edilmiştir. Eksenel yük ve burulma etkisindeki kolonların, eksenel yük seviyesinin yanı sıra, burulma etkisindeki kolon davranışı, burulmanın oluşumu ve kolon üzerindeki etkileri, burulma etkisindeki kolonda meydana gelen hasar durumları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalar ve elde edilen veriler ışığında yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Betonarme, Burulma, Davranış, Deneysel Çalışma, Eksenel Yük, Kolon, Yapı

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS UNDER THE EFFECT OF AXIAL LOAD AND TORSION

Abdulkadir SOLAK

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

Advisor: Prof. Dr. Mehmet KAMANLI

2023, 168 Pages

Jury

**Prof. Dr. Mehmet KAMANLI
Assoc. Prof. Dr. Alptuğ ÜNAL
Assoc. Prof. Dr. Fatih Süleyman BALIK**

In the past, torsional damages have been observed in damaged or collapsed irregular structures in field investigations after devastating earthquakes in many parts of the world and especially in our country. It is also known that these damages occur especially in the columns. It is known that the axial load level of some columns in the building reaches higher levels than the current situation with the forward and backward oscillations affecting the buildings in case of earthquakes. In this study, it is aimed to examine the behavior of columns in structures under the effect of axial load and torsion at different levels.

In the studies in the literature, the torsion effects that may occur in the columns due to the irregularities in the reinforced concrete structures have not been sufficiently emphasized. For this reason, the reinforced concrete behavior of columns under the effect of torsion in reinforced concrete structures should be examined. For this purpose, in the thesis study, 7 columns under the effect of axial load at different levels were produced. Cyclic torsional loading was created on the produced columns. In the scope of the study, an experimental setup was designed in order to give the torsional effect to the column.

In order to determine the behavior of the tested test specimens under the effect of torsion and axial load, the test results of each test specimen and the behavioral characteristics obtained from the tests were determined in each specimen. In addition to the axial load level of the columns under the axial load and torsion effect, the behavior of the column under the effect of torsion, the formation of torsion and its effects on the column, damage to the column under the effect of torsion were investigated. The results obtained were interpreted in the light of the studies in the literature and the data obtained.

Keywords: Reinforced Concrete, Torsion, Behavior, Experimental Study, Axial Load, Column, Structure

ÖNSÖZ

“Betonarme Kolonların Eksenel Yük ve Burulma Etkisi Altındaki Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi” isimli bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu çalışma süresinde ve beni tanıdığı ilk günden beri desteğini benden esirgemeyen, engin tecrübesi ile takıldığım yerde her zaman bir çıkış yolu olduğunu gösteren, her zaman bir baba gibi kol kanat geren, bu tez çalışmasının başından sonuna kadar emeği ve katkısı olan danışmanım Sayın Prof. Dr. Mehmet KAMANLI 'ya, bu çalışmada ve akademik hayatta beni her zaman destekleyen, bilgi birikimini benden esirgemeyen, tüm deneylerde yanımda olan, deneysel verilerin toplanması ve sonuçların yorumlanmasında katkıda bulunan hocam Sayın Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL'a, günlük ve akademik hayatta desteklerini benden esirgemeyen, bu tez kapsamında deney verilerinin işlenmesinde ve deney sonuçlarının yorumlanmasında katkıda bulunan Sayın Öğr. Gör. Salih Cengiz'e ve bu tez çalışmasının planlamasında büyük katkısı olan Prof. Dr. Barış BİNİCİ 'ye teşekkürlerimi sunarım.

Numunelerin üretimi ve malzeme tedariki konusunda büyük emeği geçen İnş. Müh. Ramazan DİNÇ 'e, üretimde destek olan Sayın Tefik YARDIMCI 'ya ve Yardımcı Prefabrik AŞ'ye teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında laboratuvar çalışmalarında büyük emek veren Sayın Yüksel ÇİFTÇİ 'ye teşekkür ederim. Tüm deneylerde emeği geçen arkadaşlarıma ve meslektaşlarıma teşekkür ederim.

Çalışmalarım ve hayatım boyunca bana en büyük desteği ve sevgiyi veren, her zaman yanımda olan, benimle geçireceği vakitten fedakarlık eden çok değerli eşim Gülfem Zehra YANIK SOLAK 'a sonsuz teşekkür ediyorum.

Bu tez çalışmasını, şu günlerde kucağımıza aldığımız, bana bugüne kadar hiç hissetmediğim duyguları yaşatan, mutluluktan ağlatan, hayatıma neşe katan biricik kızım Peren 'e armağan ediyorum.

Abdulkadir SOLAK
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Burulma Momenti.....	3
1.1.1. Denge ve uygunluk burulması	5
1.1.2. Burulma momenti yaklaşımları	7
1.1.3. Burulma teorileri.....	9
1.1.4. Yönetmeliklerde burulma	17
1.2. Çalışmanın Amacı.....	22
1.3. Çalışmanın Önemi	25
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	29
3. MATERYAL VE YÖNTEM	42
3.1. Deney Numuneleri	44
3.1.1. Deney numunelerinin boyutları	45
3.1.2. Deney numunelerinin donatı detayları ve özellikleri.....	49
3.2. Malzeme Özellikleri	52
3.2.1. Beton özellikleri.....	53
3.2.2. Donatı özellikleri	55
3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması	58
3.4. Deney Düzeneği, Ölçüm Tekniği ve Ölçümlerin Değerlendirilmesi	64
3.4.1. Deney düzeneği ve düzeneğin hazırlanması.....	65
3.4.2. Ölçüm tekniği	74
3.4.3. Yükleme protokolü	75
3.4.4. Ölçümlerin değerlendirilmesi	76
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI	82
4.1. Deney Sonuçları.....	83
4.1.1. Deney 1 (SN-0).....	83
4.1.2. Deney 2 (SN-1).....	90
4.1.3. Deney 3 (SN-2).....	100
4.1.4. Deney 4 (SN-3).....	110
4.1.5. Deney 5 (SN-4).....	121
4.1.6. Deney 6 (SN-5).....	130
4.1.7. Deney 7 (SN-6).....	140
4.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	150

4.2.1. Moment-dönme grafiklerinin karşılaştırılması	150
4.2.2. Rijitlik grafiklerinin karşılaştırılması.....	153
4.2.3. Kümülatif tüketilen enerji kapasitelerinin karşılaştırılması.....	155
4.2.4. Eksenel yük değişimlerinin karşılaştırılması	156
4.2.5. Hasar durumlarının karşılaştırılması.....	157
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	159
5.1. Sonuçlar	159
5.2. Öneriler	164
6. KAYNAKLAR.....	165



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_{oh}	: Enkesitin enine donatı ile sarılı alan (Uzay kafes analogisi)
A_o	: Kesitte kayma gerilmesinin meydana geldiği alan
A_0	: Diyagonal basınç alanı teorisinde kayma gerilmesi akımı içinde kalan alan
A_e	: Enkesitin çekirdek bölgesi alanı
A_c	: Enkesitin alanı (ACI-318)
A_k	: Enkesit köşelerindeki boyuna donatı ile belirlenen alan
A	: Enkesitin toplam alanı
A_t	: Enine donatı bir kolunun kesit alanı
$A_{t(min)}$: Minimum boyuna donatı alanı (ACI)
A_l	: Boyuna donatının alanını
A_{sw}	: Etriye donatısı alanını (Eurocode)
A_t	: Kum tümseği analogisinde burulma momenti
b	: Dikdörtgen enkesitin kısa kenar uzunluğu
b_k	: Dikdörtgen enkesitin çekirdeğinin kısa kenar uzunluğu
h	: Dikdörtgen enkesitin uzun kenar uzunluğu
h_k	: Dikdörtgen enkesitin çekirdeğinin uzun kenar uzunluğu
ϵ_x	: Birim boyda meydana gelen uzama
τ_T	: Burulmadan oluşan kayma gerilmeleri
τ_{max}	: Maksimum kayma gerilmesi
τ_{cr}	: Çatlama kayma gerilmesi
$\tau_{t,i}$: Burulmadan dolayı oluşan kayma gerilmesi
T	: Burulma momenti
T_u	: Maksimum burulma momenti
T_{cr}	: Çatlama neden olan burulma momenti
T_{ed}	: Burulma momenti (Eurocode)
T_{Rd1}	: Basınç çubuklarında karşılanacak maksimum burulma momenti (Eurocode)
T_{Rd1}	: Donatılardan karşılanacak maksimum burulma momenti (Eurocode)
ϕ	: Eğrilik, Dönme Açısı
θ	: Eksenel dönme, Elastisitede kesitin dönme açısı
s	: Enine donatı adım aralığı
σ_{ct}	: Asal çekme gerilmeleri
D	: Dairesel kesitlerde çap
H	: Yükseklik
h_e	: Kesitin et kalınlığı
R_o	: Çatlama kadar burulma rijitliği
R	: Çatlama sonrası burulma rijitliği
P_o	: Kayma gerilmesi akımının olduğu çevre uzunluğu
β	: h/ b oranına bağlı bir katsayı
α	: h/ b oranına bağlı bir katsayı
G	: Kayma modülü
R	: Çatlak sonrası oluşan eğim
S	: TS-500'de kesit geometrisine ve boyutlarına bağlı bir katsayı
f_c	: Betonun tek eksenli basınç dayanımı (ACI)
f_c'	: Ortalama silindirik basınç dayanımı
f_{cu}	: Küp basınç dayanımı
f_{ck}	: Betonun tek eksenli basınç dayanımı

f_{ctk}	: Betonun tek eksenli çekme dayanımı
f_{ctd}	: Betonun tek eksenli tasarım çekme dayanımı
f_{yt}	: Enine donatının akma dayanımı
f_{yk}	: Donatının akma dayanımı
f_{yd}	: Donatının tasarım akma dayanımı
f_{yv}	: Enine donatıların akma dayanımı (Yanal Eğilme teorisi)
f_{yl}	: Boyuna donatının akma dayanımı
f_{yld}	: Boyuna donatının tasarım akma dayanımı
f_{ywd}	: Etriye donatısı tasarım akma dayanımı
M_a	: Kolonun alt ucunda meydana gelen eğilme momenti
$M_ü$: Kolonun üst ucunda meydana gelen eğilme momenti
L_{net}	: Kolonun net uzunluğu
L_{toplam}	: Kolon toplam uzunluğu
b_w	: Kiriş genişliği
$h_{kiriş}$: Kiriş yüksekliği
L	: Çalışmada iki potansiyometrik cetvel arası mesafe
$L_{k(net)}$: Kiriş uzunluğu
δ	: Potansiyometrik cetvelden ölçülen deplasman
ϕ	: Rijitlik (kN/mm)
k	: Burulma Rijitliği (kNmm/rad)
θ	: Çalışmada kolonda meydana gelen dönme açısı
θ_{er}	: Çatlama momentinde meydana gelen dönme
θ_n	: Nihai durumda meydana gelen dönme
μ	: Dönme süneklik faktörü
x	: Kesit boyutu
y	: Kesit boyutu
x_1	: Enine donatıda kısa kolun uzunluğu
y_1	: Enine donatıda uzun kolun uzunluğu
m	: Yanal eğilme teorisinde bir katsayı
α_t	: Yanal eğilme teorisinde bir katsayı
α_1	: Yanal eğilme teorisinde bir katsayı
θ	: Uzay kafes analogisi için diyagonal eğimi
t	: Kiriş çevresindeki her birim uzunluk için kayma gerilmesi
P_h	: Enine donatıda boyuna eksen içinde kalan alan çevre uzunluğu
P_c	: Enkesitin tüm kenar uzunlukları toplamı (ACI)
N	: Kolona verilecek eksenel normal yük
N_d	: Kolon üzerine etkiyecek tasarım yükü
F	: Kolona verilecek yatay yük
S	: Çalışma kapsamında kare kolon
kg	: Ağırlık birimi
m^3	: Hacim birimi
mm^2	: Alan birimi
$V_{sd,i}$: Kesme kuvveti (Eurocode)
$t_{ef,i}$: Etkili cidar kalınlığı
u	: Enkesitin en dış çevresi
u_e	: Enkesitin çekirdek bölümü çevresi
v	: Eurocode' a göre burulmada bir katsayı
z_i	: Cidar kenar uzunluğu

Kısaltmalar

- ACI : American Concrete Institute
ASCE : The American Society of Civil Engineers
B420c : Akma Dayanımı 420 MPa Donatı
C16 : Karakteristik silindir dayanımı 16 MPa Beton
C40 : Karakteristik silindir dayanımı 40 MPa Beton
CFRP : Karbon elyaf takviyeli polimer
CFST : Beton doldurulmuş çelik tüp
MPa : Gerilme Birimi
SEI : Structural Engineering Institute
TBDY : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TS500 : Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları



1. GİRİŞ

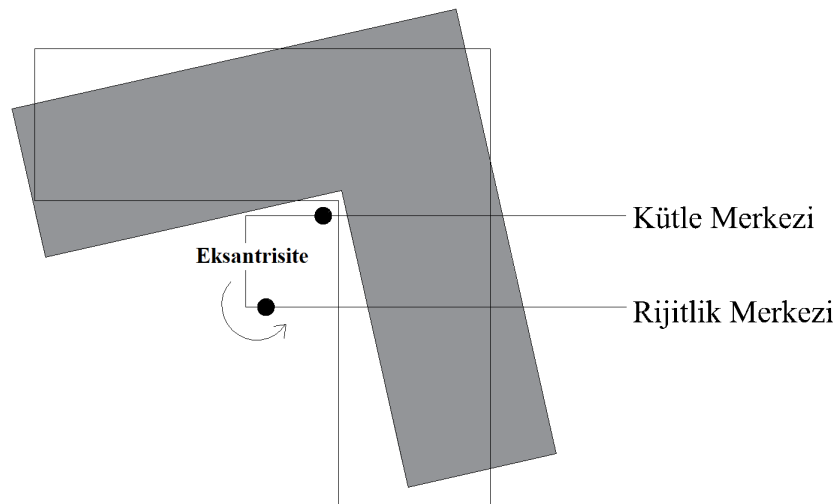
Deprem kuşağında bulunan ülkemizde yapıların depreme dayanıklı tasarlanması önem arz etmektedir. Ülkemiz yapı stoğu büyük çoğunlukla betonarme yapılardan oluşmaktadır (Ünal, 2016). Bu nedenle depreme dayanıklı tasarım için betonarme yapı davranışının iyi bilinmesi gerekmektedir. Betonarme davranışı hususunda sahip olunan bilgi birikimi 19. yüzyıldan günümüze kadar yapılan deneysel çalışmalar ve son yıllarda teknolojinin gelişmesiyle birlikte artan analitik çalışmaların etkisiyle artmaktadır (Ersoy ve ark., 2019).

Yapıya etki eden sabit yükler veya deprem, rüzgâr gibi hareketli yükler altında yapının nasıl bir davranış sergileyeceği, yapı taşıyıcı sisteminin davranışına bağlıdır. Betonarme taşıyıcı elemanlar birleşerek taşıyıcı sistemi oluşturmaktadır. Taşıyıcı sistem elemanları gelen dış yüklerin etkisi ile eğilme, kesme ve eksenel kuvvet etkileri altında kalmaktadır. Ayrıca yapıya etki eden deprem kuvvetlerine, yapı taşıyıcı sisteminin ve taşıyıcı elemanların düzenlenmesine bağlı olarak yapıda burulma momenti gibi ilave etkiler oluşmaktadır. Eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti nedeniyle oluşan gerilmelerin yanı sıra burulma momentinin etkimesi ile betonarme taşıyıcı eleman davranışı daha karmaşık hale gelmektedir.

Betonarme taşıyıcı elemanlarda mevcut etkilere ek olarak oluşan burulma momenti elemandaki kesme kuvvetinin değişmesine sebep olmaktadır. Betonarme tasarımı yapılan elemanda burulma nedeniyle kesme kırılması meydana gelmektedir. Fakat betonarme taşıyıcı elemanlarda kesme kırılması oluşması istenmez Çünkü kesme kuvvetleri ve normal kuvvetin etkisi ile oluşan asal çekme gerilmeleri nedeniyle taşıyıcı elemanda çatlak oluşumları başlamaktadır ve bu gerilmeler sonuç olarak elemanda gevrek kırılmaya neden olmaktadır (Ersoy ve ark., 2019)

Deprem yükleri yapının kütle merkezinden etkimektedir. Bunun yanı sıra yapı deprem etkilerine karşı rijitlik merkezi denene noktada karşı koymaktadır (Şekil 1.1). Kütle ve rijitlik merkezinin aynı noktada bulunmadığı düzensiz yapılarda, kütle ve rijitlik merkezleri arasında eksantrisite nedeniyle; yapı, rijitlik merkezi etrafında dönmeye zorlanmakta ve yapıda büyük burulma momentleri oluşmaktadır (Gokdemir ve ark., 2013). Yapıda burulma nedeniyle en fazla zorlanma özellikle köşe kolonlarda meydana gelmektedir (Cengiz ve ark., 2022). Fakat ne eski yönetmeliklerde ne de mevcut yönetmeliğimiz olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY-2018) deprem etkisi altındaki düzensiz yapıların kolonlarında oluşabilecek burulma etkileri dikkate

alınmamaktadır. Kolon tasarımında göz ardı edilen burulma momenti, elemanda beklenenden fazla hasara neden olmaktadır.



Şekil 1.1 Düzensiz yapılarda burulmanın oluşumu

Yapıda statik yükler etkisinde zemin kat kolonları yüksek seviyede aksenal yük taşımakta ve üst katlara çıkıldıkça kolona etki eden aksenal yük seviyesi azalmaktadır. Kolon üzerindeki aksenal yük seviyesinin azalması ile elemanda süneklik artmakta ve davranışta değişim meydana gelmektedir (Ersoy ve ark., 2019).

Deprem meydana geldiğinde burulma etkisine maruz kalan kolonun aksenal yük seviyesi değişmektedir. Kolonlarda dinamik yüklerin etkisiyle aksenal yük seviyesi daha yüksek veya düşük mertebelerde oluşmakta ya da kolon üzerinde çekme kuvvetleri oluşabilmektedir. Bir başka deyişle düzensiz yapılarda farklı aksenal yük seviyelerindeki kolonlar burulmaya maruz kalmaktadır (Cengiz ve ark., 2022). Burulma etkisindeki kolonların farklı aksenal yük seviyelerinde olması elemanın sünekliğini değiştirmektedir. Bu nedenle kolonun burulma etkisindeki davranışının aksenal yüke bağlı değişiminin incelenmesi gerekmektedir.

Deprem kuşağında yer alan ülkemizde herhangi bir depremde oluşabilecek hasar ve kayıpları en aza indirmek için -yapı stoğumuzda çok sayıda bulunan- düzensiz yapılardaki kolonların burulma etkisi altındaki davranışının araştırılması, yapı davranışının belirlenmesi ve burulmaya maruz kalabilecek yapıların depreme dayanıklı tasarımı bakımından önem arz etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında farklı aksenal yük seviyelerindeki betonarme yapı kolonlarında aksenal yük seviyesinin değişimine bağlı betonarme kolon davranışı deneysel olarak araştırılmıştır.

1.1. Burulma Momenti

Bir eleman üzerindeki tek kesit etkisinin bir kuvvet çifti olması durumu burulma momenti hali olarak tanımlanmaktadır. Gerçek bir yapı sisteminde burulmanın bir kesit üzerindeki tek etki olması ender rastlanmaktadır. Fakat betonarme eleman üzerinde tüm etkilerin birlikte olduğu durumdaki betonarme davranışın tam olarak belirlenebilmesi için basit burulma etkisindeki kesit davranışının bilinmesi gerekmektedir (Kayan, 1992).

Burulma, betonarme yapı sistemlerinde rijitlik merkezi ve kütle merkezi arasındaki dış merkezlik nedeniyle, yapı taşıyıcı sisteminin yerleşiminden veya yapıya etki eden yüklerin simetrik olmayan yayılışlarından kaynaklanmaktadır. Yapıdaki taşıyıcı sistem elemanlarının birçoğu burulma etkisine maruz kalmaktadır (Ersoy, 1975).

Burulma çatlama, eğilme ve kesme etkilerine göre elemanın rijitliğini daha fazla değiştirmektedir. Burulma etkisindeki betonarme taşıyıcı elemanda çatlaklar diyagonal kesme çatlakları olarak ve 45° 'lik eğimle ve eleman boyunca oluşmaktadır. (Şekil 1.2)



Şekil 1.2 Burulmada kesme çatlakları (Ersoy ve ark., 2019)

Burulma çatlama sırasında oluşan uyum nedeniyle yapıda oluşan hasar etkisi eğilmeden çok daha büyüktür. Burulma çatlaklarının oluşmasıyla enkesit rijitliği çatlama öncesi rijitliğin $1/10$ 'u ile $1/30$ 'u arasında değişebilmektedir (Ersoy ve ark., 2019). Burulma rijitliğinin azalması ile enkesit, burulma momenti altında dönmekte ve kesit zorlamalarını diğer elemanlara aktarmaktadır. Bu durumda sistemde uyum meydana gelmektedir. Bu nedenle burulma momenti hesaplanırken, burulma çatlama dikkate alınmalıdır (Celep ve Kumbasar, 1998). Betonarme taşıyıcı elemanların burulma

hesabında, burulma momentini belirlenirken çatlamaı ihmal eden doğrusal-elastik bir yöntem kullanmak çok yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir.

Dikdörtgen kesitli, donatısız bir beton numune basit burulma altında deneye tabi tutulduğunda, kesme çatlaklarının oluşması ile elemanda gevrek kırılma oluşmaktadır. Burulma etkisi ile meydana gelen çatlaklar elemanın üç yüzünde asal çekme gerilmelerine (σ_{ct}) dik yönde oluşurken, diğer yüzde basınç ezilmesi meydana gelmektedir (Ersoy, 2001).

Taşıyıcı elemana boyuna donatılar yerleştirildiğinde elemanın davranışı değişmemektedir. Elemanda enine donatıların ve boyuna donatıların kullanılması ile burulmada taşıma gücünde belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Eleman kırılma konumuna ulaşmadan çok sayıda çatlak oluşmaktadır (Ersoy, 1998)

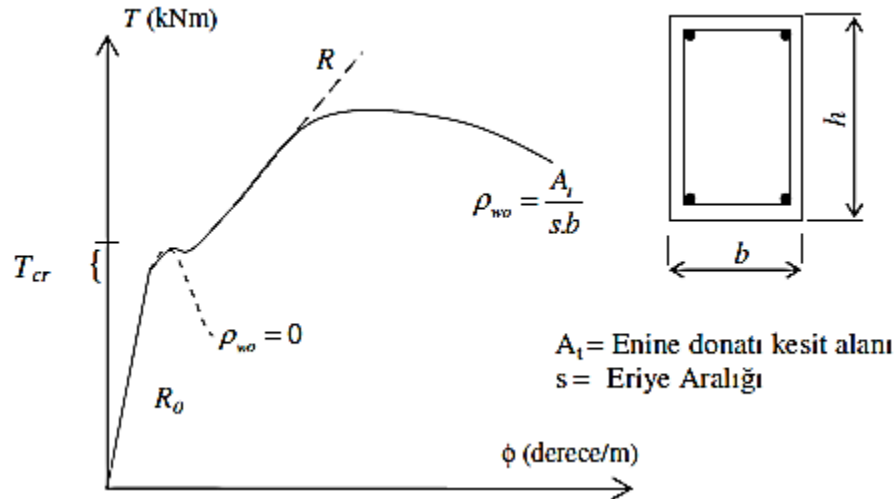
Burulma çatlaklarının oluşması ile betonarme deney numunelerinin boyu uzamakta ve birim boydaki uzama ihmal edilemeyecek derecede artmaktadır ($\epsilon_x=1,5 \times 10^{-3}$). Numune boyunun uzaması ile boyuna donatılar da uzamaktadır. Bu nedenle burulma etkisindeki elemanlarda boyuna donatı önemli rol üstlenmektedir (Ersoy, 1975; İnan, 2001).

Betonarme taşıyıcı elemanlarda burulma etkisinde elde edilen Burulma momenti-birim dönme açısı ($T-\phi$) eğrisinin eğimi, betonarme elemanın burulma rijitliğini göstermektedir (Şekil 1.3). Burulma çatlamasını belirleyen T_{cr} düzeyine kadar burulma davranışı doğrusal seyretmektedir. Literatürde moment-birim dönme açısı eğrisinin başlangıcında bulunan doğrusal bölümde burulma rijitliğinin donatıdan bağımsız olduğu sonucuna varılmaktadır. Elemanın çatlamasına kadar olan bu bölümde burulma rijitliğinin elastisite teorisine göre hesaplanabilmektedir (Celep ve Kumbasar, 1998).

Elemanda çatlamaı kadar olan burulma rijitliği;

$$R_0 = \frac{T}{\phi} = G \sum \beta b^3 h \quad (1)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bağıntıda b ve h; dikdörtgen enkesitin kenar uzunluklarını, G kayma modülünü ve β ; h/ b oranına bağlı bir katsayıyı (betonarmede β yaklaşık 3 alınabilir), göstermektedir (Ersoy, 1975; İnan, 2001).



Şekil 1.3 Burulma momenti-birim dönme açısı grafiği (Ersoy ve ark., 2019)

Betonarme elemana burulma momenti uygulandığında, burulma çatlama oluşuncaya kadar enine donatı ve boyuna donatıdaki birim şekil değiştirmeler ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Burulma çatlama oluşmasıyla donatıdaki birim deformasyonlar birden artar ve dolayısıyla donatı etkili olmaya başlar. Burulma çatlama oluşması ile $T-\phi$ eğrisinin eğimi (burulma rijitliğini) önemli ölçüde azalmaktadır ve kesitte donatılar etkili olmaya başlamaktadır. R olarak ifade edilen burulma çatlama sonrası eğim, burulma donatısına bağlı olarak değişmektedir (Ersoy, 1975; 2001; İnan, 2001; Ersoy ve ark., 2019)

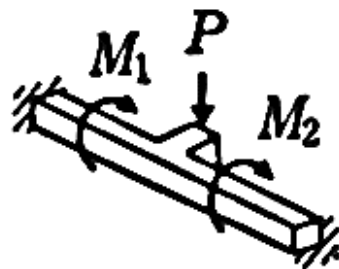
Betonarme elemanlara burulma denge ve uygunluk burulması olarak iki şekilde etki etmektedir. Günümüze kadar betonarme elemanlarda meydana gelen burulmanın hesabına ve betonarme elemanın davranışına etkisini belirlemeye yönelik çok sayıda yaklaşım ve teori ortaya atılmıştır. Burulmanın betonarme elemanın davranışına etkisini belirlemek için öncelikle bu teoriler üzerinde durulacaktır.

1.1.1. Denge ve uygunluk burulması

1.1.1.1. Denge burulması

Burulma momentinin dengede olması gerektiğinde ve maksimum burulma momentinin (T_u), elemana etki eden momentlerin yeniden dağıtılmasıyla azaltılamaması durumunda denge burulması durumu ortaya çıkmaktadır. Bu durumda, elemanın

maksimum burulma momentinde yeterli dayanımı elde edecek şekilde burulma donatısı teşkil edilmelidir (Şekil 1.4) .

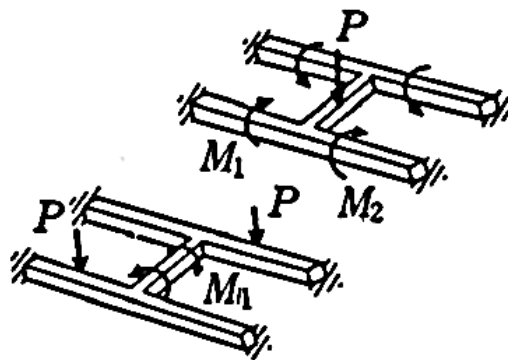


Şekil 1.4 Denge burulması (JSCE, 2010)

Bu tür burulma aynı zamanda birincil burulma olarak da bilinmektedir. Betonarme elemanın tasarımında denge burulması mutlaka göz önüne alınmalıdır. Denge burulmasına örnek olarak konsol döşemeyi taşıyan kenar kirişi verilebilir.

1.1.1.2. Uygunluk Burulması

Burulma etkisindeki betonarme elemanda deformasyon uyumu korunurken, iç kuvvetlerin yeniden dağıtılmasıyla burulma momentinin azaltılabilmesi durumunda uygunluk burulması ortaya çıkmaktadır (Şekil 1.5).



Şekil 1.5 Uygunluk burulması (JSCE, 2010)

Bu tür burulma aynı zamanda ikincil burulma olarak da bilinmektedir. Burulma momenti belirlenirken denge denklemlerinin yanı sıra elemanlarda meydana gelen şekil değiştirmelerin bilinmesi gerekmektedir. Uygunluk burulmasına örnek olarak burulma momenti oluşan kirişi destekleyen kenar kirişi örnek verilebilir.

1.1.2. Burulma momenti yaklaşımları

1.1.2.1. Elastisitede burulma

Burulma etkisi altında betonarme elemanın kesitinde oluşan statikçe belirsiz gerilme yayılımı probleminin çözümü, şekil değiştirmeler hesaba katılmadan yapılamamaktadır. Elastisite teorisinde dairesel kesitli betonarme elemanın şekil değiştirmesi deneysel ve gözlemler verilere dayanarak yaklaşık olarak belirlenebilmektedir. Dikdörtgen kesitlerde ise çarpılma etkisinden dolayı şekil değiştirmeler net olarak tespit edilememektedir. Bu nedenle dikdörtgen kesitlerin çözümünde elastisite teorisinden yararlanılamamaktadır (Kayan, 1992)

1.1.2.2. Plastisitede burulma

Plastisite teorisi ile burulma hesabında, kayma gerilmelerinin kesitin her noktasında sabit olduğu ve taşıyıcı elemandaki tüm kesitlerin plastik olduğu kabul edilmektedir. Hesap kolaylığını sağlamak amacıyla membran analogisine çok benzeyen kum tümseği analogisi kullanılmaktadır.

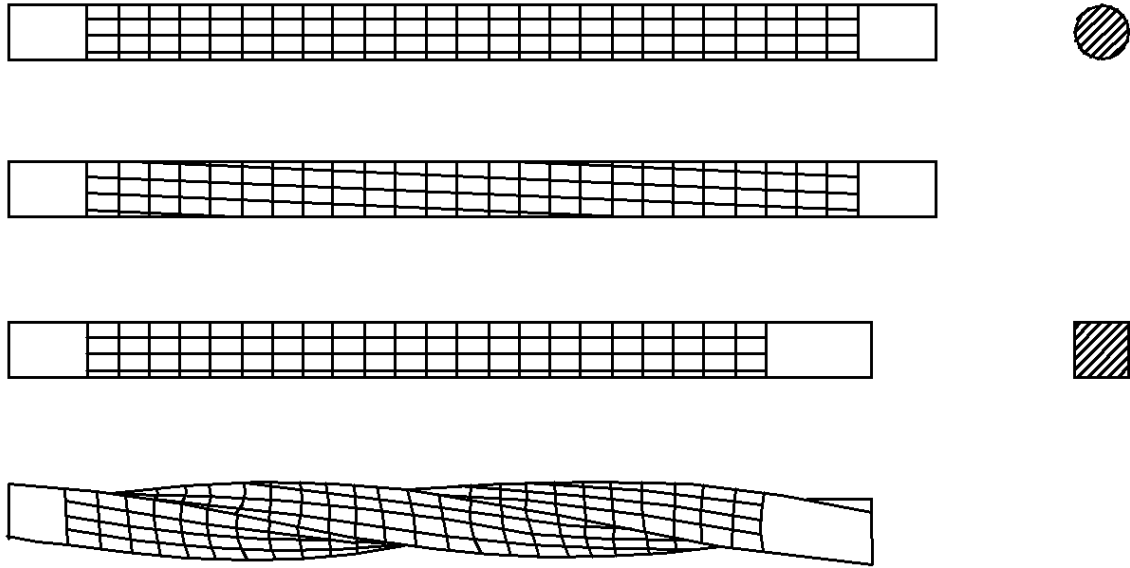
1.1.2.3. Coulomb burulması

Burulma momenti etkisindeki dairesel kesitlerin şekil değiştirmeleri ile ilgili ilk defa Coulomb tarafından ortaya konan varsayımlara göre;

- Enkesitlerde oluşan şekil değiştirme, çubuk eksenini etrafında meydana gelen bir katı cisim dönme hareketidir.
- Burulmadan etkisinden önce düzlem olan dairesel kesitler burulma etkisinden sonra da düzlem olarak kalmaktadır.
- Enkesitlerin çubuk eksenini etrafında yaptıkları dönme açıları, çubuğun sabit burulma ile yüklü olması halinde çubuk eksenini üzerindeki herhangi bir noktaya uzaklığı ile orantılıdır.

1.1.2.4. Elastisitede dairesel olmayan çubukların burulması

Dairesel enkesite sahip olmayan çubukların, burulma esnasındaki şekil değiştirmesinde, elemanın düzlem kesitleri burulmanın etkimesi ile düzlem kalmayıp çarpılmaktadır. Bu tür kesitlerde burulma etkisindeki çubuk düzlem olarak kalmayıp “kesit çarpılması” oluşmaktadır (Şekil 1.6).



Şekil 1.6 Dairesel olmayan kesitlerde kesit çarpılması (Abdelkader ve ark., 2015)

Dairesel olmayan kesitler burulma şekil değiştirmesinde bir katı cisim dönme hareketi yapmazlar. Bu nedenle kayma gerilmeleri hesaplanırken sadece kesit dönmeleri değil çarpılmadan oluşan kaymaların da hesaplanması gerekmektedir (Öztek, 2007).

1.1.2.5. Basit burulma

Betonarme elemanlarda basit burulmaya genellikle rastlanmaz. Betonarme elemanlara burulma genellikle eğilme ve kesme ile etki etmektedir. Bu nedenle, basit burulmanın ayrıntılı olarak irdelenmesi gereksiz görülse de basit burulma tıpkı kolonlardaki aksenal yük durumu gibi bir sınır durum oluşturduğundan, basit burulma altındaki dayanımın ve betonarme elemanın davranışının araştırılması gerekmektedir.

Basit burulmada meydana gelen asal çekme gerilmeleri, kesitte kayma gerilmelerine eşit olmaktadır. Literatürde basit burulmaya maruz elemanlar üzerine yapılan çalışmalarda betonun tek aksenal çekme dayanımı olan;

$$\tau_{cr} = 0,35 \sqrt{f_{ck}} \quad (2)$$

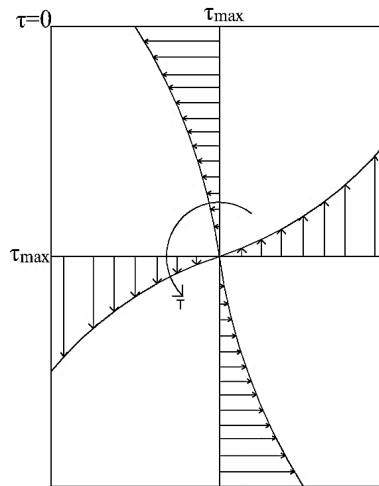
değerinin burulma için alt sınır oluşturduğu ortaya konulmuştur. Bu alt sınır baz alınıp; $0,35 \sqrt{f_{ck}}$ yerine f_{ctk} yazılırsa, betonarme elemanın basit burulma etkisindeki çatlaması için (3) numaralı bağıntı elde edilmektedir (Öztek, 2007).

$$T_{cr} = \frac{1}{2} \sum x_i^2 \left(y_i - \frac{x_i}{3} \right) f_{ctk} \quad (3)$$

1.1.3. Burulma teorileri

1.1.3.1. Elastisite teorisi

Geçen yüzyılın ortalarına kadar dairesel kesitli olmayan elemanların burulması elastisite teorisine göre incelenmiştir. Elastisite Teorisine göre kenarların orta bölgesinde kesme kuvvetleri maksimum değere ulaşmakta köşe noktalarda ise kayma gerilmeleri oluşmamaktadır (Şekil 1.7).



Şekil 1.7 Elastisite teorisinde burulma nedeniyle oluşan kayma gerilmesi dağılımı (Kayan, 1992)

Elastik teoriye göre burulmada oluştuğu kabul edilen kayma gerilmelerinin diferansiyel denklemi ile aynı olan bir benzerliği kullanmak hesaplarda kolaylık sağlamaktadır. Prandtl tarafından bulunan ve elastik teoride kullanılan bu benzerliğe “membran/zar analogisi” adı verilmektedir. Bu analogide bir levha üzerinde kesit şeklinin aynısı olan bir delik ağılıp delik sabun filmi ile kaplanır. Film alttan hava basıncı verilerek şişirilir. Delik üzerinde zarın kubbeleşmesi ile oluşturduğu yzzey probleminin sınır şartları ve diferansiyel denklemi elastisitedeki burulma yaklaşımı ile benzerlik gstermektedir. Elastisitede bir noktadaki kayma gerilmesi ile membranın eğimi arasındaki orantı ile doğrultuların eř ykseklik eğrisine teğet olması ve membran altındaki hacmin iki katının enkesitin taşıdığı burulma momentinin orantılı olması gibi benzerliklerinden yararlanılır. Bu benzerlikten yararlanılarak kesitlerdeki kenar uzunlukları oranlarına bağlı katsayılar cinsinden maksimum kayma gerilmesi τ_{\max} ve kesitin d3nme açısı θ , (4) ve (5) no’lu bağıntılardaki gibi tespit edilebilir.

$$\theta = \frac{T}{\beta G h b^3} \quad (4)$$

$$\tau_{\max} = \frac{T}{\alpha h b^2} \quad (5)$$

Bu bağıntılarda α ve β katsayıları, kesitin uzun kenar uzunluğunun kısa kenar uzunluğuna oranına bağlı olarak izelge 1.1’de verilen değerleri almaktadır (Kayan, 1992).

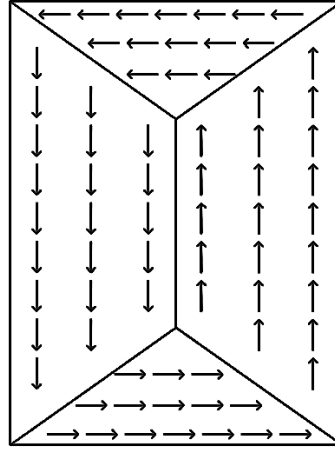
Çizelge 1.1 α ve β katsayıları (h/b oranına bağlı olarak)

h/b	1,00	1,50	1,75	2,00	2,50	3,00	4,00	6,00	8,00	10,00	∞
α	0,208	0,231	0,239	0,246	0,258	0,267	0,282	0,299	0,307	0,313	0,33
β	0,141	0,196	0,214	0,229	0,249	0,263	0,281	0,299	0,307	0,313	0,33

1.1.3.2. Plastisite teorisi

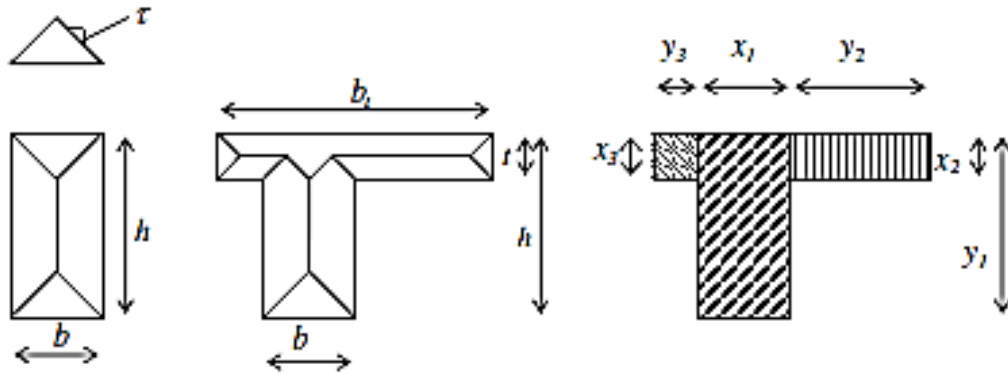
Yapılan deneyler sonucunda kesme gerilmelerinin kesitin uzun ve kısa kenarları boyunca sabit kaldığı tespit edilmiştir. Kesme gerilmelerinin uzun ve kısa kenar boyunca sabit kalması burulma momenti etkisindeki dairesel olmayan elemanlar için elastisite

teorisi yerine plastisite teorisinin hesaplarda daha iyi sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Plastisite teorisinde oluşan kayma gerilmesi dağılımı Şekil 1.8'de verilmektedir. Plastisite teorisi için elde edilecek denklemleri elde etmek için kum tümseği analojisi kullanılmaktadır. Plastisite teorisinde elde edilecek denklemleri kum tümseği analojisi ile elde etmek işlemlerde büyük bir kolaylık sağlayacaktır.



Şekil 1.8 Plastisite teorisinde burulma nedeniyle oluşan kayma gerilmesi dağılımı (Ersoy, 1986)

Kum tümseği analojisi yatay konumda tutulan kesit üzerine dökülen kohezyonsuz kumun kesitte aldığı şekil ile plastisite teorisinde kesitte oluşan gerilme dağılımının benzerliği baz alınmaktadır (Şekil 1.9).



Şekil 1.9 Kum tümseği analojisi ve enkesitin dikdörtgenlere bölünmesi (Ersoy ve ark.,2019)

Kum tümseği analojisine göre plastisitedeki kesme gerilmesi kum tümseğinin eğimine eşit olmaktadır. Ayrıca bu durumdaki tümseğin hacmi kesitte taşınabilecek burulma momentinin yarısına eşit olmaktadır. Bu analoji kullanılarak bazı kesitler için çıkarılan denklemler;

Dikdörtgen kesitler
$$T = \frac{\tau_t}{2} b^2 \left(h - \frac{b}{3} \right) \quad (6)$$

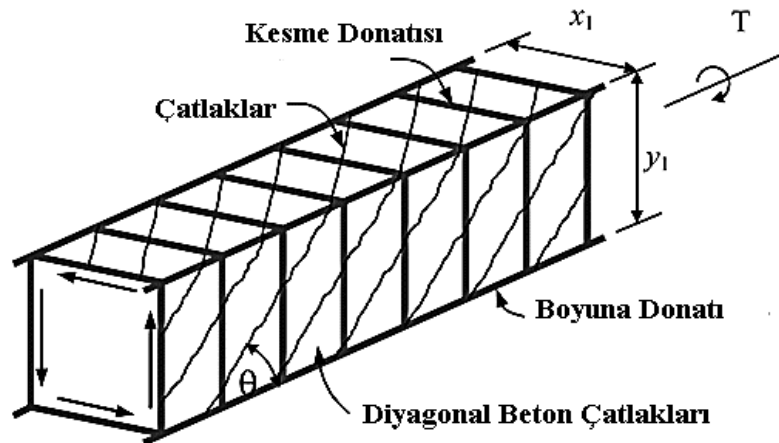
Tablalı kesitler
$$T = \frac{\tau_t}{2} \left[b_w^2 \left(h - \frac{b_w}{3} \right) + t^2 (b - b_w) \right] \quad (7)$$

Tablalı kesit (Dikdörtgenlere bölünmüş)
$$T = \frac{1}{2} \sum x_i^2 \left(y_i - \frac{x_i}{3} \right) \tau_i \quad (8)$$

Kiriş davranışı burulma çatlama sonucu önemli ölçüde değişmektedir. Burulma çatlama kesit rijitliğini çok fazla azaltması nedeniyle burulma etkisinin hesaplanması oldukça önemli olmaktadır. Plastisite teorisinin geçerli olduğu durumda elemanda çatlama neden olan burulma momenti T_{cr} , (6), (7), (8) bağıntılarında bulunan τ yerine betonun çekme dayanımı konularak hesaplanmaktadır.

1.1.3.3. Uzay kafes analojisi

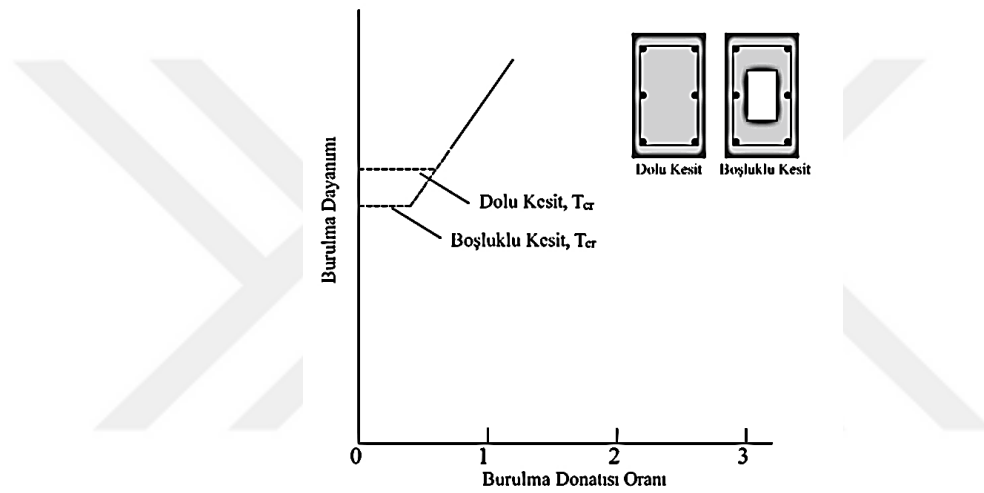
Betonarme bir elemanın kapasitesini hesaplamak için birçok matematik ve fiziksel model önerilmiştir. Burulma hakkında ilk teori 1929 yılında ortaya atılmıştır. Rausch tarafından ortaya atılan bu teoride kesitin orta bölgesindeki gerilmeler çeperlerdeki gerilmelere göre daha düşük değerler alması nedeniyle, içi boşluklu kesitler tercih edilmiştir (Şekil 1.10).



Şekil 1.10 Uzay kafes analojisi (Tang, 2006)

Bu yaklaşıma göre içi boş ve dolu kesitlerin burulma kapasitelerinin benzer olduğunu söylenebilmektedir.

Boşluklu ve tam dolu kesitin burulma dayanımı-burulma donatısı oranı grafiği Şekil 13'te görülmektedir. (Ersoy, 1975) Grafikte her iki kesit için kritik burulma momenti değeri farklıdır ancak burulma momenti taşıma kapasitelerinin her iki kesit için eşit olduğu görülmektedir. Burulma etkisindeki elemanlarda burulma kapasitesinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan boşluklu kesit modeli uzay kafes analogisinin temelini oluşturmaktadır (Şekil 1.11).



Şekil 1.11 İçi boş ve dolu kesitin burulma dayanımı-burulma donatısı oranı grafiği (Ersoy ve ark., 2019)

Bu analogide asal basınç yönündeki beton basınç elemanlarını, donatılar ise çekme elemanlarını temsil etmektedir.

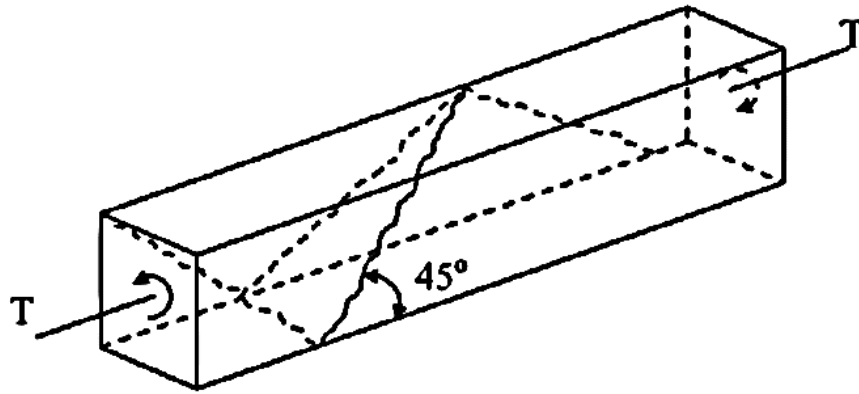
Modele göre burulma momenti,

$$T = \frac{2xyA_t f_{yt}}{s} \quad (9)$$

bağıntısı ile belirlenmektedir. burada A_t ; enine donatının bir kolunun alanını, f_{yt} ; enine donatının akma dayanımını, s ; enine donatı aralığını göstermektedir (Zhang, 2002; Tang, 2006).

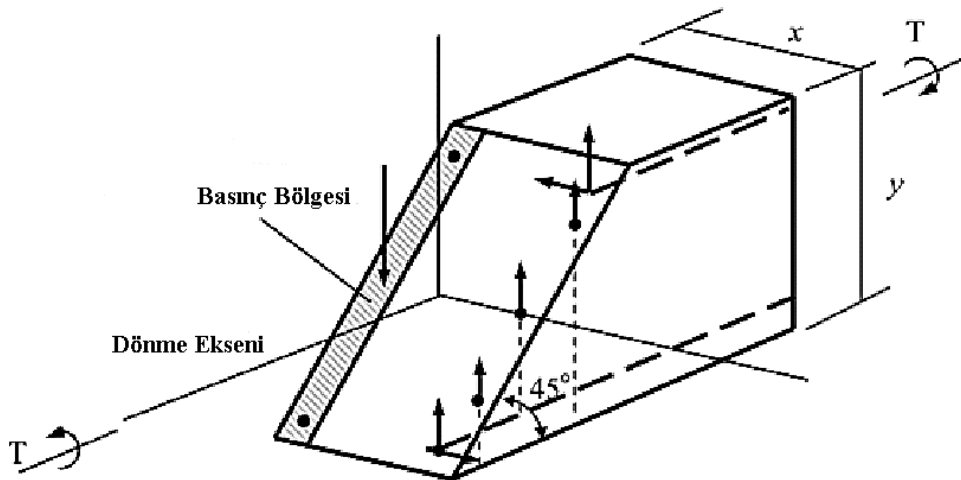
1.1.3.4. Yanal Eğilme Teorisi

Betonda davranışın tam elastik veya tam plastik olmaması nedeniyle elastik teori ile bulunan burulma, elemanın burulma taşıma kapasitesinin daha düşük değerlerde; plastik teoriye göre ise elemanın burulma kapasitesinin üzerinde sonuçlar vermektedir. Bu nedenle burulma etkisindeki beton veya betonarme elemanlarda kırılma mekanizmasının yeniden gözden geçirilmesi gerekmektedir (Şekil 1.12) (Zhang, 2002).



Şekil 1.12 Yanal eğilme teorisine göre kırılma (Tang, 2006)

Yanal eğilme teorisine göre, betonarme elemanın burulma dayanımı, enine donatıda meydana gelen aksenal kuvvetten, boyuna donatıda oluşan çekme kuvvetinden, betonun kayma ve basınç mukavemetinden oluşmaktadır (Şekil 1.13) (Zhang, 2002).



Şekil 1.13 Betonarme elemanlar için yanal eğilme teorisi (Tang, 2006)

Betonarme elemanlar için geliştirilen yanal eğilme teorisine göre burulma momenti;

$$m = \frac{2A_t s}{2A_t(x_1 + y_1)} \quad (10)$$

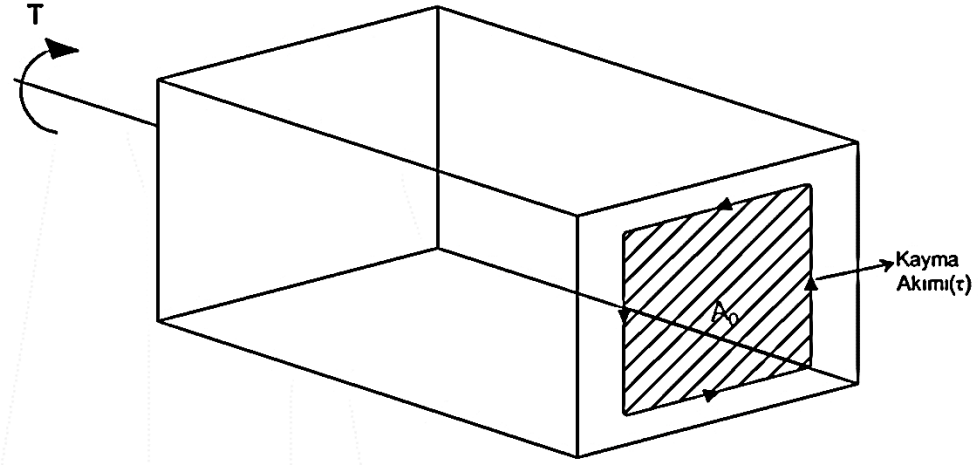
$$\alpha_t = \sqrt{m} \frac{f_{yl}}{f_{yv}} (1 + 0,2 \frac{y_1}{x}) \leq 1,6 \quad (11)$$

$$T = 0,8(\sqrt{f_c})b^2h + \alpha \frac{x_1 y_1 f_{yv}}{s} \quad (12)$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır. Formülde yer alan A_t ; elemanın kayma ve basınç bölgesinde bulunan boyuna donatı alanını, f_{yl} ; mevcut boyuna donatının akma dayanımını, f_{yv} ; enine donatılar için akma dayanımını, x_1 ; enine donatının kısa kolunun uzunluğunu, y_1 ; enine donatının uzun kolunun uzunluğunu, s ; enine donatı aralığını göstermektedir (Zhang, 2002; Tang, 2006).

1.1.3.5. Diyagonal basınç alanı teorisi

Burulma momentinin, elemanın etrafında oluşan diyagonal beton basınç gerilmeleri ile taşındığı kabul edilmektedir. Elemandaki basınç gerilmelerinin tanjant bileşeninin elemanda kayma gerilmelerinden oluşan bir gerilme akımı oluşturduğu varsayılmaktadır (Şekil 1.14). Teoriye göre, denge koşullarını, donatılardaki uygunluk bağıntılarından ve betonun gerilme şekil değiştirme ilişkisinden yararlanılarak hesap yapılmaktadır (Onsongo, 1978; Collins ve Mitchell, 1980).



Şekil 1.14 Diyagonal basınç teorisine kayma akımının oluşumu (Zhang, 2002)

Bu teoriye göre , burulma momenti;

$$T = 2A_0\tau \quad (13)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bağıntıda t ; kirisin kenarları boyunca her birim uzunluktaki kayma gerilmesini A_0 ; kayma akımı içinde kalan gerilme alanını göstermektedir.

Teoriye göre burulma bağıntısında yer alan kayma gerilmesi;

$$\tau = \sqrt{\frac{A_t f_{yl}}{P_0} \frac{A_t f_{yt}}{s}} \quad (14)$$

formülü ile belirlenmektedir. Formülde yer alan A_t ; elemandaki enine donatı alanını, A_1 ; elemandaki boyuna donatı alanını, f_{yl} ; boyuna donatının akma dayanımını, f_{yt} ; enine donatının akma dayanımını, s ; enine donatı aralığını, P_0 ise kayma gerilmesi akımının oluştuğu kenarların toplam uzunluğunu göstermektedir (Narayanan ve Kareem-Palanjian, 1986).

1.1.4. Yönetmeliklerde burulma

Betonarme yapıların tasarımı üzerine hazırlanan yönetmelik ve şartnamelerde, basınç-eğilme-kesme etkilerinin yanında burulma etkisinin dahil olduğu betonarme bir kolon için hesap ve tasarıma yönelik bir yöntem sunulmamaktadır. Ülkemizde (TS500, 2000; TBDY, 2018), Amerika’da (ACI-374, 2005; ASCE/SEI, 2017), Avrupa’da (Eurocode-8, 2005) kullanılan yönetmeliklerde, yalnızca kirişler için burulma etkisindeki tasarım ve hesapları içermektedir. Betonarme kolonların burulma kapasitesinin hesaplanmasına ilişkin bilgilere yalnızca Japonya’da kullanılan şartnamede yer verilmiştir (Gourley ve ark., 2008).

1.1.4.1. TS 500 (2000)

Ülkemizde geçerli olan bu standarta göre betonarme kirişlerin burulmada çatlama momentinin;

$$T_{cr} = 1,35 f_{ctd} S \quad (15)$$

bağıntısıyla hesaplanması önerilmektedir. Burulma etkisindeki kirişte, S değeri dikdörtgen enkesitler, tablalı enkesitler ve dairesel veya dış bükey çok kenarlı enkesitler için sırasıyla ;

$$S = \frac{b_w^2 h}{3} \quad (16)$$

$$S = \frac{1}{3} \sum x_i^2 y_i \quad (17)$$

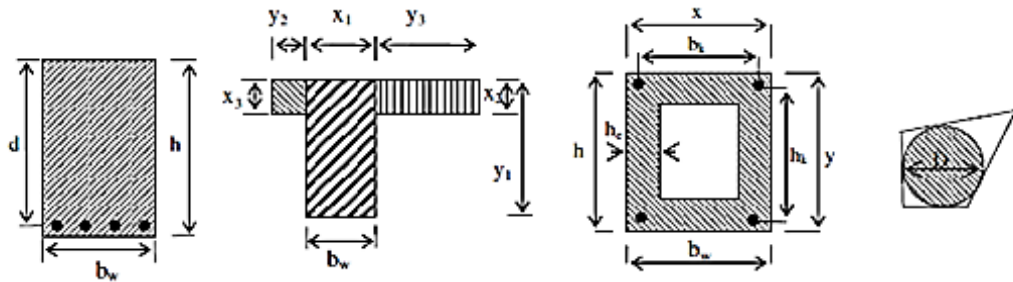
$$S = \frac{\pi D^3}{12} \quad (18)$$

olarak tanımlanmaktadır. Kutu enkesitler için ise, kesitin et kalınlığına bağlı olarak,

$$h_e \geq \frac{1}{5}x \text{ için, } S = \frac{1}{3}x^2 y \quad (19)$$

$$h_e \leq \frac{1}{5}x \text{ için, } S = 2b_k h_k h_e \quad (20)$$

formülleri ile hesaplanmaktadır (Şekil 1.15).



Şekil 1.15 Dikdörtgen, tablalı, kutu ve çok kenarlı dış bükey enkesitler (TS500, 2000)

TS 500'de minimum enine donatı alanı ve minimum boyuna donatı alanı;

$$A_t = \frac{T_{cr} S}{2A_e f_{ywd}} \quad (21)$$

$$A_{sl} = \frac{A_{ot}}{s} u_e \frac{f_{ywd}}{f_{yd}} \quad (22)$$

bağıntıları ile hesaplanabilmektedir. Bu bağıntılarda;

$$A_e = b_k h_k \quad (23)$$

$$u_e = 2(b_k + h_k) \quad (24)$$

değerleri kullanılmaktadır (TS500, 2000).

1.1.4.2. ACI 318-08

ACI 318-08 yönetmeliğinde basit burulma etkisindeki dikdörtgen bir enkesitin çatlama momentinin;

$$T_{cr} = 0,33\sqrt{f_c} \frac{A_c^2}{P_c} \quad (25)$$

formülü ile hesaplanması önerilirken, burada A_c ; enkesitin tüm alanını, P_c ; enkesitin tüm kenar uzunluklarının toplamını ve f_c beton dayanımını göstermektedir.

Yönetmelikte uzay kafes analogisine göre burulma momenti değeri;

$$T = \frac{2A_t f_{yv} A_0}{s} \cot \theta \quad (26)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bağıntıya göre A_t ; enine donatıda bir kolun alanını, f_{y1} ; boyuna donatının akma dayanımını, f_{yv} ; enine donatının akma dayanımını, A_0 ; kayma akımının meydana geldiği tüm alanı, A_{oh} ; enine donatının orta ekseninin içinde kalan alanı, P_h ; enine donatının boyuna eksenin içinde kalan alanın çevre uzunluğunu göstermek üzere;

$$A_0 = 0,85A_{oh} \quad (27)$$

$$\cot \theta = \sqrt{\frac{A_t f_{y1} s}{A_t f_{yv} P_h}} \quad (28)$$

bağıntılarıyla hesaplanması önerilmektedir. Minimum enine donatı ve boyuna donatı alanı için;

$$A_{t(\min)} = 0.41 \frac{\sqrt{f_c'}}{f_{yv}} \frac{A_c}{P_c} s \quad (29)$$

$$A_{t(\min)} = 0.66 \frac{\sqrt{f_c'}}{f_{yl}} A_c - \frac{A_t}{s} P_h \frac{f_{yv}}{f_{yl}} \quad (30)$$

bağıntıları şartnamede verilmektedir. Şartnamede çatlak genişliklerinin sınırlandırılması amacıyla enkesitte oluşabilecek maksimum burulma momentinin;

$$T_{\max} = 1,41 \sqrt{f_c'} \frac{A_{oh}^2}{P_h} \quad (31)$$

bağıntısından hesaplanan moment değerini aşmaması önerilmektedir. Ayrıca yanıl eğilme teorisinde kullanılan katsayının hesabı için;

$$\alpha_1 = 0,66 + 0,33x_1y_1 \leq 1,5 \quad (32)$$

bağıntısının kullanılması önerilmektedir (ACI-318, 2008).

1.1.4.3. Eurocode 2

Burulma etkisindeki betonarme enkesitlerde burulma hesaplamaları için ince cidarlı tüp benzeşimi yaklaşımından yararlanılmaktadır (Şekil 1.16). İnce cidarlı tüp benzeşimine göre dolu enkesitler yerine enkesite eşdeğer ince cidarlı tüp enkesitler ele alınması ve tablalı enkesitlerin dörtgenlere ayrılarak hesapların yapılması önerilmektedir.

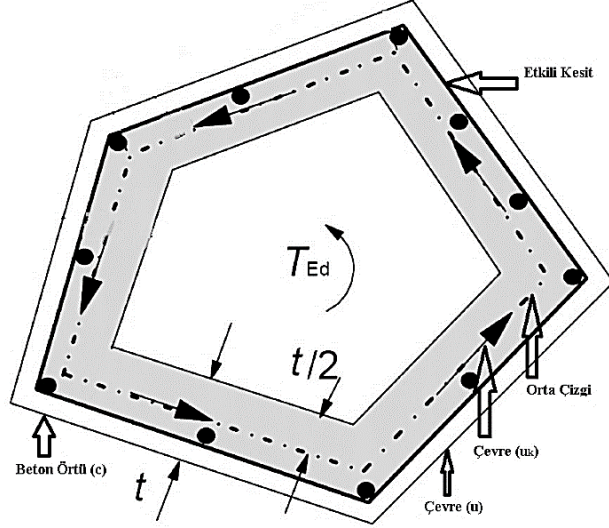
T_{ed} olarak ifade edilen basit burulma momentini hesaplamak için,

$$t_{ef,i} = A / u \quad (33)$$

$$\tau_{t,i} = \frac{V_{sd,i}}{t_{ef,i} z_i} \quad (34)$$

$$T_{ed} = 2\tau_{t,i} t_{ef,i} A_k \quad (35)$$

bağıntılarından yararlanılmaktadır. Bağıntılarda yer alan $V_{sd,i}$; elemana etki eden kesme kuvvetini, A_k ; enkesitin köşelerinde yer alan boyuna donatı ile belirlenen orta çizginin meydana getirdiği alanı, $t_{e,i}$; burulmadan meydana gelen kayma gerilmesini, $t_{ef,i}$; etkili cidar kalınlığını, A ; enkesitin toplam alanını, u ; enkesitin en dış çevresini, z_i ; cidar kenar uzunluğunu göstermektedir.



Şekil 1.16 Eurocode 2 yönetmeliğine göre kayma merkezi ve burulmanın oluşumu

Burulma için gerekli boyuna donatının hesaplanması için;

$$A_{sl} = \frac{T_{ed} u_k}{2 A_k f_{yl}} \cot \theta \quad (36)$$

bağıntısı kullanılmaktadır. Bağıntıda u_k ; enkesitin köşelerinde yer alan boyuna donatı ile belirlenen orta çizginin meydana getirdiği alanın çevresini, f_{yl} ; boyuna donatının akma gerilmesini, θ ; beton basınç çubuklarının boyuna eksenle yapmış olduğu açığı göstermektedir.

Enkesitte meydana gelen burulma momentinin güvenli bir şekilde taşınabilmesi için, burulma sırasında ortaya çıkan beton basınç çubukları tarafından taşınabilecek en büyük burulma momenti T_{Rd1} 'den ve donatı tarafından karşılanabilecek en büyük burulma momenti T_{Rd2} 'den büyük olması gerekmektedir. Burada;

$$v = 0,7 - \frac{f_{ck}}{200} \geq 0,5 \quad (37)$$

formülü kullanılarak;

$$T_{Rd1} = 1,4v f_{cd} t A_k \sin \theta \cos \theta \quad (38)$$

$$T_{Rd2} = \frac{2 A_k f_{ywd} A_{sw} \cot \theta}{s} \quad (39)$$

değerleri belirlenmektedir. Enkesitte donatıların belirli olması durumunda ise;

$$T_{Rd2} = 2 A_k \sqrt{\left(\frac{A_{sw} f_{ywd}}{s} \right)} \sqrt{\left(\frac{A_{sl} f_{yld}}{u_k} \right)} \quad (40)$$

bağıntısı ile donatının taşıyabileceği burulma momenti hesaplanabilmektedir (Eurocode-2, 2004).

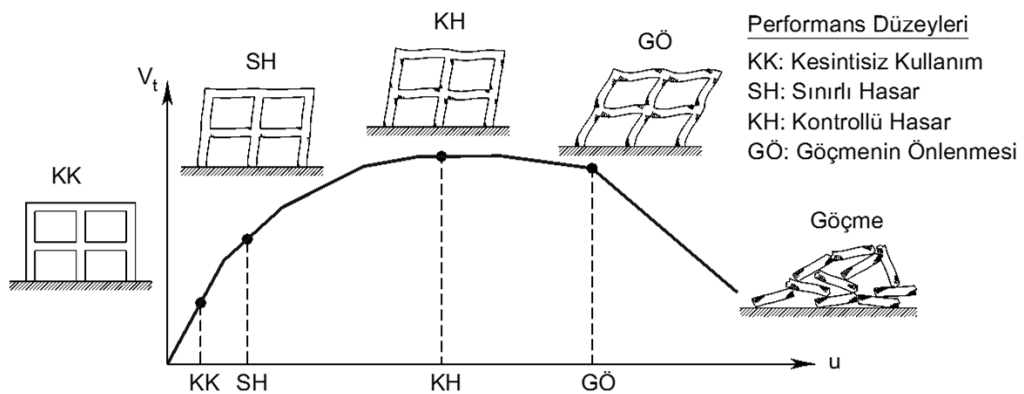
1.2. Çalışmanın Amacı

Ülkemizde ve birçok yerde meydana gelen depremlerde hasar gören yapılar incelendiğinde yapıların bazılarında burulma etkilerinin olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 1.17). Düzensizliğe sahip yapılar düzenli bir yapıdan farklı davranış göstermektedir (Tezcan ve Alhan, 2001). Ülkemizde mevcut yapı stoğunda çok sayıda bulunan düzensiz yapılarda deprem meydana geldiğinde, yapıya burulma yükleri etki etmektedir.



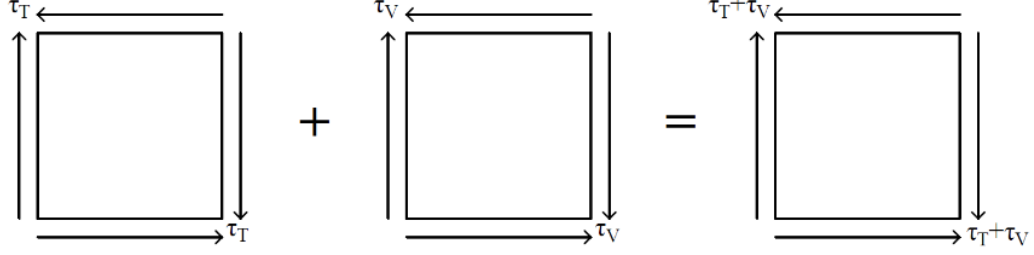
Şekil 1.17 Deprem etkisiyle kolonda meydana gelen burulma hasarı (Attarchian ve ark., 2020; THBB, 2020)

TBDY-2018'e göre betonarme tasarım yapılırken yapının deprem etkisi altında belirli düzeylerde hasarı kabul edebilmesi beklenmektedir. Yönetmeliğe göre tasarımda elemanlar üzerinde eğilme, aksenal yük, kesme etkileri üzerinde durulmaktadır. Ancak bu etkilerin yanı sıra deprem yükleri altındaki düzensiz yapılarda burulma da oluşmaktadır. Tasarımda dikkate alınmayan burulma etkileri nedeniyle yapıda beklenenden daha fazla hasar oluşmakta ve tüm elemanlardaki burulma etkileri yapıda bir araya geldiğinde yapı göçme hasar düzeyine ulaşmaktadır (Şekil 1.18).



Şekil 1.18 Bina performans düzeyleri (TBDY, 2018)

Düzensiz yapıda burulma etkileri oluştuğunda yapıdaki hasarın büyük bir çoğunluğu kolonlarda meydana gelmektedir. Burulma etkisindeki kolonlarda, kesitte yüksek miktarda kayma gerilmesi oluşmaktadır. Eğilmeden oluşan kayma gerilmeleri ile deprem etkisi nedeniyle burulmadan oluşan kayma gerilmeleri kesitte birlikte meydana geldiğinde (Şekil 1.19), kesitte kesme kırılması adı verilen, asal çekme gerilmeleri nedeni ile oluşan kırılma türü ile karşılaşılmaktadır (Kaltakçı, 2010).



Şekil 1.19 Eğilmeden ve burulmadan oluşan kesmenin birlikte etkimesi (Kaltakçı, 2010)

Deprem sonrasında bazı düzensiz yapılarda yapılan incelemelerde kolonlardaki burulma hasarları açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Elemanda diyagonal çatlaklar yaklaşık 45°'lik açılarla ve kolon boyunca oluşmaktadır (Prakash Shanmugam ve ark., 2012). Burulma kolon kesitinin tümüne etkilediğinden kolonun tüm yüzeylerinde hasar oluşumunu görmek mümkün olmaktadır (Şekil 1.20). Burulma hasarı sonucunda kolonun taşıma gücü kapasitesi değişmektedir (Nie ve ark., 2012). Bu nedenle burulmaya maruz kalması öngörülen bir elemanın deprem etkileri altındaki davranışının tespit edilmesi gerekmektedir.



Şekil 1.20 Düzensiz yapılarda burulmanın oluşumu (Zhou ve ark., 2000)

Geçmişte dünyanın birçok yerinde ve özellikle ülkemizde meydana gelen yıkıcı depremlerden sonra yapılan saha incelemelerinde hasar gören veya yıkılan binaların bazılarında da burulma hasarları meydana gelmiştir. Bu hasarların özellikle kolonlarda meydana geldiği de bilinmektedir. Deprem durumunda binalara etkiyen ileri ve geri salınımlar ile bina içerisindeki bazı kolonların eksenel yük seviyesinin mevcut durumdan daha yüksek seviyelere ulaştığı bilinmektedir. Bu çalışma ile yapılardaki kolonların farklı seviyelerdeki eksenel yük ve burulma etkisindeki davranışının incelenmesi amaçlanmaktadır.

1.3. Çalışmanın Önemi

Deprem hareketlerinin yoğun olduğu ülkemizde yapıların depreme dayanıklı olarak tasarlanması önem arz etmektedir. Sürekli gelişen bilgi ve teknolojilere paralel artan ihtiyaçlar doğrultusunda, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) yürürlüğe girmiştir. Kontrol ve denetlemelerin sıklaştırılması, malzeme kalitesi ve malzeme dayanımlarının artması ve üretimde hazır beton kullanımının zorunlu hale gelmesi ile daha düzenli ve depreme karşı daha dayanıklı yapılar üretilmektedir. Yönetmelikte yapıların güçlendirilmesi üzerinde ciddi şekilde durulmaktadır. Çünkü ülkemizde mevcut yapıların birçoğu 1975, 1998, ve 2007 yıllarındaki deprem

yönetmeliklerine göre tasarlanmıştır ve mevcut şartlarda bu yapıların birçoğunun TBDY-2018'e göre güçlendirilmesi gerekmektedir. Geçmiş yönetmeliklerdeki tasarım koşullarına uygun yapılan yapıların önemli bir kısmının deprem dayanımının yetersiz olduğu yadsınamaz bir gerçektir. Bu yapıların yapım ve projelendirme sürecindeki kontrol eksiklikleri, malzeme kalitesinin düşük ve çeşitliliğinin az olması, nervürsüz donatı kullanımı, etriye sıklaştırmasının yapılmaması, agrega kalitesizliği, agrega olarak deniz kumunun kullanılması, üretimde hazır beton kullanımının yetersiz olması gibi etkenler yapılarda dayanımın daha da düşmesine neden olmuştur. Ayrıca yapı stoğumuzda bulunan yapıların mimari tasarımlar veya taşıyıcı sistemdeki düzensizlikler yapıların birçoğunun düzensiz olmasına neden olmuştur.

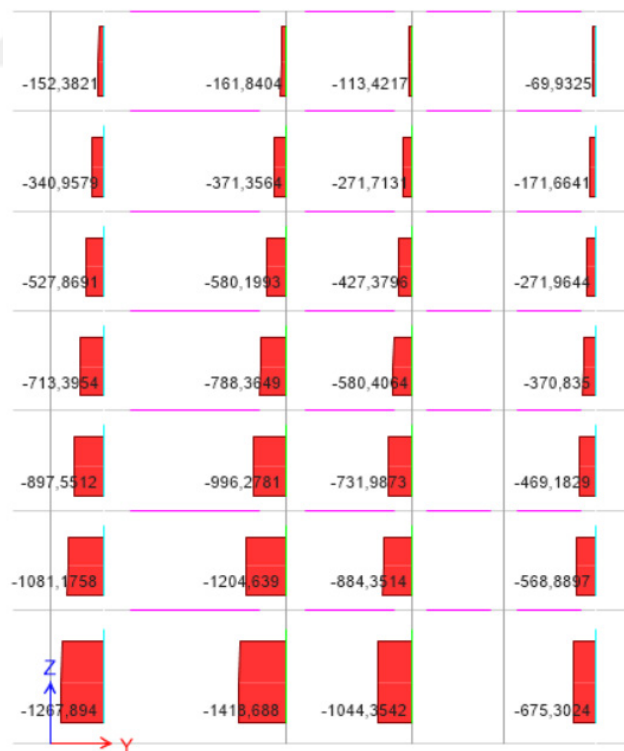
Ülkemizde 30 Ekim 2020 tarihli İzmir Depremi, 24 Ocak 2020 tarihli Elazığ Depremi ve 23 Kasım 2022 Düzce Depremi, ülkemizin deprem gerçeği ile yüz yüze olduğunu göstermektedir. Bu depremlerde incelenen yapılardan bazılarında yapı sisteminin düzensiz olması nedeniyle kolonlarda burulma hasarına rastlanmıştır (THBB, 2020). Deprem kuşağında yer alan ülkemizde herhangi bir depremde oluşabilecek hasar ve kayıpları en aza indirmek, aynı zamanda kentsel dönüşüm ve yapı sağlığı izleme çalışmalarının geliştirilmesi, ülkemiz adına oldukça önemlidir.

Tasarımda göz ardı edilen burulma etkileri yapı elemanlarında beklenenden fazla hasara neden olmaktadır. Fakat ne eski yönetmeliklerde ne de kullanımda olan yönetmeliklerde deprem etkisi altındaki düzensiz yapıların kolonlarında oluşabilecek bu burulma etkileri dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle yapı stoğumuzda çok sayıda olan düzensiz yapılardaki elemanların burulma etkisi altındaki davranışının bilinmesi gerekmektedir. Özellikle yapıdaki en önemli taşıyıcı elemanlardan biri olan kolonların davranışının, burulma etkisi altında nasıl değiştiği araştırılmalıdır.

Betonarme yapı tasarımında kullanılan yönetmeliklerde kolon tasarımında eksenel yük, eğilme ve kesme etkileri dikkate alınmaktadır. Yapıda statik yükler etkisinde zemin kat kolonları yüksek seviyede eksenel yük taşımakta ve üst katlara çıkıldıkça kolona etki eden eksenel yük seviyesi de azalmaktadır. Eksenel yük seviyesinin değişimi ile elemanın sünekliği dolayısıyla da davranışı değişmektedir. Ayrıca deprem etkisi oluştuğunda, dinamik yüklerin etkisiyle, kolonlarda eksenel yüklemeler çok daha yüksek mertebelerde oluşabilmekte ya da kolon üzerinde eksenel yük etkileri azalabilmektedir. Örnek bir yapıdaki kolonların depremin olmadığı yüklemeler altındaki eksenel yüklenme durumu ve depremin dahil olduğu yük kombinasyonları etkisindeki eksenel yüklenme durumu Şekil 1.21'de gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 1.21 Kolonların aksenal yük durumu, (a) depremsiz yük kombinasyonu, (b) depremin dahil olduğu yük kombinasyonu

Görüleceği üzere deprem etkisi ile yapıdaki kolonlarda eksenel yük seviyeleri değişim göstermiştir. Eksenel yükün değişimi ile burulma etkisindeki kolonda, davranış daha karmaşık bir hal almaktadır. Bu nedenle burulmanın meydana gelebileceği düzensiz yapı kolonlarında eksenel yükün değişimi ile kolonun burulma etkisindeki davranışının değişiminin incelenmesi gereklidir. Ayrıca kolonlarda, burulmanın kritik olduğu eksenel yük seviyelerinin tespit edilmesi oldukça önemlidir.

Çalışmadan elde edilen veriler ışığında, değişken eksenel yük seviyelerindeki kolonlarda muhtemel hasarlar oluşmadan gerekli güçlendirmelerin uygulanması ile kesitin kayma güvenliği sağlanarak elemanın göçme durumuna ulaşması önlenilecektir.

Kolonlarda burulma ve eksenel yük etkisinin araştırılmasının, burulmanın dahil olduğu farklı kombinasyonlu yükleme durumlarındaki betonarme kolon davranışının araştırılması için bir temel teşkil etmesi düşünülmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yapılan literatür araştırmasında taşıyıcı elemanların burulma etkisi altındaki davranışlarının incelemesi konusunda çalışmalar 1900'lü yıllardan beri yapılmakta olup, 2000'li yıllardan sonra yoğunluk kazanmıştır. Yapılan analitik çalışmalarda çoğunlukla yapıdaki plan geometrisinin burulma düzensizliğine etkisi incelenmiştir. Elemanların burulma etkisindeki davranışı üzerine ise az sayıda analitik çalışma yapılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarda komple bir yapı ile çalışmanın zorluğu nedeniyle çoğunlukla elemanların burulma davranışı incelenmiştir. Ancak çalışmaların büyük bir çoğunluğu kirişler üzerinde ve salt burulma etkisinde gerçekleştirilmiştir. Kolonlar üzerine yapılan çalışmalarda ise çoğunlukla eğilme ve burulma etkileşimi incelenmiş, çoğunlukla kompozit kolonlar üzerine çalışılmıştır.

Ersoy, 1967 yılından itibaren yapılan sistem deneyleri ile burulma çatlama sonrasında rijitliğin azalmasını ve elemanda meydana gelen uyumu araştırmıştır. Deneylerde elastisite teorisine göre yapılan burulma hesaplarının gerçek değerlerden daha yüksek sonuçlar verdiğini belirlemiştir. Kirişte meydana gelen burulma nedeniyle döşemenin eğilmeye çalıştığı, döşemede donatıları hesaplarken bu etkilerin de dikkate alınması gerektiği belirlenmiştir.

Hsu (1968) yaptığı deneysel çalışmada 53 adet dikdörtgen kirişi basit burulma etkisinde test etmiştir. Basit burulma etkisindeki kirişlerde burulma davranışları incelenmiştir. Kesit değişiminin burulma dayanımı için büyük etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Elemanlarda burulma donatısının gerekliliğini vurgulamıştır (Hsu, 1968).

Ersoy ve Ferguson (1968) kirişte burulma ve eğilme etkisi altında çekme donatısı oranının azalmasının burulma çatlama değerini azalttığı gözlemlenmiştir. Eğilme etkisinin bulunduğu kirişlerde çatlama daha düşük moment etkisinde oluşmuştur (Ersoy ve Ferguson, 1968).

Hsu ve Kemp (1969) betonarme kirişlerde eğilmeli burulma durumunda eğilme momenti etkisinin burulmada çatlama momentine etkisinin olmadığını gözlemiştir (Hsu ve Kemp, 1969).

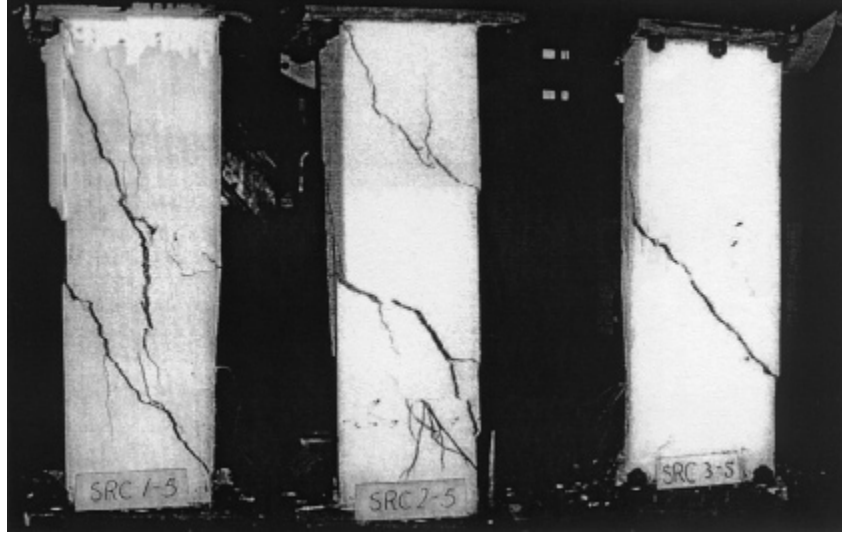
Karlson ve ark., (1974) çalışmasında saf burulma etkisindeki kirişler üzerinde çalışmıştır. Elemanda burulma etkisinin uzun süreli bulunması halinde betonun sünme etkilerini de dikkate almak amacıyla donatıları ve burulma yükleri farklı 8 adet kiriş numunesi üzerinde 1 yıla yakın süren deneyler gerçekleştirmiştir (Karlsson ve ark., 1974).

Onsogno (1978) aksenel yük etkisindeki kirişlere burulma etkimesi ile gerçekleştirdikleri çalışmada aksenel kuvvetin artması ile kirişlerde burulmadan meydana gelen dönme nedeniyle meydana gelen uzamanın azaldığı ve boyuna donatılardaki şekil değiştirmelerin sınırlandırıldığı görülmüştür (Onsongo, 1978).

Wafa ve ark., (1992) yüksek dayanımlı beton ile üretilmiş öngerilmeli kolonlardaki burulma davranışını incelemiştir. Kirişlerde beton dayanımı 90 MPa olarak belirlenmiş ve ön gerilme oranı kirişin aksenel yük kapasitesinin %5'i ve %10'u olacak şekilde belirlenmiştir. Elemanda ön gerilme etkisini arttırmanın ve beton dayanımının artmasının kirişin deneysel çatlama dayanımını ve maksimum burulma momenti taşıma kapasitesini arttırmış. Burulma rijitliğini de olumlu etkilemiştir. Uzay-kafes analogisinin burulma dayanımını daha yakın değerlerde tahmin ettiği görülmüştür. burulma dayanımını olumlu katkı yaptığı görülmüştür (Wafa ve ark., 1992).

Kamanlı (1993), tez çalışmasında dikdörtgen kesitli yapı elemanlarının burulma etkisindeki kayma gerilimi dağılımını deneysel çalışma ve sonlu elemanlar metodu ile incelemiştir. Kesitlerdeki kayma gerilmesinin tespiti için St. Venant yarı ters metodu yardımıyla denge, uygunluk bağıntıları elde edilmiş, bu bağıntılar kullanılarak diferansiyel denklemler ile altı adet modellenin çözümü yapılmıştır. Çelik ve beton elemanlarda kenar ortasında meydana gelen kayma gerilmelerinin beton için %32 farkla, donatılar için ise sonlu elemanlar yöntemi ile tespit edilen gerilmenin %8,75 fark ile oluştuğu gözlemlenmiştir. Betondaki çözüm farkının betonun heterojen bir malzeme olması nedeniyle ortaya çıktığı düşünülmüştür (Kamanlı, 1993).

Hsu ve Wang, (2000) genişlikleri 100 mm, 150 mm ve 200 mm olan çelik profiller ile güçlendirilmiş 240x260 mm, 240x310 mm ve 240x360 mm kesit boyutlu dikdörtgen kolonların çevrimsel çeşitli kombinasyonlarda ve saf burulma etkisinde test etmiştir. Saf burulma etkisindeki kompozit elemanların orta bölgesinde kayma gerilmeleri nedeniyle diyagonal kesme çatlakları meydana gelmiştir. Dönme açısının artması ile çatlaklar genişlemiştir. Küçük kesit boyutlu elemanlarda çatlaklar kolonda daha çok yayılmıştır. Betondaki çatlakların artması sonucunda maksimum burulma mukavemetine ulaşılmıştır. Betonda çatlama momenti ve burulma mukavemeti kesit boyutlarının artması ile her numunede yaklaşık %25 oranında artmıştır. Eleman boyutlarının artması ile kesitin dönme sünekliği de artmıştır. Kesitlerde kullanılan çelik profillerin genişliğinin değişmesinin yanı sıra kesit boyutlarının büyümesinin de burulma davranışına etkisi olmuştur (Şekil 2.1) (Hsu ve Wang, 2000).



Şekil 2.1 Kompozit burulma etkisindeki kolonda kesit boyutlarının burulma hasarına etkisi (Hsu ve Wang, 2000)

Zhang ve Wang, (2000) yüksek aksel yüklemeye maruz kalan dikdörtgen betonarme perde duvarların göçme mekanizmasını ve sünekliğini artırmıştır. Aksel yük oranının, betonarme perde duvarların çatlama paterni, eğilme dayanımı, göçme modu ve sünekliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur (Zhang, 2002).

Engin (2005) tez çalışmasında betonarme kirişin burulma davranışı üzerinde durmuştur. Kirişte boyuna donatı çapının artması burulma kapasitesini arttırmıştır. Beton dayanımının artmasının kirişte burulma kapasitesini arttırmış ancak dönme kapasitesinin %66'ya yakın oranda azalmasına neden olmuştur. Elemanın enerji yutma kapasitesi azalmıştır. Tüm elemanlarda maksimum burulma benzer dönme oranlarında meydana gelmiştir. Farklı lif çeşitlerinin de farklı oranda eklenmesinin burulma rijitliğine katkı sağladığı gözlemlenmiştir (Engin, 2005).

Chiu ve ark., (2007) kirişlerde burulma donatısı oranının düşük olduğu durumda meydana gelen burulma etkilerini incelemiştir. Enkesit boyutlarının oranı, burulma donatısı oranı ve beton dayanımlarının incelendiği çalışmada, aynı burulma donatısı oranına sahip elemanlardan kesiti büyük olan elemanlarda çatlama ve maksimum burulma dayanımının azaldığı ve daha geniş çatlakların oluştuğunu gözlemlemiştir (Chiu ve ark., 2007).

Tirasit & Kawashima, (2007) çalışmasında 7 adet 400x400 mm kare enkesitli, 1750 mm ve 1350 mm uzunluğundaki betonarme kolonların aksel yük, çevrimsel eğilme ve burulma yükleri etkisindeki performansını araştırmıştır. Çevrimsel burulma etkisindeki deney elemanlarında ilk diyagonal çatlaklar, deneyin 2. Adımında 0,005 rad dönme değerinde meydana gelmiş ve sonrasında tüm kolon boyunca yayılmıştır. Burulma etkisiyle boyuna donatılarda burkulma gözlemlenmiştir. Kolonda plastik mafsal kolon orta bölgesinde meydana gelmiştir. Kolonda sabit 160 kN aksel yük etkisindeki burulma davranışı incelendiğinde elemanın 0,02 rad'lık dönme etkisinde 83,4 kNm burulma dayanımına ulaştığı belirlenmiştir. Bu noktadan sonra 0,05 rad değerinde maksimum burulma dayanımının %76,3 değerine düşmüştür. Aksel yük etkisindeki burulma kapasitesi saf burulma etkisine göre %11 daha fazladır ve eleman aksel yüksüz duruma göre maksimum kapasitesine daha önce ulaşmıştır (Tirasit ve Kawashima, 2007).

Belarbi ve Prakash., (2009) çevrimsel; eğilme, kesme ve burulma etkileri altında betonarme dairesel köprü kolonlarında spiral etriye oranının meydana gelen deprem davranışına etkisini incelemiştir. Kolonlar farklı burulma/eğilme oranlarında test edilmiştir. Çalışma sonucunda kombine yük etkisi altında eğilme ve burulma kapasitelerinin salt yükleme durumuna göre azaldığı belirlenmiştir. Burulmanın dahil olduğu kombinasyonlarda spiral donatı oranının artmasına bağlı kolonda kabuk betonunda ve çekirdek betonunda meydana gelen hasar azalım göstermiştir. Spiral oranının artması ile burulma kapasitesini arttırmaktadır (Belarbi ve ark., 2009).

Kurt (2010) tez çalışmasında yapıda farklı kolon ve perdelerin yer ve boyutlarında meydana gelen değişim ile yapıda burulma düzensizliğinin değiştiğini; yapıda deprem etkisinde meydana gelen ek burulma momentleri nedeniyle yapıda göçme meydana gelebileceği tespit edilmiştir (Kurt, 2010).

Soley (2010), hazırladığı tez çalışmasında salt burulma etkisindeki 250 mm çapındaki ve 1375 mm uzunluğundaki fretli kolonlarda fret adımının 50 mm, 100 mm, 150 mm olarak değişiminin burulma davranışına etkisini incelemiştir. Kolonda salt burulma etkisini oluşturabilmek ve burulma etkisi oluştuğunda eğilmeyi engelleyebilmek amacıyla oluşturulan deney düzeneğinde numune serbestçe dönebilmektedir. Yükleme deplasman kontrollü olarak 1 mm itme, 1 mm çekme olarak etki etmektedir. Kolonda maksimum burulmaya neden olan yatay yük 50 mm fret adımı için 74,75 kN, fret adımı 100 mm iken 55,6 kN'a, fret adımı 200 mm iken 41,79 kN'a düşmüştür. Çekme yönünde elde edilen tüm değerler itme yönü için sırasıyla 60,3 kN, 34,56 kN ve 26,74 kN olarak ölçülmüştür. Fret adımının artması ile kolonda dönme açıları önemli oranda azalmıştır.

Kolonlarda burulma ve dönme kapasitesinin, itme yüklemelerinde fazla olması, fret sargısının yönüne bağlı olarak itme çevrimlerinde donatı ve betonun aderansının artması nedeniyle olduğu belirtilmiştir. Tez çalışmasında bu çalışmadaki deney düzeneğinden yararlanılmıştır (Soley, 2010).

Prakash ve ark., (2010) yaptıkları deneysel çalışma kapsamında 610 mm çaplı, 3660 mm yüksekliğindeki spiralli betonarme köprü kolonunda saf burulma etkisindeki davranışını incelemiştir. Burulma etkisi kolona önce tahmin edilen ilk etriyenin akmaya dayanımının %25, %50, %75 ve %100'ü oranlarında yük kontrollü olarak başlatılmış, akma meydana geldiğinde süneklik değeri 1,00 olarak kabul edilerek bu noktadan sonraki yüklemeler bu değerin katları olacak şekilde deplasman kontrollü olarak yürütülmüştür. Literatürde yapılan farklı bazı çalışmalarda da bu yükleme protokolü kullanılmıştır. Yapılan deneylerde düşük süneklik seviyelerinde çatlaklar gelişmeye başlamıştır. Burulmanın artması ile çatlaklar yayılmıştır. Çatlamadan sonraki döngüde spiral donatılarda akma meydana gelmiştir. Saf burulma için %0,73 enine donatı oranının burulma etkisinde kalacak dairesel kolon için minimum değer olarak kabul edilebileceği belirtilmiştir. Çatlaklar yaklaşık 40°'lik açılar ile oluşmuştur. Spiral donatı oranının %1,32'ye çıkarılması ile akma dayanımı %20 oranında maksimum burulma kapasitesi %30 oranında artmıştır. Etriye oranının artması ile kolonun enerji yutma kapasitesi ve sünekliği de artmıştır. Çekme yönündeki yüklemelerde spirallerin daha fazla gerilmesi nedeniyle negatif çevrimlerde oluşan moment değerleri artmıştır. Çekirdek betonda hasar az miktardaiken kabuk beton kolon boyunca dökülmüştür (Prakash Shanmugam ve ark., 2010).

Kruzelecki & Ortwein, (2011) eksenel yük ve burulma etkileri altındaki kolonların optimum tasarımı için araştırma yapmıştır. Parametrik ve varyasyon analizi ile yapılan optimizasyon çalışmasında farklı yükleme durumları etkisinde kolonların optimum şekilleri önemli derecede değişmiştir. Kolonda kritik yüklemenin artışı ile kolonda yapılan optimizasyondan sağlanan fayda %32 mertebesinde oluşurken, saf burulma etkisinde %3 kar elde edilmiştir (Kruzelecki ve Ortwein, 2012).

Li & Belarbi, (2011) Spiral donatılı betonarme kolonların burulma içeren yük kombinasyonları altındaki deprem davranışını deneysel olarak araştırmıştır. Dairesel kesitli kolonlarda moment-dönme açısı grafiği incelendiğinde çatlama burulmasının %50'sine kadar zarf eğrisinin lineer oluşmuştur. Pozitif çevrimlerde spirallerde kenetlenme azalması nedeniyle çekirdek betonunda çatlama etkileri artmıştır. Negatif çevrimlerde spirallerin kenetlenmesi nedeniyle betonda kenetlenme artmış ve deprem

davranışına katkı sağlamıştır. Kolonda dönme açısının artması ile kolon boyunca yayılan çatlaklar genişlemiş ve kabuk beton dökülmüştür. Kolonda burulma nedeniyle çekirdek betonunda kolon orta yüksekliğine yakın bölümde burulmalı bir plastik mafsal meydana gelmiştir (Li ve Belarbi, 2011).

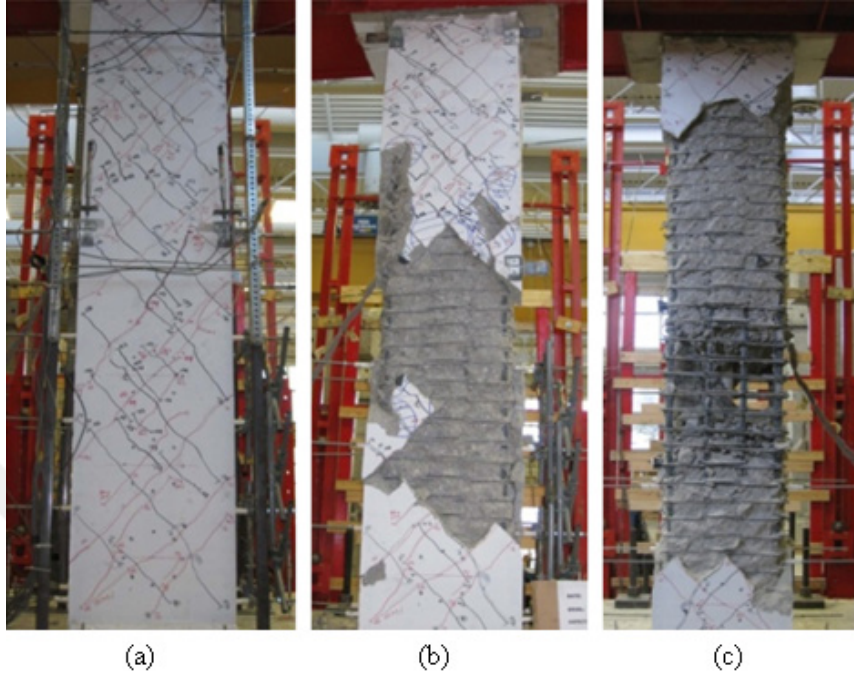
Erken (2012) yaptığı analitik çalışma kapsamında aynı mimari plan sahip 5 farklı perde yerleşimindeki konut yapısının deprem etkisindeki kesit zorlamalarını ve şekil değiştirmelerinin yapının geometrik şekline bağlı değiştiği, burulmanın da perde yerleşiminden önemli bir şekilde etkilendiği tespit edilmiştir. Çalışma kapsamındaki yapının birinde taban kesme kuvveti 5940 kN civarında iken geometrinin değişmesi ile kesme kuvveti değeri 7300 kN'a kadar çıkmaktadır. Taban kesme kuvvetlerinin düşük olduğu yapıda kat yer değiştirmeleri diğer yapılara göre daha fazla olmuştur. Aynı durum görelî kat ötelemeleri için de gözlemlenmiştir (Erken, 2012).

Peng (2012) betonarme perdelerin dinamik yükler etkisindeki burulma davranışını incelemiştir. Elemanları salt burulma ve eğilmeli burulma etkisinde test etmiştir. Burulma momentinin artması ile elemanın eğilme kapasitesi azalmıştır. Salt burulma etkisindeki perdelerde enkesit boyutlarının artmasının perdenin burulma rijitliğini arttırdığı görülmüştür (Peng, 2012).

Prakash ve ark., (2012) dairesel ve dikdörtgen kesitli köprü kolonlarının burulma içeren yük kombinasyonlarındaki davranışını incelemiştir. Burulma-eğilme-kesme yük kombinasyonu için etkileşim diyagramı hazırlanmıştır. Saf burulma etkisi altında kolonlarda orta bölgede kesme çatlakları oluşumu gözlemlenmiştir. Kombine yükleme etkisinde burulma olması durumunda hasar durumları değişmiş, yüksek kayma gerilmeleri nedeniyle çatlak genişlikleri artmış ve bu nedenle kesitler maksimum kayma gerilmesine ulaşmadan hasar görmüştür. Burulma seviyesinin artması ile nihai yatay yük kapasitesi ve deplasman kapasitesi azalmıştır (Prakash Shanmugam ve ark., 2012).

Li & Belarbi, (2013) betonarme köprü kolonları üzerine yaptığı deneysel çalışmada 560x560 mm kesitli ve 4200 m uzunluğundaki betonarme köprü kolonlarında, eğilme ve burulma etkilerinin farklı oranlarda etkilediği durumlarda meydana gelen hasarı incelemiştir. Burulma ile kapasitenin %7'si oranında eksenel yükün kolon üzerinde birlikte bulunduğu durumda elemanda çatlaklar 45°'lik açılarda oluşmuştur. Burulma etkisindeki kolonda ilk çatlaklar kolon orta bölgesinde akma dayanımının %60 seviyesinde meydana gelmiştir. Kolonda 1,72°'lik dönme sonucunda ilk kesme donatısında akma meydana gelmiş ve akma dayanımı 260 kNm olarak ölçülmüştür. Maksimum burulma momenti 332 kNm olarak belirlenmiştir. Çalışmada literatürde

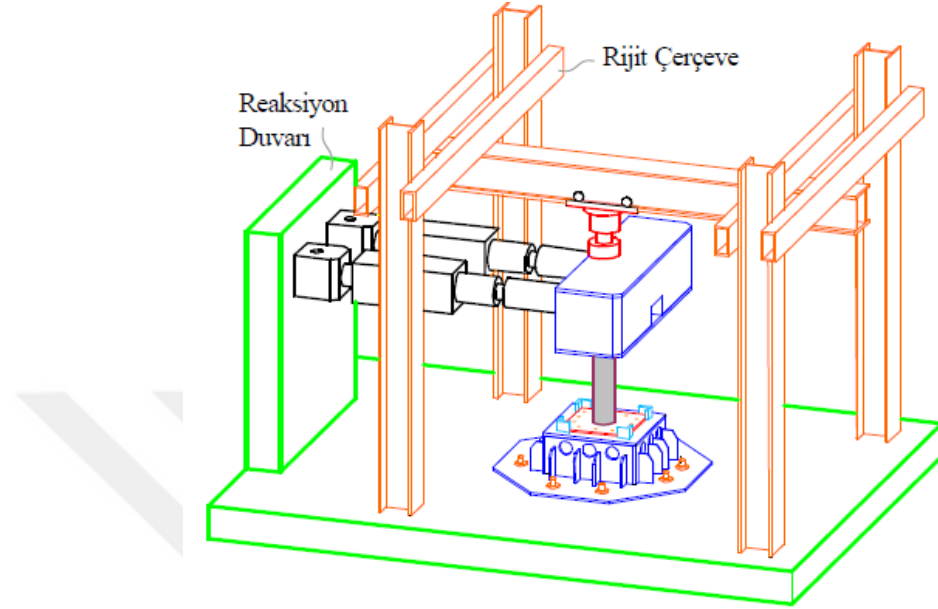
önerilen hasar indeksi modeline göre yapılan hasar tespitine göre elemanda yalnız burulma etkisindeki hasar durumunun kombinasyonlu durumla benzeştiği belirlenmiştir (Şekil 2.2) (Li ve Belarbi, 2013).



Şekil 2.2 Kolonda burulma etkisindeki hasar durumları (a) akma, (b) tepe noktası, (c) hasar (Li ve Belarbi, 2013)

Nie ve ark. (2012, 2013), yaptıkları çalışmalarda dairesel ve dikdörtgen kesitli, çelik tüp ile üretilen kompozit betonarme kolonların basınç-eğilme-burulma kombinasyonunun çevrimsel olarak kolona yüklenmesi konusunda deneysel bir çalışma yapmıştır. Çalışmada dairesel ve dikdörtgen kesitli kolonlarda aksenal yük ve burulma etkisindeki davranış incelenmiştir. Aksenal yük ve burulma etkisindeki elemanlarda çelik boru yüzeyinde burkulma nedeniyle dikey bir çatlak oluşmuş sonrasında çapraz yönde gelişmiştir. Betonda tüm kolon boyunca ve 45° 'lik çatlaklar gelişmiştir. Eğilmenin bulunduğu kombinasyonlarda moment-dönme eğrilerine göre süneklik faktörü 2,00-7,00 değerleri arasında iken aksenal yük ve burulma etkisindeki elemanda süneklik faktörü 8,00-9,00 değerleri arasında bulunmaktadır. Dairesel kesitli elemanda akma 113,8 kNm burulma momenti değerinde ve $2,1^\circ$ 'lik dönme sonucunda meydana gelirken, dikdörtgen kesitli kolonda 80 kNm değerinde ve $2,5^\circ$ açıda meydana gelmiştir. Dairesel kesitte maksimum kapasitesine ulaşana kadar 145,5 kNm moment ve $19,9^\circ$ dönme meydana gelirken, Dikdörtgen kesit ise aynı dönme miktarında 94,7 kNm'lik moment taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Dairesel kesitler akma sonrasında dikdörtgen kesite göre yaklaşık

2 kata yakın burulma taşımaya devam etmiştir. Dairesel kesitin, dikdörtgen kesite göre daha sünek davranış sergilediği görülmüştür (Şekil 2.3) (Nie ve ark., 2012; Nie ve ark., 2013).



Şekil 2.3 Deney düzeneği (Nie ve ark., 2012)

Mullapudi ve Ayoub (2013), yaptığı çalışmada burulmanın dahil olduğu kombine yükleme altındaki matematiksel modeli Timoshenko kiriş yaklaşımı kullanarak elde edilmiştir. Modelin üç boyutlu yükleme etkisi altında mekanik özellikleri belirlenmiş ve aksenal yük ile kesme, eğilme ve burulma etkileri arasındaki ilişki formülize edilmiştir (Mullapudi ve Ayoub, 2013).

Chalioris ve Karayannis (2013), dikdörtgen kesitli betonarme kirişleri spiral donatılı olarak üretilmesi ile salt burulma etkisindeki davranışı incelemiştir. Spiral donatının burulma bir yönde etki ederken beton ile aderans sağladığı ve etriyeli duruma göre burulma kapasitesinin %12 civarında arttığını, diğer yönde ise kapasitenin %28'e yakın oranda azaldığını gözlemlemiştir. Spiral aralığının burulmada çatlama mukavemetine etkisi düşük seviyede iken spiral aralığının artması maksimum burulma momentini azaltmaktadır (Chalioris ve Karayannis, 2013).

Ren ve ark. (2017), özellikle Çin'de bulunan yüksek binalarda ve köprülerde kullanılan CFST (beton dolgululu çelik boru) adı verilen kompozit kolonların basınç ve burulma etkileri altındaki davranışını incelemiştir. 26 adet numune küçük ölçekli üretilerek deneyler gerçekleştirilmiş ve kolonlarda oluşan burulma mukavemetini

yaklaşık olarak hesaplayan bir tasarım formülü önerilmiştir. Kompozit kolonlarda artan aksenal yük seviyesinin elemanın burulma rijitliğini değiştirmediği, enerji yutma kapasitesini ise %10'a yakın oranda azalttığı gözlemlenmiştir. Kolon içerisindeki elik tüp oranının artması burulma davranışına olumsuz etki etmiştir. Kompozit kolonlarda i elik tüpün iç ve dış kısmında beton bulunmaması halinde burulma kapasitesi ciddi oranda azalmıştır (Ren ve ark., 2017).

Deng ve ark. (2017) betonarme dairesel köprü kolonlarında çevrimsel yükleme altındaki betonarme kolon davranışını, moment/eğilme oranı, boyuna donatı oranı, etriye oranı ve narinlik oranına bağlı incelemeler yapılmıştır. Burulmanın hakim olduğu ve narin olarak tasarlanan kolonda hasarlar çoğunlukla burulma kaynaklı meydana gelmiş, diğer numunelerde eğilme etkileri hasara neden olmuştur (Deng ve ark., 2017).

Wang ve ark. (2017) 200 mm çaplı dairesel ve 200x200 mm kare kesitli, beton içerikli elik tüp kolonlarda eğilme etkisi rijit bir bağlantı yardımı ile engellenerek; statik burulma, çevrimsel burulma ve eksantrik aksenal yük etkisindeki davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Kolonlar 975 mm ve 475 mm uzunluklarında üretilmiştir. Kolonlarda monotonik burulma etkisinde oluşan moment-dönme açısı çevrimsel yükleme etkisinde meydana gelen moment-dönme açısı grafiğinin zarf eğrisi ile benzeşmektedir. Monotonik yükleme etkisindeki kolonlarda eksantrik normal kuvvet etkisindeki yük kapasitesi saf burulma altındaki kapasiteden daha fazladır. Ancak elemanın rijitliği ve hasar durumları benzeşmektedir. Kolon yksekliliğinin azalması ile kolonun akma etkisindeki burulma dönmesi birbirine yakın değerlerde oluşmuştur. 975 mm uzunluğundaki kolonda 40°'lik bir dönme oluşurken 152 kNm burulma kapasitesine sahiptir ve 475 mm uzunluğundaki kolonun dönme açısı 19° ile sınırlı kalmış ve maksimum 154,3 kNm değerinde burulma kapasitesi oluşmuştur. Kolon uzunluğunun azalması ile dönme sünekliği %35 oranında azalmıştır. Uzun kolonlar çevrimsel burulma etkisinde daha sünek davranış sergilemiştir. Kesitin orta bölgesindeki aksenal ve çatlakların oluşmasının beklendiği 45°'lik doğrultuda şekil değiştirmesi köşe bölgelerdeki şekil değiştirmeye benzer olurken kolonun kesme doğrultusunda köşe bölgelerde daha büyük şekil değiştirmeler oluşmuştur (Wang ve ark., 2017).

Wang ve ark. (2018) alışmasında elik tüp ile üretilmiş kompozit kolonların kombine yükler etkisindeki mekanik davranışını incelenmiştir. Kolonda eğilme ve burulmanın yanında 200 kN aksenal yük bulunması halinde burulma kapasitesi 9,94 kNm'den 17,54 kNm'ye kadar artmıştır. Elemanda dönme sünekliği ve maksimum dönme açısı da aksenal yük uygulanması ile artmıştır (Wang ve ark., 2018).

Wang ve ark. (2020) yılında CFST kolonların CFRP ile güçlendirilmesi sonucunda burulma kapasitesinin değişimini incelemiştir. Dairesel kesitli kolonlarda çapın artması ile burulma kapasitesi artmıştır. Beton dayanımının değişimi ve CFRP sargısının kat sayısı kompozit ve güçlendirilmiş kolonlarda gözle görülür bir değişime neden olmamıştır. Güçlendirilmiş kolonlarda CFRP'nin sargı etkisi nedeniyle kolon burulma kapasitesi %15,6 oranında artmıştır. Elemanda eğilme etkisinin de bulunması durumunda artış %4 ile sınırlı kalmıştır (Wang ve ark., 2020).

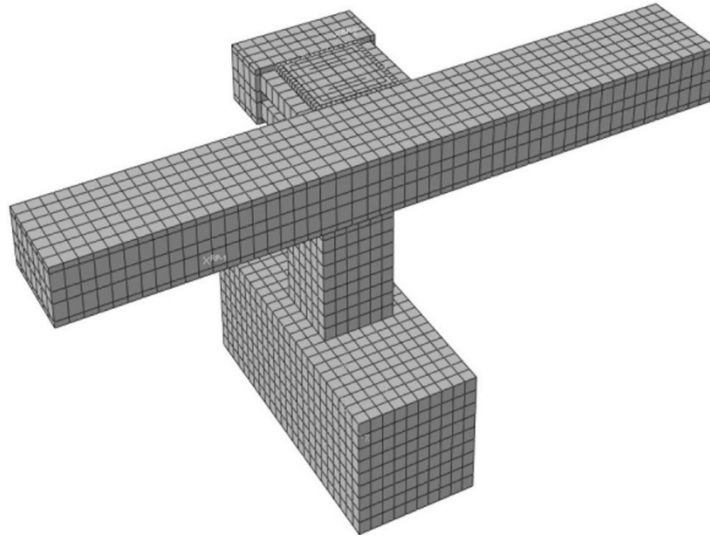
Chen ve ark. (2018) çelik profil ile güçlendirilmiş betonarme kolonların çevrimsel eğilme ve burulma yükleri etkisindeki davranışı deneysel olarak incelemiştir. Deney elemanlarında %5 ve %10 oranında aksel yük verilmiştir. Kompozit kolonların eğilme ve burulma ilişkisi üzerinde durulmuştur. Kolonda eğilmenin baskın olduğu, eğilme ve burulmanın birlikte olduğu ve burulmanın baskın olduğu hasar modları bulunduğu tespit edilmiştir. Hasar modunu belirleyen en büyük etkenin kolon üzerindeki T/M oranı olduğu belirlenmiştir. Deneyde test edilen 450x450 mm kesitli kompozit kolonlar için momentin baskın olduğu hasar modu için kritik T/M oranı 0,14 olarak belirlenmiştir. Kolon üzerinde eğilme ve burulmanın birlikte etkimesi durumunda elemanda maksimum burulma ve eğilme kapasitesine ulaşamamıştır. Kolonda yalnızca aksel yük ve burulma olması durumunda burulma kapasitesi 225 kNm ve maksimum dönme 0,05 radyan olarak ölçülmüştür (Şekil 2.4) (Chen ve ark., 2018).



Şekil 2.4 Burulma deney düzeneği (Chen ve ark., 2018)

Türkay (2019) tez çalışmasında betonarme perdelerin genişliği 150 mm olarak seçilmiş ve boy/en oranının 5, 6, 7 değerlerinde olacak şekilde tasarlanmış ve tüm perdeler kapasitelerinin %10'u oranında aksenal yük ile yüklenmiştir. Çalışmada perdelerde oluşacak eğilme etkileri engellenmemiş, elemanlar dönme yönünde yüklenmiştir. İlk çatlakların oluşmasıyla %90'a yakın oranında azalan burulma rijitliği nedeniyle birçok çatlak anlık olarak gelişmiştir. Eğik çatlaklar iki yüzde birbirine dik ve 45°'lik açı ile oluşmuştur. Boy/en oranının 5, 6 ve 7 olan perdelerinin sırası ile burulmada çatlama momentleri 26 kNm, 30 kNm ve 43 kNm; maksimum burulma momentleri 56 kNm, 63 kNm ve 81 kNm değerlerinde hesaplanırken çatlama ve maksimum burulma momentinin meydana geldiği dönme açıları benzerdir. Çalışmada betonarme perdelerde enkesit boyutlarının artması ile burulma momenti değerlerinde de artışlar gözlemlenmiştir. Deneysel maksimum burulma momentinin %80'ine ulaşılan kadar devam ettirilmiştir. Elemanlardan elde edilen deney sonuçları TS500'e ve Eurocode-2'ye göre %40'a yakın fazla iken ACI 'dan elde edilen burulma değerleri hesaplandığında deney sonuçlarına daha yakın değerler elde edilmiştir (Türkay, 2019).

Cao ve ark. (2020), çalışmada bir sonlu eleman programı olan ABAQUS FEA yardımıyla çelik profil ile güçlendirilmiş 900 mm yüksekliğindeki kolon elemanında burulma etkisi altındaki betonarme davranışı incelemiştir. Burulmayı temsil etmesi amacıyla verilen yatay yükün etkisiyle kolonda oluşan eğilme etkileri sınırlandırılmamış ve kolonun burulma-eğilme oranı elde edilmiştir. Çelik ile güçlendirilmiş kolonun elastik bölge, elastoplastik bölge ve hasar bölgesi olarak 3 farklı davranış gösterdiği tespit edilmiştir. Kolonda, beton dayanımının artmasına ve kesme açıklığının azalmasına bağlı olarak ilk burulma rijitliği ve nihai burulma dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Etriye oranı, boyuna donatı oranı değişiminin güçlendirilmiş kolon numunelerinin burulma davranışına etkisi azdır. Numunelerden iki tanesi %10 ve %20 aksenal yük etkisi altında modellenmiştir ve deneysel olarak %50 oranına kadar test edilmiştir (Şekil 2.5) (Cao ve ark., 2019).



Şekil 2.5 Kolonda burulma nümerik simülasyon modeli (Cao ve ark., 2019)

Xu ve ark. (2020) L şekilli betonarme kolonları incelemiş ve bu kolonlarda eğilme ve burulma etkileri oluşması halinde 45° 'ye yakın açılarda, çapraz kesme çatlakları tespit edilmiştir. Kolonda burulma etkisinin artması ile elemanın burulma sünekliğinin arttığı, aksenal yükün artışı ile burulma ve eğilme kapasitelerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Kolonda eğilme burulma yükleri kombinasyonunda aksenal yükün artması sonucunda çatlak oluşumu sınırlanmış ve burulma hasarı azalmıştır (Xu ve ark., 2020).

Attarchian ve ark. (2020) dikdörtgen betonarme kolonların çevrimsel eğilme ve burulma etkileri kombinasyonu altındaki, yalın burulma altındaki ve yalın eğilme altındaki deprem davranışı üzerine çalışma yapmıştır. Kesit boyutları 300x600 mm, uzunluğu 1800 mm olan kolonlarda aksenal yük etkisi ön gerilme ile verilmiştir. Test sonuçlarına göre minimum enine donatı oranının tüm numuneler için en az %1,9 olması gerektiği görülmüştür. Deprem yönetmeliklerinde burulmada çatlama momenti olarak tanımlanan moment değeri itme ve çekme çevrimlerinde yaklaşık 40 kNm olarak tespit edilmiştir. Bu değer elemanın başlangıç burulma rijitliğine göre değişmektedir. ACI yönetmeliğine göre yapılan hesaplamalarda kolonun çatlama momenti 42 kNm değerindedir. Elemanda meydana gelen maksimum burulma momenti 127 kNm ve maksimum dönme 0,063 rad olarak ölçülmüştür. Deneyler maksimum burulma momentinin %80'ine kadar devam etmiştir. Elemanın maksimum dönme kapasitesi 0,12 rad olarak belirlenmiştir (Attarchian ve ark., 2020).

Yu ve Shan, (2021) yaptıkları deneysel çalışmada farklı yükleme kombinasyonları etkisindeki 12 adet T kesitli kolonda, eksenel yük ve burulmanın değişimine bağlı olarak eğilme mukavemeti incelenmiştir. Numunelerde eğilme momentinin artması ile burulma etkisinin arttığı görülmüştür (Yu ve Shan, 2021).

Wang ve ark. (2021) 'nın çalışmasında CFRP sargılı donatısız çelik tüp kompozit kolonları, eğilme burulma ve eksenel yük etkileri altında incelemiştir. Kolonlar dairesel kesitli, tüp çapı 200 mm ve tüpün et kalınlığı 2, 3, 4 , 5 mm olarak seçilmiştir. Burulmanın dahil olduğu kombinasyonlu yükler etkisindeki kompozit ve sargılı kolonların kapasiteleri yapılan deneyler ile belirlenmiştir. Çelik tüpün et kalınlığının artması ile elemanın burulma kapasitesi doğrusal olarak artmıştır. Kompozit kolonda beton dayanımının değişimi ile burulma kapasitesinin değişimi göz ardı edilebilecek seviyededir. Sargı katlarının artması ile burulma kapasitesi yaklaşık 3 katına kadar artmıştır (Wang ve ark., 2021).

Chen ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada L ve T şeklindeki çelik profil ile güçlendirilmiş betonarme kolonların eksenel yük-eğilme-kesme ve burulma etkileri altındaki deprem davranışını deneysel olarak incelemiştir. Burulma oranının artması ile kolonda eğilmeli burulma kapasitesi artmıştır. Kolonda eğilme kapasitesi azalırken burulma açısı artmış, yer değiştirme sünekliği azalmıştır (Chen ve ark., 2021).

Literatürdeki kolonların burulma etkisindeki davranışı konusundaki çalışmalar kompozit kolonlar üzerinde yoğunlaşmıştır. Ayrıca dairesel, dikdörtgen kesitli köprü kolonları üzerinde deneysel ve analitik çalışmalar yürütülmüştür. Yapılan çalışmalarda betonarme yapılarda mevcut düzensizlikler nedeniyle kolonlarda oluşabilecek burulma etkileri üzerinde yeterince durulmamıştır. Bu nedenle betonarme yapılarda burulma etkisi altındaki kolonların betonarme davranışı incelenmelidir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Betonarme yapının taşıyıcı sistemini oluşturan en önemli taşıyıcı elemanlarından biri olan kolonlar, yapıda döşemelerden, kirişlerden gelen yükleri taşıyan ve yapının temeline aktaran elemanlardır. Betonarme kolonlar ile ilgili birçok çalışma yapılmasına rağmen davranışla burulma etkisindeki kolonlar ile ilgili henüz bilinmeyen hususlar bulunmaktadır. Bu nedenle betonarme kolonların burulma davranışının belirlenmesi gerekmektedir.

Betonarme bir elemanın kolon olarak nitelendirilebilmesi için elemanın üzerindeki minimum eksenel yük;

$$N_d > 0,1A_c f_{ck} \quad (41)$$

seviyesinde olmalıdır. Yapıdaki tüm kolonlarda farklı eksenel yük seviyesi etkisinde bulunmaktadır. Yapılarda eksenel yük seviyesi yapının üst katlarında azalmaktadır. TBDY 2018'e göre depremli durumda kolonda yeterli sünekliğin sağlanabilmesi ve gevrek kırılmanın önlenmesi amacıyla bir kolon üzerine etki edecek maksimum eksenel yük;

$$N_d < 0,4A_c f_{ck} \quad (42)$$

değerini aşmamalıdır. TS500'e göre ise maksimum eksenel yük;

$$N_d < 0,6A_c f_{ck} \quad (43)$$

seviyesinde olmalıdır. Kolonda burulma çatlamaşının meydana gelmesi ile elemanın burulma rijitliği %90'a varan oranda azalmaktadır. Kolonda burulma etkisi nedeniyle kesme etkileri artmakta ve gevrek kırılma meydana gelmektedir. TBDY-2018'e göre minimum boyuna donatı alanının kesit alanına oranı;

$$0,01 < \frac{A_s}{A_c} < 0,04 \quad (44)$$

aralığında olmalıdır. Betonarme yapı elemanlarında kesme kapasitelerinin sağlanmasında ise kesme donatısı olarak tanımlanan etriyeler kullanılmaktadır. Etriye sıklığına, donatı çapına ve etriye kol sayısına bağlı olarak kesme dayanımı değişmektedir (Özkal, 2017). Yönetmelikte kolonların kesme tasarımında;

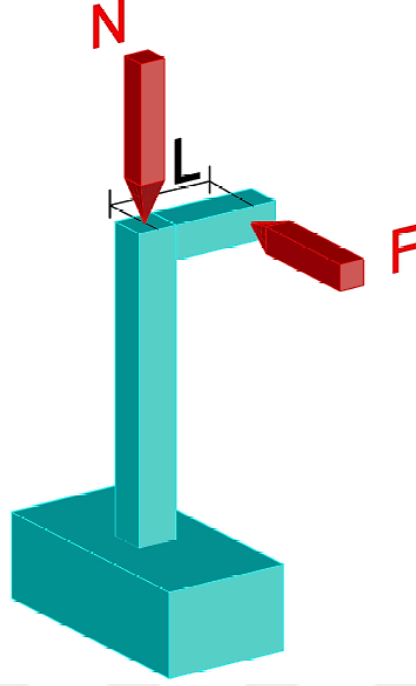
$$V_e = (M_a + M_u) / L_n \quad (45)$$

formülü kullanılmaktadır. Yönetmeliğe göre tasarım yapılırken, yalnızca eğilme etkisinde oluşan kolon alt ve üst uçlarındaki momentler esas alınmaktadır. Deprem etkisinde oluşabilecek burulma etkileri hesaplarda dikkate alınmamaktadır.

Öte yandan yapıda deprem etkisi oluştuğunda kolonlarda burulma etkilerinin artmasının yanı sıra, eksenel yük seviyeleri de değişmektedir. Deprem etkisi meydana geldiğinde bazı kolonlarda eksenel yük seviyesi artarken bazılarında azalmakta, bazı yüklemeler altında kolonlarda çekme etkileri meydana gelebilmektedir (Öncü, 2008).

Yapılan deneysel çalışmada betonarme kolonlarda kullanılan beton C16 sınıfı, donatı ise B420c sınıfı olarak planlanmıştır. Çalışmada 2 adeti ön deneylerde kullanılmak üzere toplam 9 adet kolon 1/2 ölçekli olarak Yardımcı Prefabrik üretim tesisinde üretilmiştir. Üretimi yapılan kolonlar Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda depremi benzeştirecek tersinir-tekrarlanır burulma etkileri altında teste tabi tutulmuştur.

Kolonda burulma etkisinin kolayca oluşturulması amacıyla kuvvet x kuvvet kolu mantığı kullanılarak, kolon üzerinde tek yönde uzanan bir kiriş teşkil edilmiş ve kirişteki itme-çekmenin kolona aktarılması ile kolonda dönme etkileri oluşması sağlanmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Kolonda aksenal yük ve burulma etkilerinin oluşturulması

Yapılan çalışma kapsamında değişken aksenal yük seviyesindeki kolonlarda aksenal yük değişiminin kolonda burulma davranışına etkisi incelenmiştir. Elemanlarda burulma ve aksenal yük etkisindeki hasar durumları, çatlama öncesi ve çatlama sonrası rijitlikleri, enerji yutma kapasiteleri ve süneklik durumları incelenmiştir.

Bu bölümde deneysel çalışma kapsamında yönetmeliklere göre yapılan hesaplamalar, deney numunelerindeki malzemelere ait mekanik özellikler, deneylerin numunelerinin üretilmesi ve deney düzeneğinin oluşturulması ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.1. Deney Numuneleri

Deneysel çalışma kapsamında deney numuneleri yönetmeliklerde belirlenen kriterlere göre hazırlanmıştır. Deney numunelerinde kesit boyutları belirlenirken yönetmeliklerdeki şartlar dikkate alınarak tasarım yapılmıştır. Elemanlardaki etriyeler, mevcut yapı stoğunu temsil etmesi amacıyla, etriye sıklaştırmazsız olarak tasarlanmıştır (TS500, 2000; TBDY, 2018)

3.1.1. Deney numunelerinin boyutları

Ülkemizde kullanılan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre kolon tasarımında kullanılacak en küçük enkesit boyutu dikdörtgen kesitler için 300 mm olarak verilmiştir (TBDY, 2018). Yönetmelikteki en küçük enkesit boyutu olarak verilen 300 mm'lik kolon enkesiti ölçeklendirilerek 150x150 mm'lik kare kolonlar üretilmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde ölçekli çalışmalara rastlanmaktadır ve burulma konusundaki çalışmalarda enkesit boyutunun değişiminin burulma dayanımına etkisinin düşük olduğu belirlenmiştir (Belarbi ve ark., 2009). Elemanlarda oluşacak burulmanın net olarak görülebilmesi amacıyla yapılan çalışmada kolonlar 1/2 ölçekli olarak üretilmiştir. Deney elemanları 1/2 geometrik ölçekli olarak üretildiğinden numune boyutları ve donatı boyutları da aynı ölçekte küçültülmüştür. Kolonun deneye tabii tutulacak net yüksekliği de aynı oranda ölçeklendirilerek 1500 mm seçilmiştir. Deney numuneleri toplam 2000 mm yüksekliğinde üretilmiştir. Kolon üstündeki 200 mm'lik yükseklikte kolonda burulma etkisinin kolayca uygulanabilmesi amacıyla, bir doğrultuda uzatılacak şekilde 150x200 mm kesitli 400 mm uzunluğunda bir kiriş üretilmiştir. Kolonun alt kısmındaki 300 mm'lik kısmı ise üretilen beton temel içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.2).

Tüm deney numuneleri aynı kesit özelliklerinde üretilmiştir. Üretilen kolon numuneleri ve kolon üst bölgesindeki kiriş için;

$$b = 150 \text{ mm}$$

$$h = 150 \text{ mm}$$

$$L_{\text{net}} = 1500 \text{ mm}$$

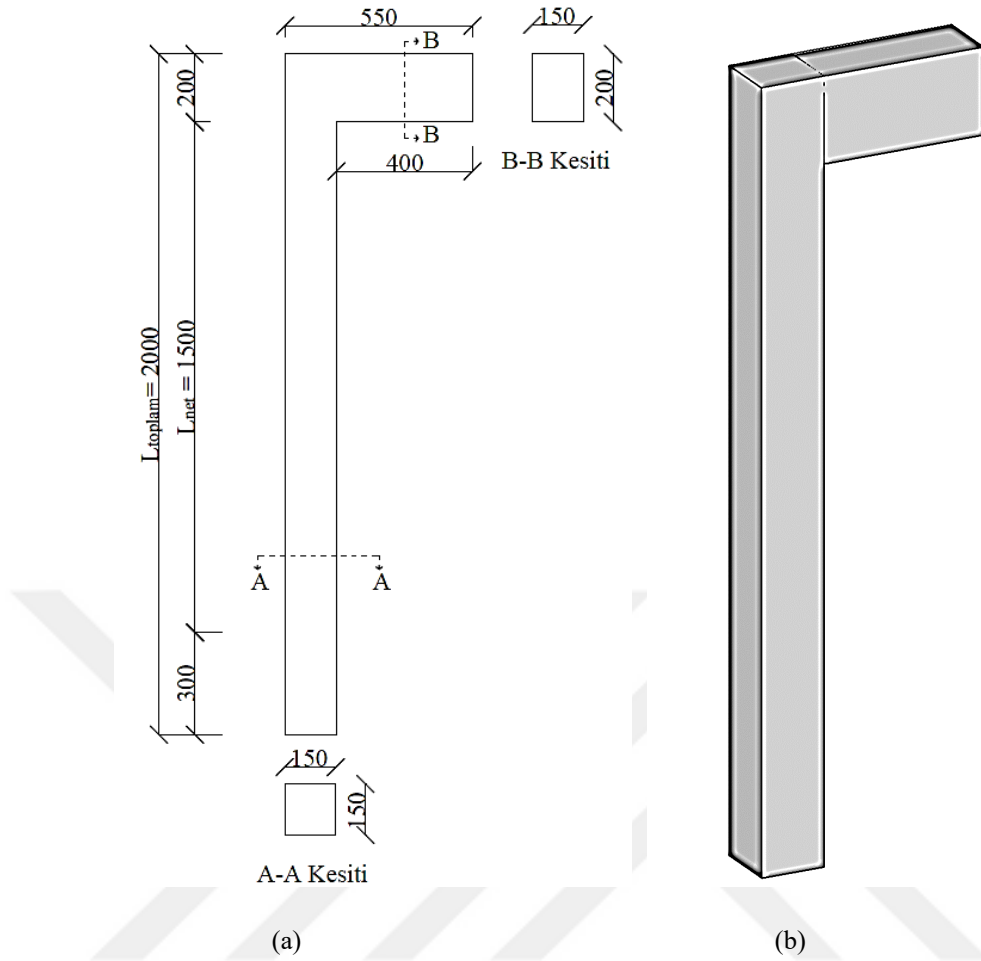
$$L_{\text{toplam}} = 2000 \text{ mm}$$

$$b_w = 150 \text{ mm}$$

$$h_{\text{kiriş}} = 200 \text{ mm}$$

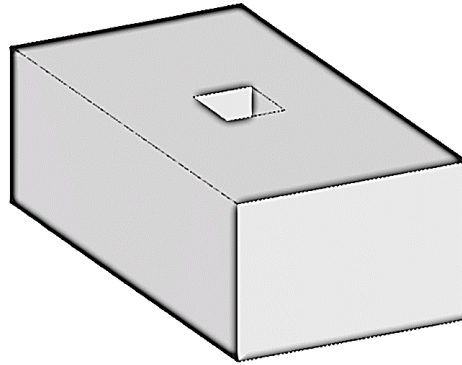
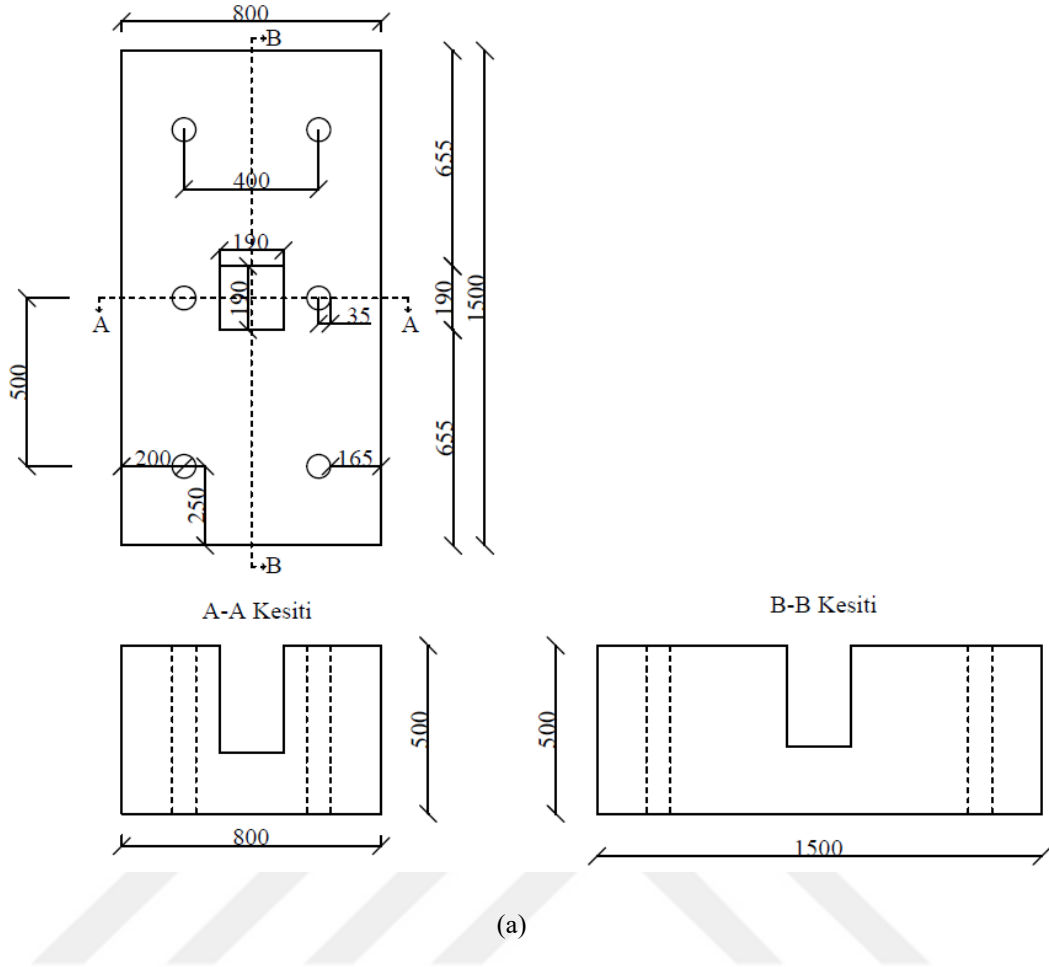
$$L_{k(\text{net})} = 400 \text{ mm}$$

boyutları belirlenmiştir.



Şekil 3.2 (a) Kolon boyutları (b) Kolon 3d görünüşü (Tüm ölçüler mm'dir.)

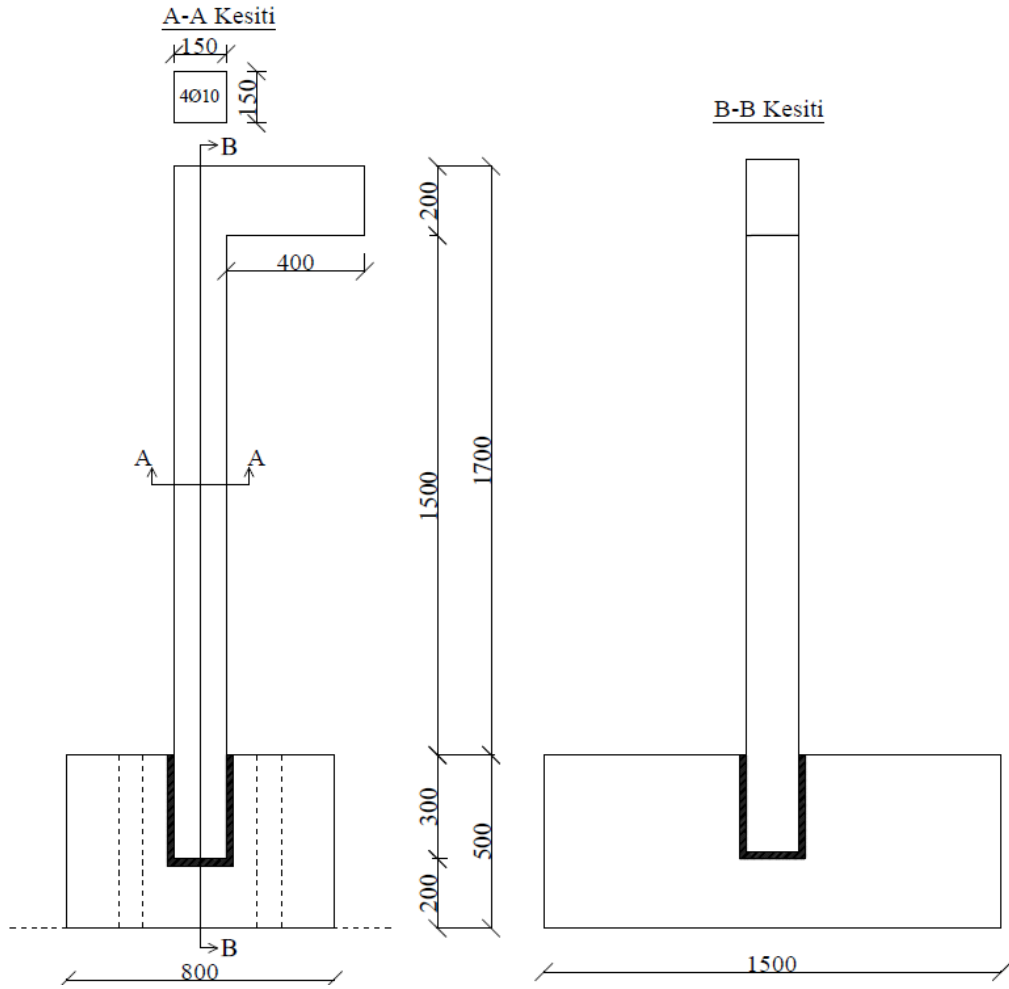
Elemanın zemine rijit olarak bağlantısını sağlamak amacıyla kolonun alt kısmına 800x1500x500 mm boyutlarında bir temel imalatı yapılmıştır. Temelin üst kısmının orta bölgesinde 190x190 mm boyutlu bir soket boşluğu bırakılmıştır. Temelin zemine bağlanması amacıyla içerisine gijonların yerleştirileceği 6 adet 70 mm çaplı dairesel boşluklar laboratuvardaki rijit döşemeye uygun olacak şekilde bırakılmıştır (Şekil 3.3).



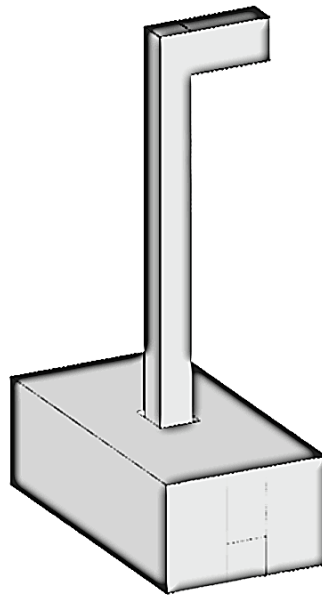
(b)

Şekil 3.3 (a) Temel boyutları (b) Temel 3D görünüşü (Tüm ölçüler mm'dir.)

Deney numunelerinde üretim ve taşımada kolaylık sağlamak amacıyla kolon ve temel ayrı ayrı üretilmiştir. Elemanlar üretimden sonra Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarına getirilmiştir. Burada kolonlar, temel içerisindeki sokete yerleştirilmiş ve yüksek dayanımlı harç ile birleşim sağlanmıştır (Şekil 3.4).



(a)



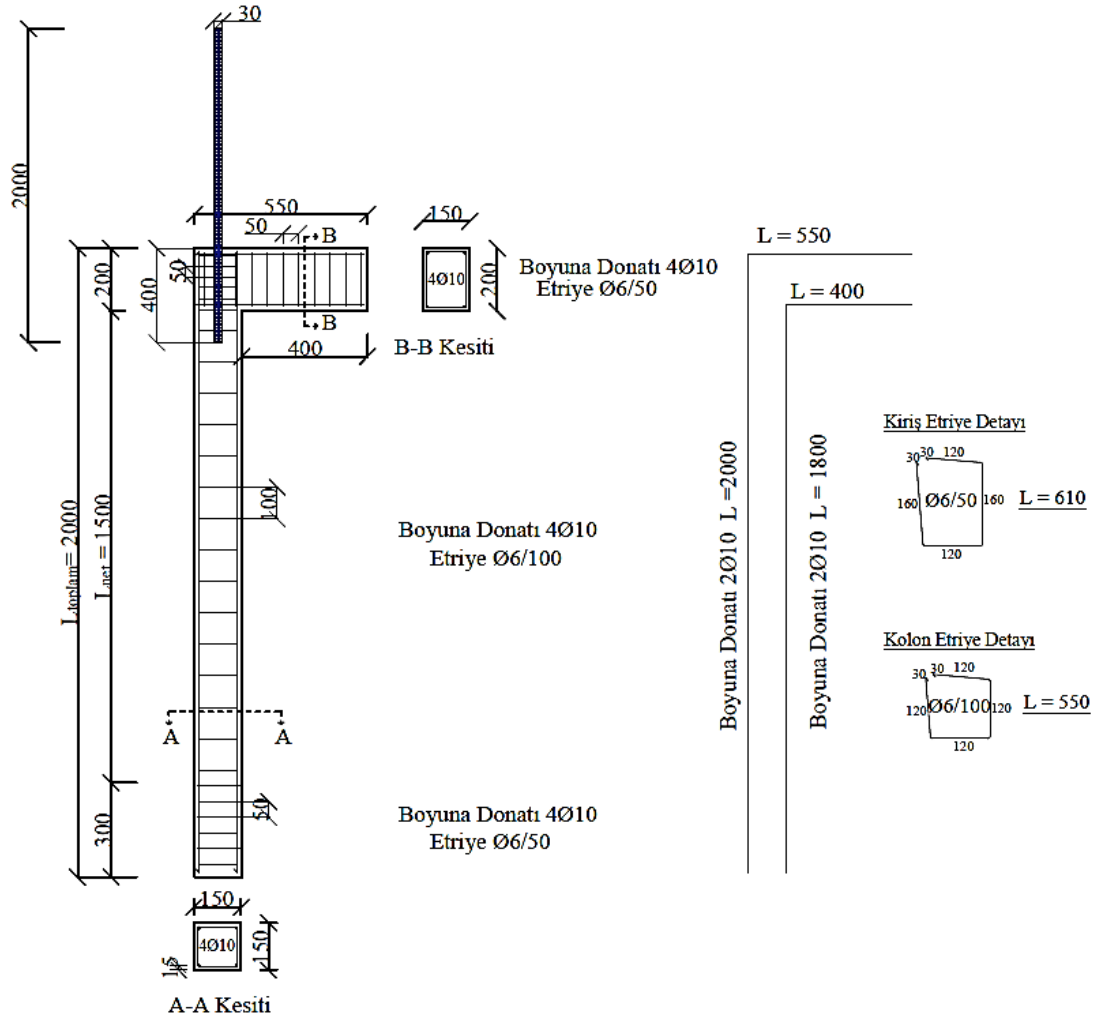
(b)

Şekil 3.4 (a) Numune boyutları (b) Numune 3D görünüşü (Tüm ölçüler mm'dir.)

3.1.2. Deney numunelerinin donatı detayları ve özellikleri

Yönetmeliklere göre kolon tasarımı yapılırken kolonlarda eğilme etkisindeki durum dikkate alınmaktadır. Çalışma kapsamında kolonlarda eksenel yük ve burulma etkileri oluşturulacaktır. Deneysel çalışma kapsamında etkilerinin engellenmesi nedeniyle yönetmeliklerdeki tasarım kriterleri uygulanamamaktadır. Yönetmeliklere göre tasarım yapılamayacağından kolonların tasarımında kullanılan donatı detayları, ülkemizde geçmiş yönetmeliklere göre tasarlanmış, mevcut yapı taşıyıcı sistemi betonarme çerçevelerden oluşan yapılarda kullanılan malzeme özellikleri ve donatı detayları dikkate alınarak belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında üretilen elemanlarda beton sınıfı C16 olarak belirlenmiştir. Elemanlarda, B420c sınıfında nervürlü donatı çeliği kullanılmıştır. Elemanlar ölçekli olarak üretildiğinden donatılar da kesite oranla ölçeklendirilmiştir. Kolonlarda boyuna donatı 4Ø10, kesme donatısı kolon boyunca Ø6/100 olarak seçilmiştir. Kolonların mevcut yapıları yansıması ve burulmanın kolon boyunca aynı kesit özelliklerinde etki etmesi amacıyla etriye sıklaştırması yapılmayacak şekilde tasarlanmıştır. Tüm donatılar B420c nervürlü donatı çeliğinden üretilmiştir. Kiriş boyunca veya kolon kiriş birleşim bölgesinde hasar oluşmaması amacıyla kolondaki boyuna donatılar kiriş içine döndürülmüştür ve kiriş boyunca etriyeler Ø6/50 olarak belirlenmiştir. Kolonun temel ile birleştiği bölgedeki 300 mm'lik kısımda da hasarın engellenmesi için Ø6/50 etriye seçilmiştir. Kolon ve kirişlerde paspayı 15 mm olarak belirlenmiştir. Kolonlarda eğilmenin engellenmesi için yükleme duvarına rijit bir bağlantı sağlanması gerekmektedir. Bu nedenle kolonun üst kısmına 300 mm çaplı 2000 mm uzunluğunda bir çelik gijon yerleştirilmiştir. Gijonun kolonda hasar oluşturmaması amacıyla tam kolon ekseninden ve 400 mm beton içerisinde kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılacak kolon boyutları ve donatı detayları Şekil 3.5'te verilmiştir.



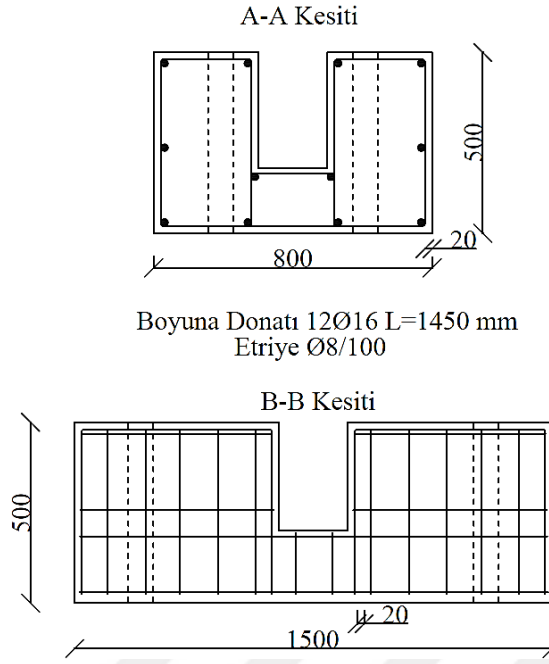
Şekil 3.5 Donatı detayları (Tüm ölçüler mm'dir.)

Seçilen boyuna donatılara göre hesaplanan boyuna donatı oranı, TBDY 2018'de belirtilen (44) bağıntısına göre;

$$0,01 < \frac{\pi 10^2}{150 \times 150} 4 = 0,014 < 0,04$$

olarak bulunmuştur ve yönetmelikteki maksimum ve minimum boyuna donatı oranı şartını sağlamaktadır.

Kolonların rijit döşeme ile bağlantısını sağlamak için üretilen temellerde boyuna donatı 12Ø16, etriyeler ise Ø8/100 olarak seçilmiştir. Temelde paspayı 20 mm olarak uygulanmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Temel donatı detayları (Tüm ölçüler mm' dir.)

Çalışma kapsamında test edilen tüm numunelerin kesit boyutları, beton dayanımları ve donatı özellikleri özdeştir. Kesit boyutları ve beton sınıfı dikkate alındığında elemanın kolon olarak çalışması için üzerindeki minimum aksenal yük hesaplanırsa;

$$N_d > 0,1A_c f_{ck}$$

$$N_d = 0,1 \times 150 \times 150 \times 16$$

$$N_d = 36000 \text{ N} = 3,60 \text{ ton}$$

yükleme yapılmalıdır. Kolonda aksenal yük değişiminin burulma davranışına etkisi araştırılması amacıyla aksenal yük etkisinin olmadığı numune referans numunesi olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında üretilecek kolonlarda, burulma etkisi depremi benzeştirecek şekilde etki edeceğinden, maksimum aksenal yük seviyesi için deprem yönetmeliğindeki maksimum yük seviyesi dikkate alınmıştır. Ayrıca elemanların üretimi ölçekli olarak yapıldığından kolonlarda aksenal yük seviyesi, elemanın maksimum aksenal yük kapasitesinin %30'u seviyesinde test edilmiştir. Çizelge 3.1'de deney elemanlarının kesit, malzeme özellikleri, isimleri ve deney parametreleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Deney numunelerine ait özellikler

Numune No	Numune İsmi	Kesit Boyutları (mm)	Boyuna Donatı	Donatı Oranı	Eksenel Yük Seviyesi	Eksenel Yük (kN)
1	SN-0				-	0
2	SN-1				%5	18
3	SN-2				%10	36
4	SN-3	150 x 150	4Ø10	%1,39	%15	54
5	SN-4				%20	72
6	SN-5				%25	90
7	SN-6				%30	108

Çizelge 3.1’de verilen numune isimleri deney elemanları ile ilgili bilgiler içermektedir. Burada kullanılan ifadeler;

S : Kare kesitli kolonu,

N : Normal kuvvet seviyesini,

0,1,2,3,4,5,6 : Kolon üzerine verilen eksenel yükün kolon eksenel yük kapasitesine oranını ifade etmektedir.

3.2. Malzeme Özellikleri

Yapılan deneysel çalışmada betonarme kolonlarda kullanılan beton C16 sınıfı, donatı ise B420c sınıfı olarak planlanmıştır. Numunelerin zemine bağlantısını sağlayacak temelerde C40 beton kullanılmıştır. Kolon ve temelin bağlantısında dayanımı 80 MPa değerine ulaşan grout harcı ile birleşim sağlanmıştır. Kolon numunelerinin üretiminde kullanılan betonun basınç dayanımı ve donatıların çekme dayanımı incelenmiştir. Ayrıca malzemelere ait özelliklerin belirlenmesi, burulma etkisindeki deney elemanlarının teorik ve analitik hesaplarının gerçeğe daha yakın olmasını sağlamaktadır.

3.2.1. Beton özellikleri

Deneye tabi tutulan kolonların üretiminde kullanılan beton sınıfının C16 sınıfı olması planlanmıştır. Bu sınıfa göre beton için elde edilen mekanik özellikler;

$$f_{ck} = 16 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = 11 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk} = 1,4 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 1,0 \text{ MPa olarak hesaplanmıştır.}$$

Deney elemanlarında kullanılan beton karışımındaki malzeme miktarları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Beton karışımında kullanılan malzeme miktarları (kg/m³)

Malzeme	Toplam Ağırlık (kg/m ³)
Su	170
Çimento	275
İnce Agregat (0-4 mm)	1164
İri Agregat (4-12 mm)	758
Süper Akışkanlaştırıcı	2,48

Üretimde Konya Çimento firmasına ait CEM II/A-M (P,L) 42,5R isimli çimento kullanılmıştır. Karışıma göre hazırlanan beton S2 kıvam sınıfındadır. Karışımın su/çimento oranı 0,62 olarak belirlenmiştir. Paspaylarının küçük olması ve elemanların ölçekli üretilmesi nedeniyle karışımda 12 mm'den büyük agregalar kullanılmamıştır.

Hazırlanan beton karışımına uygun olarak üretilen betonun basınç dayanımını belirlemek amacıyla, önceden yağlanmış kalıpların içerisine, üretimde kullanılan betondan 150 x 150 x 150 mm boyutlu 6 adet küp numune alınmıştır. Beton her aşamada 25 kez şişlenerek, 3 aşamada yerleştirilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Basınç testi için numune alınması

Hazırlanan küp numuneler üretim tesisinde 1 gün bekletilip kalıptan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler, Yardımcı Prefabrik bünyesindeki test laboratuvarında 28 gün boyunca gerekli kür şartlarını sağlanması amacıyla su içerisinde bekletilmiştir. Suda bekletilen numuneler 28 gün sonunda sudan çıkarılmış ve laboratuvarında beton basınç testine tabi tutulmuştur (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Betondan alınan küp numunelerin kürü ve basınç testleri

Betonda basınç dayanımının belirlenmesi için 150 x 150 x 150 mm boyutlu 6 adet küp numune, beton basınç test cihazında test edilmiştir. Çizelge 3.3'te beton basınç dayanımı sonuçları verilmektedir.

Çizelge 3.3. Deney numunelerine ait özellikler

Numune No	Numune İsmi	Yük (kN)	Kesit Alanı (mm ²)	Küp Dayanımı (MPa)	Ortalama Küp Dayanımı (MPa)	Silindir Dayanımı (MPa)	Ortalama Silindir Dayanımı (MPa)
1	SN-0	492,30		21,88		16,84	
2	SN-1	472,95		21,02		16,10	
3	SN-2	468,68		20,83		15,94	
4	SN-3	469,35	22500	20,86	21,14	15,97	16,21
5	SN-4	481,28		21,39		16,42	
6	SN-5	478,13		21,25		16,30	
7	SN-6	467,55		20,78		15,90	

Çizelgede betonun silindir basınç dayanımının yaklaşık değerinin bulunması amacıyla betonun küp basınç dayanım değerleri;

$$f_c' = [0,76 + 0,2 \times \log_{10}(f_{cu} / 19,6)] \times f_{cu} \quad (46)$$

bağıntısı ile hesaplanmış ve elde edilen veriler Çizelge 3.3'te verilmiştir. (Kaplan, 2004). Yapılan testler sonucunda küp numunelerin ortalama basınç dayanımı 21,14 MPa olarak tespit edilmiş, bu değere göre hesaplanan ortalama silindir basınç dayanımı ise 16,21 MPa olarak belirlenmiştir. Malzeme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre istenilen kalitede betonun temin edildiği görülmektedir.

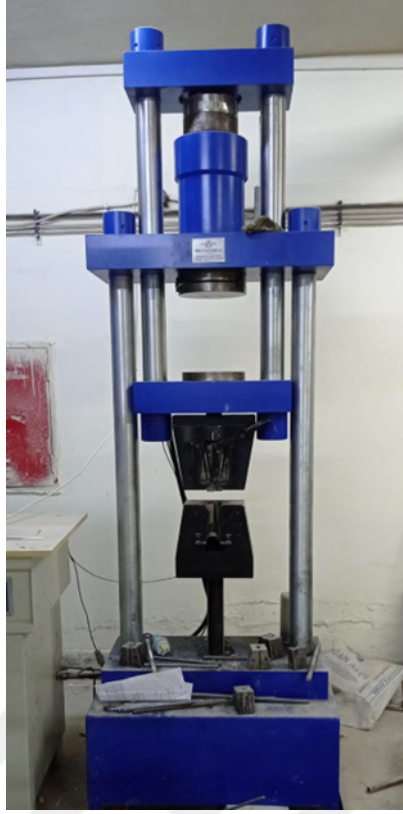
3.2.2. Donatı özellikleri

Kolonlarda boyuna donatı 4Ø10, etriyeler kolon boyunca Ø6/100 olarak seçilmiştir. Elemanlarda, B420c sınıfında nervürlü donatı çeliği kullanılmıştır. Belirlenen donatı sınıfına bağlı olarak elde edilen mekanik özellikler;

$$f_{yk} = 420 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = 365 \text{ MPa'dır.}$$

Her iki donatı çapı için üçer adet olmak üzere toplam 6 adet donatı kesilerek Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarına getirilmiştir. Kesilen donatılar çekme deney düzeneğinde test edilmiş ve deneylerde kullanılan donatıların mekanik özellikleri belirlenmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Çekme deney düzeneği

Elemanlarda etriyelerde kullanılan $\text{Ø}6$ donatıları için elde edilen mekanik özellikler Çizelge 3.4'te, boyuna donatılarda kullanılan $\text{Ø}10$ donatıları için elde edilen mekanik özellikler Çizelge 3.5'te verilmiştir. Donatı çekme deneyleri sırasında akma kuvveti, akma gerilmesi, çekme kuvveti, çekme gerilmesi, kopma kuvveti, kopma gerilmesi, donatının uzama miktarı ve donatı çeliğinin elastisite modülleri belirlenmiştir. Çekme deneyinden elde edilen sonuçlara göre B420c donatısında tasarım dayanımı $f_{yd} = 365 \text{ MPa}$ değerinin, tüm numunelerde sağlandığı görülmektedir.

Çizelge 3.4 Ø6 donatıları için elde edilen mekanik özellikler

Elemanın Mekanik Özelliği	Numune - 1	Numune - 2	Numune - 3	Ortalama
Akma Kuvveti (N)	11298	11197	10413	10969
Akma Dayanımı - Re (MPa)	399,59	396,00	368,28	387,96
Çekme Kuvveti (N)	12528	12809	13234	12857
Çekme Dayanımı - Rm (MPa)	443,07	453,03	468,06	454,72
Kopma Kuvveti (N)	12652	12117	13417	12729
Kopma Mukavemeti (MPa)	447,48	428,54	474,52	450,18
Rm/Re	1,11	1,14	1,27	1,17
Uzama (%)	21,6	26,1	19,38	22,36
Elastisite Modülü (MPa)	213250	195170	203270	203897

Çizelge 3.5 Ø10 donatıları için elde edilen mekanik özellikler

Elemanın Mekanik Özelliği	Numune - 1	Numune - 2	Numune - 3	Ortalama
Akma Kuvveti (N)	19327	19869	18522	19239
Akma Dayanımı - Re (MPa)	410,13	421,63	393,05	408,27
Çekme Kuvveti (N)	24589	24073	23504	24055
Çekme Dayanımı - Rm (MPa)	521,8	510,85	498,76	510,47
Kopma Kuvveti (N)	22398	22966	22069	22478
Kopma Mukavemeti (MPa)	475,29	487,36	468,32	476,99
Rm/Re	1,27	1,21	1,27	1,25
Uzama (%)	23,7	25,2	26,3	25,07
Elastisite Modülü (MPa)	203273	208707	196847	202942

3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması

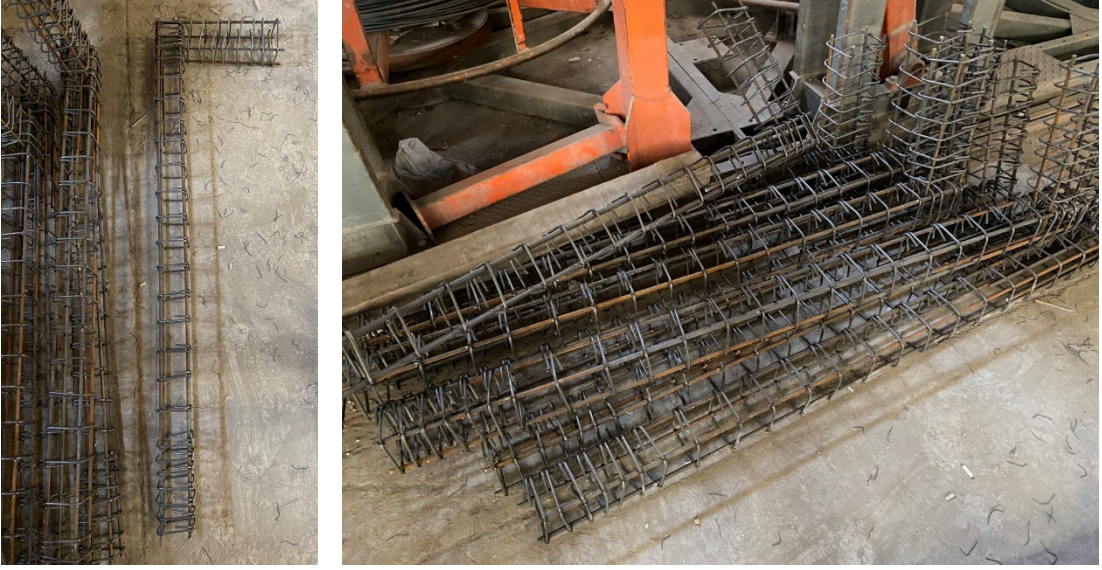
Deney elemanları bir prefabrik üretim tesisinde hazırlanmış ve sonrasında Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarına getirilmiştir. Tüm numunelerde beton ve donatı özellikleri aynı olarak belirlenmiş ve 9 adet numunenin üretimi aynı anda yapılmıştır.

Betonarme elemanlar yatay olarak üretilmiştir. Elemanların üretiminde öncelikle numune boyutlarına uygun olacak şekilde kalıp planı hazırlanmıştır. Kalıp ölçülerine uygun şekilde kesilen, çift tarafı parlak beyaz kaplamalı sunta kalıp malzemesi, numunelerin üretileceği üretim tesisine getirilmiştir. Burada kalıp tahtaları plana uygun şekilde, vidalarla birleştirilerek numunelerinin kalıbı oluşturulmuştur (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Deney kalıplarının hazırlanması

Deney elemanlarının tasarımında belirlenen boyuna donatı ve etriyeler, donatı şemasına uygun olarak bağlanmıştır (Şekil 3.11). Kalıp ve donatıların boyut ve donatı aralıklarının kontrolü sağlanmıştır (Şekil 3.12). Kontrollerin ardından kalıplar yağlanmış ve donatılar kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 3.13). Elemanda donatılara 15 mm'lik plastik paspayları takılmıştır. Kalıp üzerinde, kolonun tam ekseninde 30 mm çaplı bir delik açılmış ve kolonda eğilmenin önlenmesini sağlayacak gijon bu delikten 400 mm kolon içerisinde kalacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.14). Beton dökümü esnasında kalıpların açılmaması için kalıplar üst kısımlarından çelik donatılar ile sıkıştırılmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.11 Hazırlanan donatılar



Şekil 3.12 Kalıp ve donatıların kontrolü



Şekil 3.13 Kalıp ve donatıların kontrolü



Şekil 3.14 Donatıların ve gijonun kalıplara yerleştirilmesi



Şekil 3.15 Kalıpların sabitlenmesi

Tasarımı yapılan C16 sınıfı beton, prefabrik tesisinde bulunan beton santralinde hazırlanmış ve beton mikseri ile üretim tesisine getirilerek beton dökümü yapılmıştır (Şekil 3.16). Kalıplara dökülen betonun sıkışması ve donatı ile aderansın sağlanması için dökülen beton şişlenerek, betonun kalıba yerleştirilmesi sağlanmıştır. Kalıba yerleştirilen betonun üst bölümü düzlenmiştir (Şekil 3.17). Beton basınç testinin yapılması için numunelerin üretiminde kullanılan betondan döküm sırasında 6 adet numune alınmıştır.



Şekil 3.16 Beton dökümü



Şekil 3.17 Beton Dökümü Yapılan numunelerin masterlanması ve son durumu

Betonda su kaybının önlenmesi amacıyla dökümü yapılan numunelerin üstü naylon ile örtülmüştür. Beton dökümünden 12 saat sonra numuneler sulanarak kür işlemi yapılmıştır (Şekil 3.18)



Şekil 3.18 Beton dökümü yapılan numunelerin kür işlemi

Betonarme kolonun üzerindeki yükleri rijit döşemeye aktarması ve kolonun alt kısmında dönme oluşmasının engellenmesi için 800x1500x500 boyutlu temel üretimi Prefabrik tesisinde gerçekleştirilmiştir. Temelin üst kısmında kolon ile bağlantıyı sağlamak amacıyla orta bölgede 190x190 mm boyutlu bir çelik kutu yerleştirilmiş ve dökümden 30 dakika sonra betonun içerisinden çıkarılmıştır. Temelin rijit döşeme ile bağlantısının kurulması için temel üzerinde 70 mm çaplı 6 adet boşluk bırakılmıştır. Temelin üretimi için çelik plakalardan bir kalıp oluşturulmuş ve plakalar döküm esnasında açılmayı engelleyecek şekilde bağlanmıştır. Donatı şemasına uygun olarak hazırlanan temel donatıları yağlanan çelik kalıba yerleştirilmiştir. Temelde 20 mm'lik paspayı mesafesi uygulanmıştır. Beton dökülen temel, beton dökümünden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmıştır (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 Temel kalıbı ve temel betonunda bırakılan boşluklar

Deney numunelerinin yeterli dayanım kazanması ve taşıma esnasında elemanlarda hasar oluşmasını engellemek amacıyla üretilen elemanlar ve temel 28 gün bekletilmiştir. Yeterli dayanımı kazanan elemanlar vinç yardımıyla kamyonu yüklenerek Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarına getirilmiştir (Şekil 3.20). Numuneler kalıptan çıkarılarak laboratuvarda istiflenmiştir.



Şekil 3.20 Üretilen kolon numunelerinin laboratuvarda istiflenmesi

Deneylerde kullanılacak temel, deneylerin yapılacağı rijit yükleme duvarının yanında, kurulacak deney düzeneğine uygun şekilde yerleştirilmiştir. Yerleştirilen temel, tijler yardımıyla rijit döşemeye alttan ve üstten sabitlenmiştir. Deneyde test edilecek deney numuneleri vinç yardımıyla temel üzerinde bulunan sokete yerleştirilmiş ve yüksek dayanımlı grout harcı ile temel-kolon birleşimi yapılmıştır (Şekil 3.21). Her deney sonrasında kolonun sokette bulunan kısmı kırılarak yeni deney numunesi yerleştirilmiştir. Deney numuneleri, çatlakların net gözükmesi için beyaz renkte boyanmıştır.



Şekil 3.21 Temel ve kolonun birleştirilmesi, grout harcı birleşimi, numunelerin boyanması

3.4. Deney Düzeneği, Ölçüm Tekniği ve Ölçümlerin Değerlendirilmesi

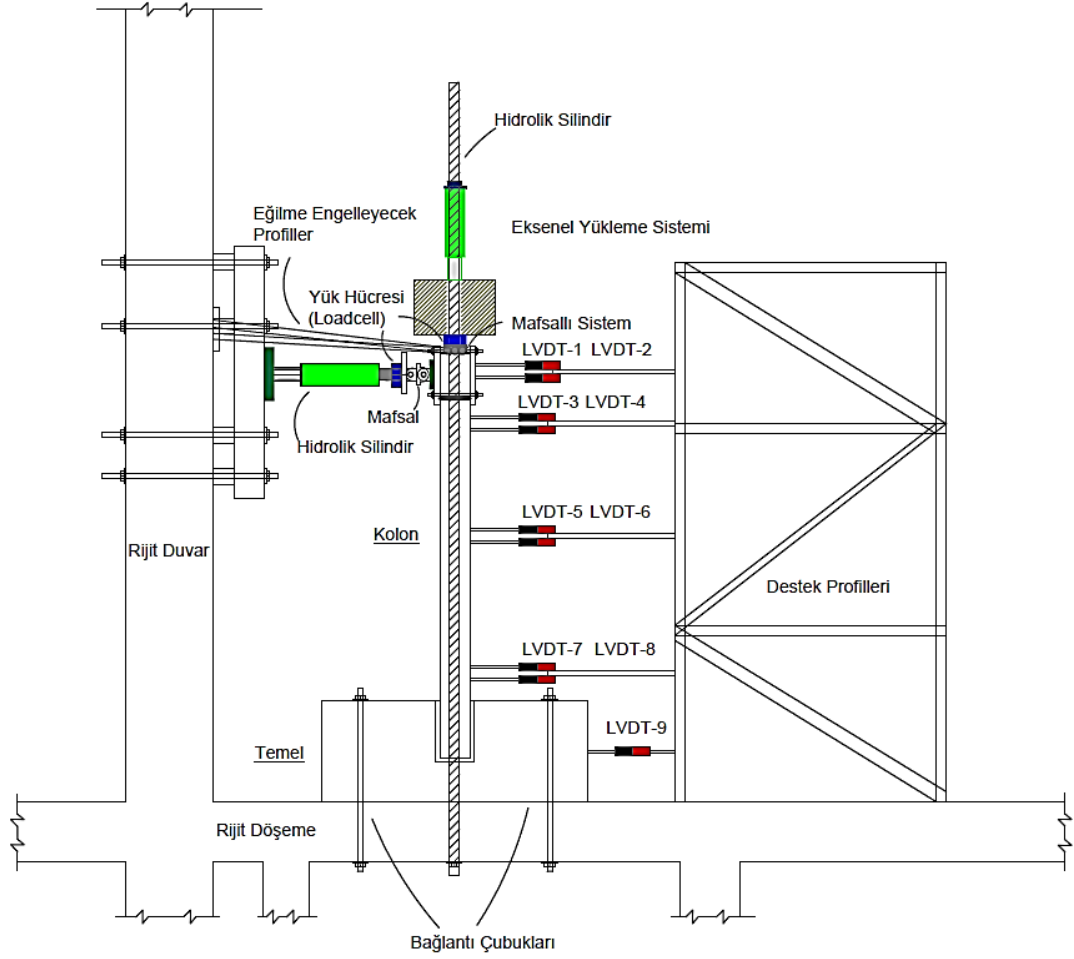
Çalışma kapsamında üretilen elemanların 2 tanesi deney düzeneğinin kurulması için kullanılmış; bu numuneler ile ön deneyler gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan deney düzeneğinde 7 adet deney numunesi, çevrimsel yükleme altında test edilmiştir.

Deneylerde aksel yüklemeye, hidrolik silindirler ile kolonda basınç oluşturacak şekilde, burulmaya neden olacak yatay yüklemeye ise itme ve çekme olarak uygulanmıştır. Deneylerde yük seviyelerinin belirlenmesi için yük hücresi kullanılmış olup, deney elemanlarındaki yer değiştirmelerin tespit edilmesi amacıyla potansiyometrik cetveller kullanılmıştır. Deneylerde elde edilen yük ve deplasman değerleri, veri toplama sistemi kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmış ve deney sonuçları kaydedilmiştir. Ölçüm

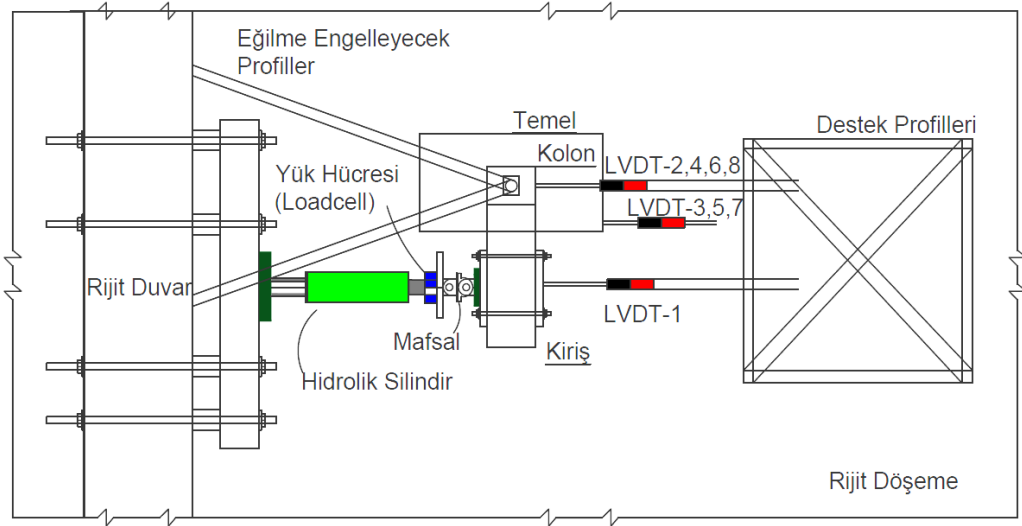
aletlerinden okunan yük ve deplasman değerleri, veri toplama sistemi ile bilgisayar ortamına aktarılmış ve bilgisayarda kayıt altına alınmıştır.

3.4.1. Deney düzeneği ve düzeneğin hazırlanması

Deneysel çalışmada deney düzeneği, yerine yerleştirilen ve temel ile bağlantısı sağlanan eleman üzerinde imal edilmiştir. Oluşturulan burulma deney düzeneği, farklı enkesit boyutlarına, farklı uzunluklara veya farklı eksenel yük seviyelerine sahip kolonların eksenel yük ve burulma etkileri incelemeye olanak sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Düzeneğin tasarımında kolonda eksenel yükün oluşturulması için (Ünal, 2018)'in çalışmasında kullanılan eksenel yükleme sisteminden, Elemanda burulma etkilerinin oluşturulması için ise (Soley, 2010) tarafından kullanılan burulma düzeneğinden yararlanılmıştır. Betonarme kolon üzerinde eksenel yükü oluşturabilmek için kolon üzerine çelik yükleme kirişi yerleştirilmiş ve yükleme kirişi iki taraftan zemine bağlanmıştır. çelik yükleme kirişi 2 adet hidrolik silindir hidrolik krikolar ile yüklenmiştir. Çelik kirişe verilen yükleme ile kolonda sıkıştırma yoluyla eksenel yük etkisi oluşturulmuştur. Ön deney numunelerinden bir tanesi kolonlarda eksenel yükün oluşturulması için kullanılmıştır. Kolonda burulmanın oluşturulması amacıyla kolon ile birlikte üretilen kirişe, laboratuvarında bulunan yükleme duvarına sabit olan hidrolik silindir vasıtasıyla yatay yükleme etkisi oluşturulmuştur. Oluşturulan yüklemenin etkisi ile kolonda burulma momentinin ve dönme hareketinin oluşması amaçlanmıştır (Şekil 3.22).



(a)



(b)

Şekil 3.22 Deney düzeneğinin (a) Yandan görünüşü (b) Üstten görünüşü

Kolon ile birlikte üretilen kirişe yatay yük etkimesi ile kolonda burulma momenti etkisi oluşturulmuştur. Hidrolik silindir, kullanılan elektronik pompa ile itme ve çekme yönünde yüklenmiştir. Yatay yükü verecek hidrolik silindirin ucundaki yük hücresi ile verilen yatay yükleme değeri belirlenmiştir. Hidrolik silindirin ucunda eleman döndüğünde yüklerin de dönebilmesi ve elemana iletilebilmesi için çelik mafsallı bir birleşim yapılmıştır (Şekil 3.23). Yatay yüklemenin etkisiyle kirişte ya da kolon kiriş birleşim bölgesinde hasarın engellenmesi amacıyla kiriş iki taraftan 200x700 mm kesitli çelik plakalar ile sıkıştırılmıştır (Şekil 3.24). Kirişteki yatay yükleme kolon eksenine 400 mm'lik moment kolu olacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 3.23 Kolon ve yükün birlikte hareketini sağlayan çelik mafsallı birleşim



Şekil 3.24 Kirişte bölgesel hasarı engelleyen plakalar

Burulma etkisindeki elemanda aksenal yüklemenin kolon üzerinde sabit kalması ve kolonun serbestçe dönebilmesi için 42 adet bilyeden oluşan çelik döner mafsal sistemi üretilmiştir (Solak ve ark., 2022). Mafsaldaki tüm bilyeler numune üzerine yerleştirilmeden önce sürtünmeyi azaltmak amacıyla gres yağı ile yağlanmıştır (Şekil 3.25). Döner sistemin serbestçe dönebilmesi ve betondaki sürtünmenin engellenmesi için kolon üzerine önce çelik plakalar yerleştirilmiş, mafsal sistemi plakalar üzerinde konumlandırılmıştır (Şekil 3.26). Ön deneylerde mafsal sisteminin çalışma durumu kontrol edilmiştir.

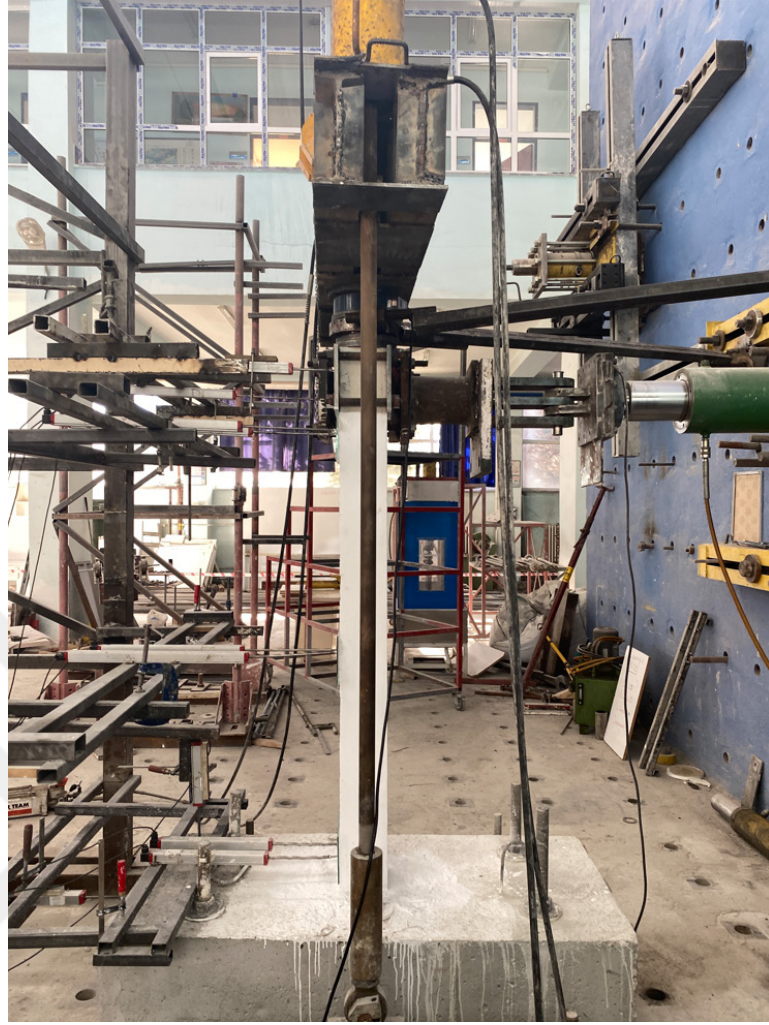


Şekil 3.25 Döner mafsal sistemi ve gres yağı uygulaması



Şekil 3.26 Döner mafsali sisteminin kolon üzerine yerleştirilmesi

Kolonda oluşan aksenal yüklemenin ölçülmesi amacıyla mafsallı sistem üzerine yük hücresi yerleştirilmiştir. Yük hücresinin üzerine çelik yükleme kirişi yerleştirilmiştir. Çelik kiriş yerleştirilirken içerisindeki boşluklardan gijon ve zemine bağlanan profiller geçirilmiştir (Şekil 3.27). Zemine bağlantıyı sağlayan iki taraftaki çelik profillerin yerleştirilen kiriş üzerinde kalan kısmına 2 adet hidrolik silindir yerleştirilmiş ve bu silindirler çelik plakalar ve bulonlarla sabitlenmiştir. Hidrolik silindirler hidrolik kriko ile yüklenmiş ve kolonda aksenal yük etkisi oluşturulmuştur.



Şekil 3.27 Kolon üzerine aksenal yük uygulanması

Bu çalışmada kolonun yalnızca aksenal yük ve burulma etkisi altındaki davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle elemandaki eğilme momentinin engellenmesi istenmiştir. Kolonlar içerisinde 30 mm çaplı çelik gijon ile üretilmiştir. Kolonun üzerindeki gijon içerisinden geçirilen mafsalsal sistemi, kenarlarına kaynaklanan çelik parçalardan geçen 2 adet çelik profil ile duvara bağlanmıştır.

Profillerde eğilmenin engellenmesi nedeniyle meydana gelen çekme ve basınç kuvvetleri, profilin ucuna bağlanan yük hücresi yardımıyla kontrol edilmiştir. Bu bağlantının sağlanması ile gijon duvara sabitlenmiştir. Gijonun ileri ve geri hareketinin tutulması ile elemandaki baskın eğilme etkileri engellenmiştir (Şekil 3.28).

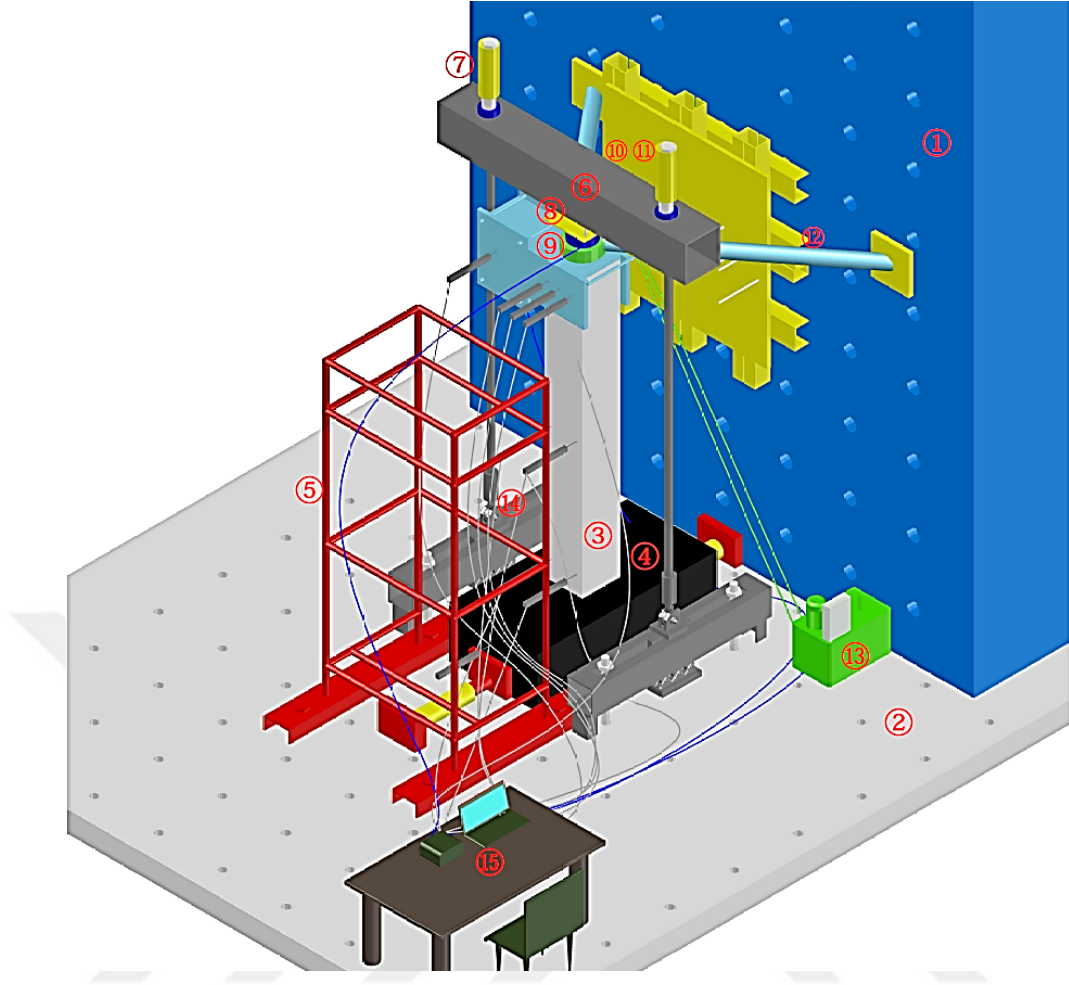


Şekil 3.28 Kolonda gijonun tutulması ve eğilmenin engellenmesi

Deney düzeneğini oluşturan tüm parçalar betonarme eleman üzerinde birleştirilerek kolonlar deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.29). Deney düzeneğinin 3 boyutlu görünüşü ve düzeneğin hazırlanmasında kullanılan sistemlerin ayrıntılı açıklamaları Şekil 3.30'da gösterilmiştir.



Şekil 3.29 Aksenal yük-burulma yüklemesi deney düzeneği



Şekil 3.30 Deney düzeneğinin 3D görünüşü

Deney düzeneğine ait parçaların isimlendirmesi ;

- 1 - Rijit Yükleme Duvarı
- 2 - Rijit Döşeme
- 3 - Kolon Numunesi
- 4 - Kolon Temeli
- 5 - Karkas Sistem
- 6 - Çelik Yükleme Kirişi
- 7 - Hidrolik Silindir (Eksenel Yük)
- 8 - Yük Hücresi (Eksenel Yük)
- 9 - Bilyeli Döner Sistem
- 10 - Hidrolik Silindir (Burulma)
- 11 - Yük Hücresi (Yatay Yük)
- 12 - Eğilme Profilleri
- 13 - Hidrolik Pompa
- 14 - Veri Toplama Sistemi olarak yapılmıştır.

3.4.2. Ölçüm tekniği

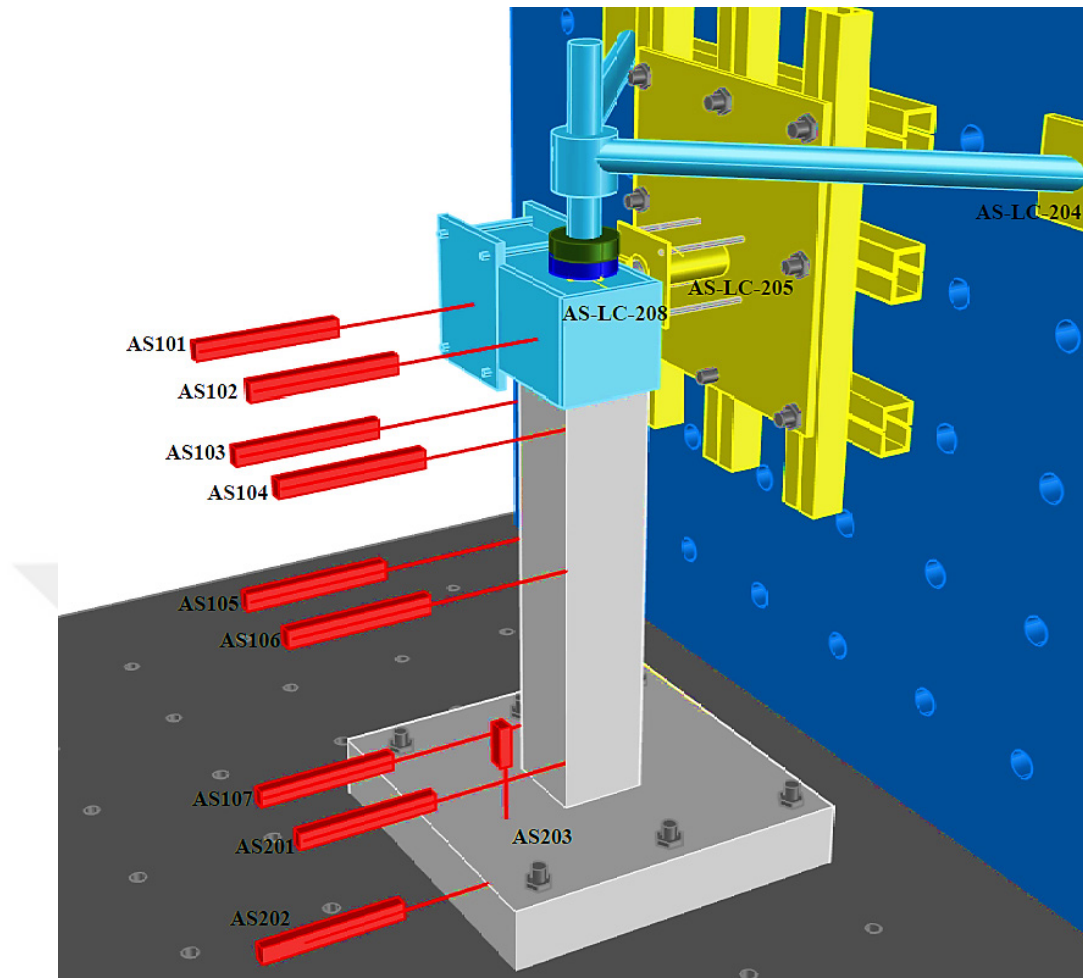
Çalışma kapsamında yapılan deneylerde, yük değerlerinin ölçümü için 3 adet yük hücresi kullanılmıştır. Yer değiştirmelerin ve dönmenin hesaplanabilmesi için 10 adet potansiyometrik cetvel yerleştirilmiştir. Yük hücrelerine ve potansiyometrik cetveller kablolar ile veri toplama sistemine bağlanmıştır. Veri toplama sistemi ile deneylerden alınan veriler aygıt geçidi ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bilgisayar ortamında kullanılan deney programı yardımıyla deneylerin kontrolü sağlanmış ve deneylerden elde edilen veriler kaydedilmiştir. Veriler hesap programına aktarılarak farklı hesaplamalar ve grafikler hazırlanmıştır (Şekil 3.31).



Şekil 3.31 Yük hücresi ve potansiyometrik cetveller

Deneylerde yatay hidrolik silindirin ucunda bulunan yük hücresi 500 kN kapasitelidir. Deneylerde kirişe verilen yatay yük yerleştirilen yük hücresinden okunmuştur. Kolon üzerine yerleştirilen yük hücresi ile kolona gelen aksenal yük değeri belirlenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan diğer yük hücresi eğilme profillerinin uç kısmına yerleştirilmiş olup, yük hücresi yardımıyla profillerde meydana gelebilecek çekme ve basınç kuvvetleri belirlenmiştir.

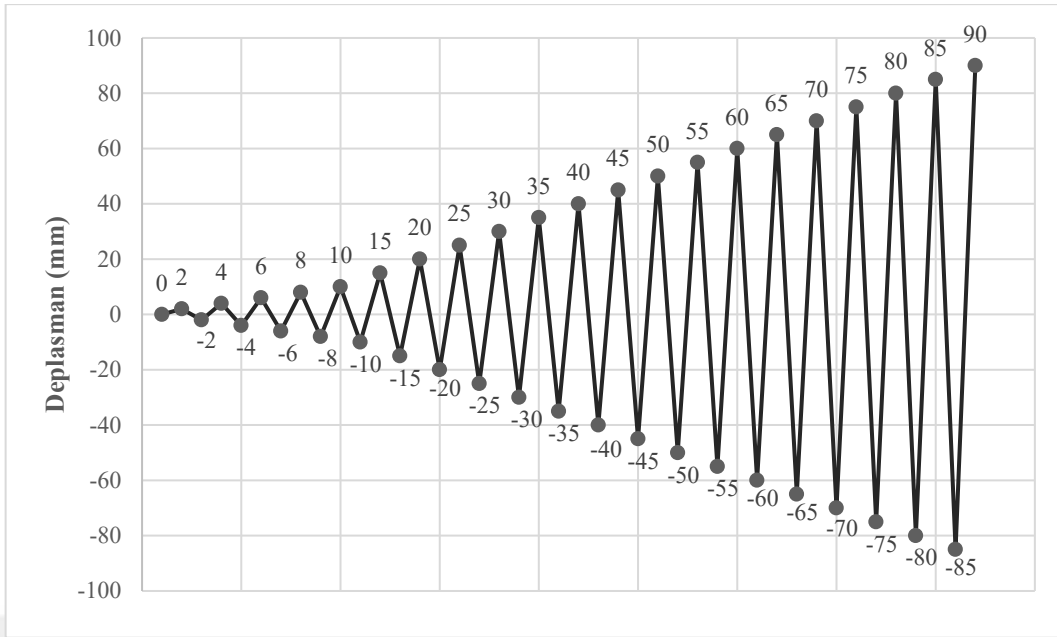
Deney numunelerinde meydana gelen dönmeyi belirlemek amacıyla kiriş ucunda ve kolon ekseninde, kolonun üst, orta ve alt bölgelerinde potansiyometrik ikişer adet potansiyometrik cetvel yerleştirilmiştir. Dönme etkisiyle ölçümlerin bozulmasını engellemek ve pürüzsüz bir yüzey oluşturmak amacıyla cetvellerin bulunduğu noktalara cam levhalar yapıştırılmıştır. Kirişteki deplasmanı ölçmek için kullanılacak cetvelin en az 90 mm deplasman yapabilecek şekilde seçilmesine dikkat edilmiştir. Temelde yatay ve düşey yönde yerleştirilen potansiyometrik cetveller ile deneyler esnasında temelin deplasmanı kontrol edilmiştir (Şekil 3.32).



Şekil 3.32 Yük hücresi ve potansiyometrik cetvellerin numune üzerinde yerleşimi

3.4.3. Yükleme protokolü

Deneylerde burulma çatlamaşının net olarak belirlenebilmesi için deplasman kontrollü yükleme yapılmıştır. Burulma çatlamaşının oluşmasının beklendiğı deplasman değerlerinde (10 mm deplasmana kadar) deneyler 2 mm deplasman aralıklarında yürütölmüş, çatlamaşının oluşması ile deneyler 5 mm'lik deplasman adımları ile sürdürölmüştür. Her yükleme adımı depremi benzeştirmek amacıyla itme ve çekme olacak şekilde çevrimsel uygulanmıştır (Şekil 3.33).



Şekil 3.33 Yükleme protokolü

Elemanda burulma momentinin %20'si oranında azalmasına kadar veya ciddi hasarlar görülene kadar deneyler sürdürülmüştür. Kolonlarda eksenel yük seviyesinin burulma davranışına etkisini net olarak belirlemek için tüm numunelerde eksenel yük, deney başlangıcında sabitlenmiştir. Her numune için belirlenen eksenel yük, kolonlar üzerinde hidrolik krikolar vasıtasıyla etki ettirilmiştir.

3.4.4. Ölçümlerin değerlendirilmesi

Deneylerde kullanılan 3 adet yük hücresi ve 10 adet potansiyometrik cetvelden elde edilen veriler veri toplama sistemi ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deneylerden elde edilen veriler işlenerek çeşitli hesaplamalar yapılmış. Elde edilen sonuçlar incelenerek kolonların burulma davranışı özellikleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Her bir deney numunesi için yük-deplasman grafikleri, moment-dönme grafiği, enerji tüketim grafikleri, rijitlik grafiği, burulma rijitliği grafiği, Eksenel yükün deney boyunca değişimi ve burulma etkisiyle kolonun üst orta ve alt bölgesinde meydana gelen dönme incelenmiştir.

3.4.4.1. Yük deplasman grafiklerinin çizilmesi

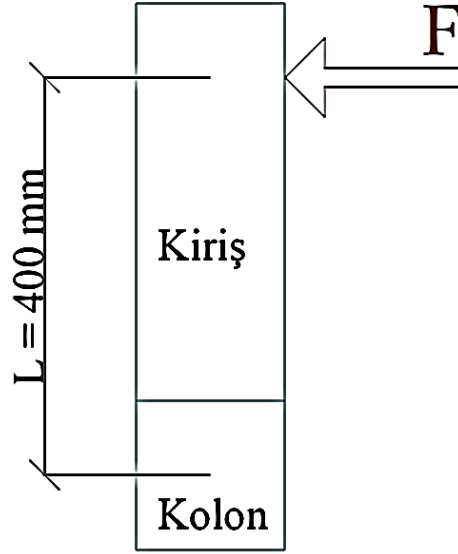
Deney numunelerinde deplasman kontrol edilerek yükleme yapılmıştır. Her yüklemekten sonra çatlaklar belirlenmiş ve numune üzerinde işaretlenmiştir. Kolon üzerinde itme yönünde oluşan çatlaklar kırmızı, çekme yönündeki çatlaklar mavi renk ile gösterilmiştir. Yük-deplasman grafiklerinin çizimi için deneyde kullanılan yatay yük hücresinden elde edilen yük değeri ve giriş ucundaki potansiyometrik cetvelden elde edilen deplasman değeri verilerinden yararlanılmıştır. Her adımda verilen deplasmana karşılık elde edilen yük belirlenerek yük deplasman grafiği oluşturulmuştur. Her çevrimde oluşan en büyük yatay yük değeri belirlenerek çevrimsel yüklemenin zarf eğrisi oluşturulmuştur.

3.4.4.2. Moment-dönme grafiklerinin çizilmesi

Deneylerde yatay yönde yerleştirilen yük hücresinden elde edilen yük değerinin (F) kolon eksenine olan mesafe (L) ile çarpılması sonucu kolonda oluşan burulma momenti değeri (T) belirlenmiştir. Buna göre burulma momentinin hesabında;

$$T = F \times L \quad (47)$$

bağıntısı kullanılmıştır. Burada L, moment kolunu ifade etmektedir. Çalışmada deney düzeneği, L=400 mm olacak şekilde düzenlenmiştir (Şekil 3.34). Her çevrimde oluşan en büyük moment değeri ve yüklemeye karşılık dönme miktarı belirlenerek çevrimsel yüklemenin zarf eğrisi oluşturulmuştur. Moment dönme grafiklerinden oluşturulan zarf eğrisi yardımıyla elemanın çatlama momenti, maksimum momenti, nihai moment değerleri ve bu değerlere karşılık dönme miktarları itme ve çekme çevrimleri için belirlenmiştir. Nihai moment değeri olarak elemanın moment taşıma kapasitesinin %20'sini kaybedildiği moment değeri dikkate alınmıştır.

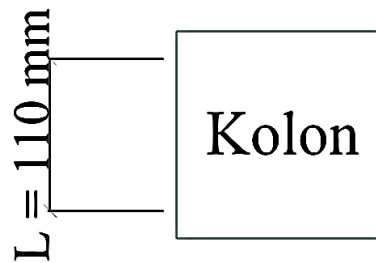


Şekil 3.34 Dönmenin ölçülmesi

Kolonun aksenal dönme açısı (θ), kiriş ucuna ve kolon eksenine yerleştirilen potansiyometrik cetvellerden elde edilen deplasman farkının ($\delta_1 - \delta_2$), moment kolu uzunluğuna (L) bölünmesi ile hesaplanmaktadır.

$$\theta = \frac{(\delta_1 - \delta_2)}{L} \quad (48)$$

Bu bağıntı kullanılarak kolonun alt, orta ve üst seviyelerindeki dönme açıları da belirlenmiştir. Kolonun farklı seviyelerinde iki potansiyometrik cetvel arasındaki mesafe $L=110$ mm olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.35). Bölgesel dönme açıları incelenirken bu mesafe dikkate alınmıştır.



Şekil 3.35 Kolon yüzünde dönmenin ölçülmesi

3.4.4.3. Rijitlik grafiklerinin çizilmesi

Bir elemanın, yer değiştirme etkisine karşı gösterdiği direnç derecesi elemanın rijitliğini belirtmektedir. Yapı elemanlarında hasar meydana gelmesi ile elemanın rijitliği azalmaktadır. Elemana uygulanan yatay yük (F) ile, meydana gelen yer değiştirme miktarı (δ), rijitlikle (ϕ) ilişkilidir. Deney elemanlarında meydana gelen rijitlik değerleri her yükleme için yük- deplasman grafiğinin eğimi ile belirlenmiştir.

$$\phi = \frac{F}{\delta} \text{ (kN / mm)} \quad (49)$$

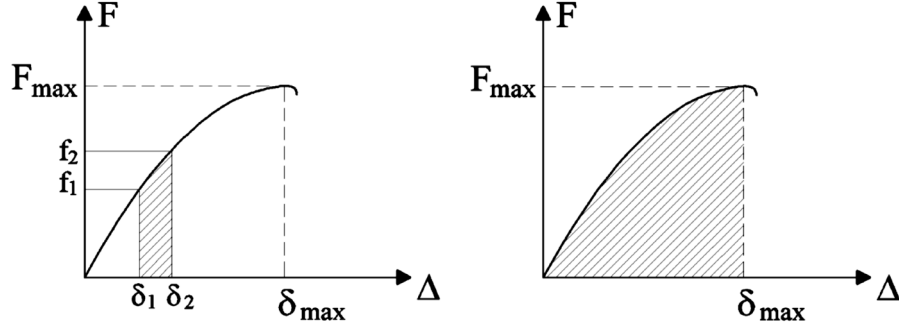
3.4.4.4. Burulma rijitliği grafiklerinin çizilmesi

Bir elemanın, yer değiştirme etkisine karşı gösterdiği direnç derecesi elemanın rijitliğini gösterirken, elemanın dönme etkisine karşı gösterdiği direnç ise burulma rijitliğini göstermektedir. Elemanda burulma hasarının meydana gelmesi ile elemanın burulma rijitliği çatlama öncesindeki rijitliğin % 90'ı ile %97'si arasında azalmaktadır (Ersoy ve ark., 2019). Elemana uygulanan burulma momenti (T), elemanda meydana gelen dönme miktarı (θ), burulma rijitliği (k) ile ilişkilidir.

$$k = \frac{T}{\theta} \text{ (kNm / rad)} \quad (50)$$

3.4.4.5. Tüketilen toplam ve kümülatif enerji grafiklerinin çizilmesi

Deney elemanlarının enerji tüketim kapasiteleri, yük-deplasman grafiğinin altında kalan alanlarda harcanan enerjinin hesaplanması ile belirlenmiştir. Deneydeki her bir yükleme adımı için harcanan enerji miktarı bulunmuş ve bu alanların toplanması ile çevrimde tüketilen toplam enerji belirlenmiştir (Şekil 3.36) (Ünal, 2016).



Şekil 3.36 Tüketilen enerji grafiklerinin hesabı (Ünal, 2016)

Her çevrimde meydana gelen enerji tüketiminin altında kalan enerji tüketimi ayrı ayrı belirlendikten sonra her çevrim için elde edilen enerjilerin toplamı deneyde tüketilen kümülatif enerji grafiklerinin çiziminde kullanılmıştır. Enerji grafiklerinde yük-deplasman verileri kullanılmış, grafiklerin yatay eksenini deplasman değerlerini, dikey eksenini ise tüketilen enerji miktarını göstermektedir.

3.4.4.6. Eksenel yükün değişim grafiklerinin çizilmesi

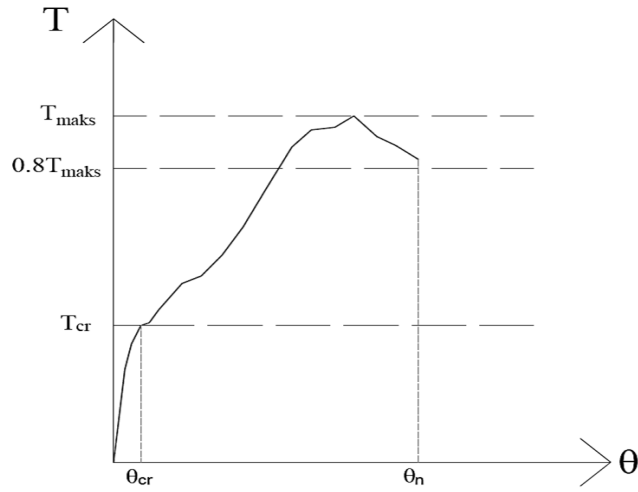
Deneylerde eksenel yük seviyesinin kolonlarda burulma davranışına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla kolon üzerinde eksenel yük kapasitesinin %30'una kadar yüklemeler yapılmış, numuneler farklı eksenel yük seviyelerinde burulma testine tabii tutulmuştur.

Kolonda burulma etkisinde meydana gelen dönme nedeniyle eleman uzamaya çalışmaktadır. Üzerinde eksenel yük bulunan kolonda uzama gerçekleşemediğinden, meydana gelen sıkışmanın etkisiyle, kolonda eksenel yük seviyesinde artış gözlemlenmiştir. Elemanlarda hasarın oluşması ve ilerlemesiyle kolonda eksenel yük seviyesi azalmıştır. Her bir deney için elemana etki eden eksenel yükleme kolon üzerindeki yük hücresi yardımıyla belirlenmiş, elemanın zamana ve dönmeye bağlı eksenel yük değişimi grafiği çizilmiştir.

3.4.4.7. Dönme süneklik faktörünün belirlenmesi

Süneklik; bir yapının, yapı malzemesinin veya yapıdaki taşıyıcı elemanın, yük taşıma kapasitesinde ciddi bir azalma olmadan, şekil değişikliği yapabilme kapasitesini tanımlamaktadır (Ersoy ve ark., 2019). Herhangi bir yapı elemanında çatlama anındaki dönme değerinin (θ_{cr}), nihai dönme değerine (θ_n) oranı dönme süneklik faktörü olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.37) (Park, 1989).

$$\mu_T = \frac{\theta_{cr}}{\theta_n} \quad (51)$$



Şekil 3.37 Dönme süneklik faktörünün belirlenmesi

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

Test edilen deney numunelerinin burulma ve eksenel yük etkisindeki davranışlarının belirlenmesi için her bir deney numunesine ait deney sonuçları ve deneylerden elde edilen davranış özellikleri, her numunede tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalar ve elde edilen veriler ışığında yorumlanmıştır.

Deneylerde çevrimsel yükleme altında test edilmiş olan kolon numunelerinin kesit ve donatı detayları özdeştir. Gerçekleştirilen tüm deneylerde yükleme deplasman kontrollü olarak etkimektedir. Deneyler, deney elemanlarında büyük hasarlar meydana gelinceye kadar devam ettirilmiştir. Deney elemanlarında, her yüklemeye ölçülen yük ve deplasman değerleri ile moment-dönme değerleri hesaplanmış, numunede çatlak ve hasar durumunu belirten çatlak analiz çizelgesi oluşturulmuştur.

Deneylerde her yüklemeye sonra oluşan çatlaklar numune üzerine işaretlenmiştir. İtme çevrimlerinde meydana gelen çatlaklar kırmızı, çekme çevrimlerinde oluşan çatlaklar mavi ile işaretlenmiş ve çatlakların oluşma sırasına göre numaralandırılmıştır. Çatlakların çevrim numarası ve çatlak genişlikleri not edilmiştir.

Deneyler sonucunda sonuçların yorumlanabilmesi ve davranışın belirlenebilmesi amacıyla her numune için elde edilen veriler grafik üzerinde gösterilmiştir. Sonuçların daha net anlaşılması amacıyla deneylerden elde edilen grafikler karşılaştırmalı olarak kontrol edilmiştir. İtme ve çekme çevrimlerinden elde edilen çatlama momenti, maksimum moment değerleri ve bu değerlerdeki dönme açıları belirlenmiş. Bu değerler tablolaştırılarak sunulmuştur. Her numune için;

- Yük-Deplasman grafiği,
- Yük-Deplasman zarf eğrisi
- Rijitlik grafiği
- Tüketilen Toplam Enerji grafiği,
- Tüketilen Kümülatif Enerji grafiği,
- Moment-Dönme grafiği
- Moment Dönme zarf eğrisi.
- Burulma Rijitliği grafiği
- Eksenel yükün zamana ve dönmeye bağlı değişimi grafiği

elde edilmiştir.

4.1. Deney Sonuçları

4.1.1. Deney 1 (SN-0)

Çalışma kapsamında test edilen SN-0 numunesinde kolon üzerinde aksel yük bulunmadığı durumda test uygulanmıştır. Deneylere başlamadan önce numune yerine yerleştirilmiş ve deney düzeneği hazırlanmıştır (Şekil 4.1). Çevrimsel yükleme altında test edilecek elemanda deneye başlamadan sistemin genel kontrolü sağlanmıştır.



Şekil 4.1 SN-0 numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney sırasında her bir çevrimde kolon üzerinde gözlemlenen çatlaklar işaretlenmiştir. Elemanda meydana gelen hasar durumları belirlenmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 SN-0 numunesinin çatlak analizi

	Çevrim	Dönme (°)	Moment (kNm)	Deney Elemanında Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
1	İtme (+)	0,073	0,479	Deneyin ilk çevriminde herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-0,331	-1,935	
2	İtme (+)	0,179	1,220	
	Çekme (-)	-0,652	-2,888	

	Çevrim	Dönme (°)	Moment (kNm)	Deney Elemanında Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
3	İtme (+)	0,370	2,845	Kolonda ilk çatlaklar kolon alt bölgesinde meydana gelmiştir
	Çekme (-)	-1,073	-4,267	*Çekme yönünde burulma çatlama meydana gelmiştir. Rijitlik azalmıştır. Kolon boyunca çatlaklar meydana gelmiştir. Yoğun olarak kolon alt bölgesinde çatlak oluşmuştur.
4	İtme (+)	1,338	5,341	*İtme yönünde burulma çatlama meydana gelmiştir. Rijitlik azalmıştır. Kolonda ani çatlamlar meydana gelmiştir. Çatlak genişliği 2,0 mm olarak ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-2,334	-7,456	Daha önce oluşan çatlak uzamıştır. Kolon alt bölgesinde çatlak genişlikleri oldukça artmıştır.
5	İtme (+)	2,588	6,891	Kolon alt bölgesinde çatlaklar ayrılmıştır. Kabuk betonu dökülmüştür.
	Çekme (-)	-3,365	-8,923	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
6	İtme (+)	5,365	12,906	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-5,505	-11,708	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
7	İtme (+)	6,557	14,222	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-6,699	-13,189	*Çekme yönünde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
8	İtme (+)	9,281	14,318	*İtme yönünde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Çekirdek kısmındaki betonda hasar meydana gelmiştir. *Deney yüklemesine son verilmiştir.

Kolonda ilk iki çevrimde çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Kolonda meydana gelen ilk çatlak 2,84 kNm moment değerinde meydana gelmiştir (Şekil 4.2). Bu yük değerinde elemanda belirgin bir rijitlik kaybı oluşmamıştır. Meydana gelen ilk çatlaklar kolonun alt ve orta bölgesinde 45° açı ile meydana gelmiştir.



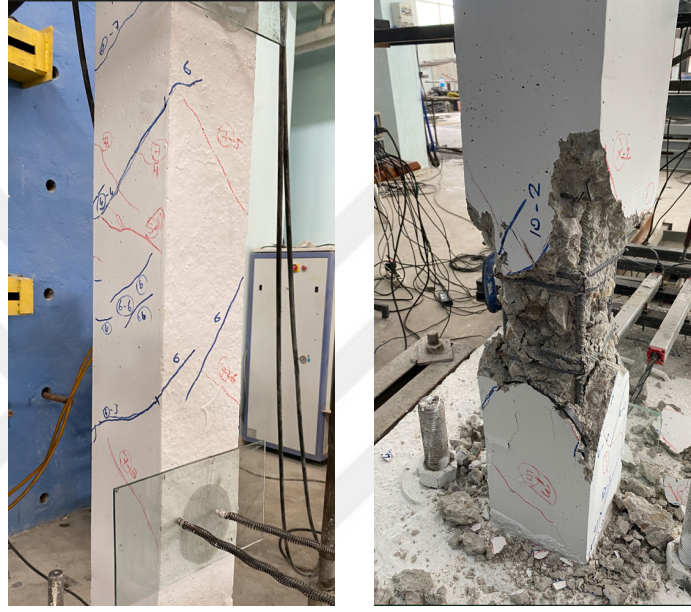
Şekil 4.2 SN-0 numunesinde meydana gelen ilk çatlaklar

Deney elemanı burulma çatlama noktasına itme çevrimlerinde 5,34 kNm moment ve $1,33^\circ$ dönme açısı seviyesinde ulaşırken çekme çevrimlerinde 4,26 kNm moment ve $1,07^\circ$ dönme açısında burulmada çatlama gerçekleşmiştir (Şekil 4.3). Kolonda meydana gelen ilk çatlaklar yoğun olarak kolonun 2 yüzünde ve kenarın orta noktasında meydana gelirken burulma çatlama ile elemanın 4 yüzünde ve sürekli çatlakların oluşumu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.3 SN-0 numunesinin burulma çatlama düzeyinde hasar durumu

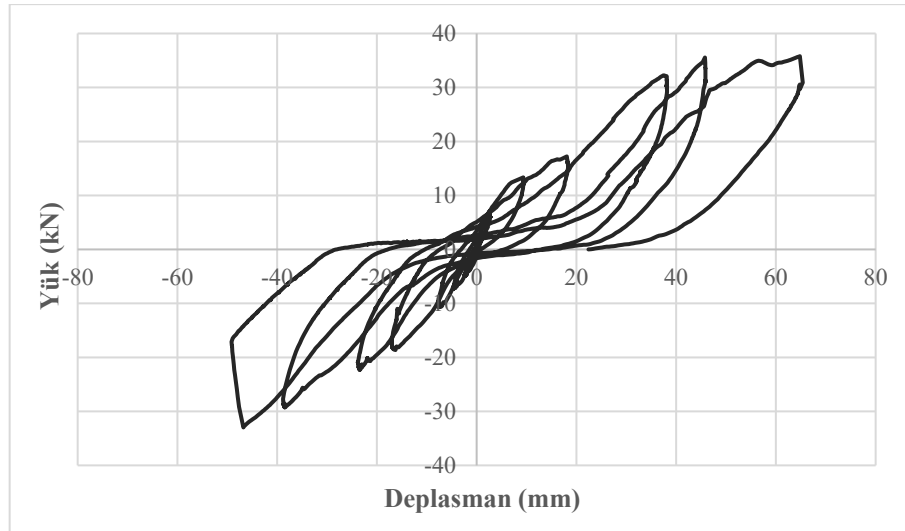
Deney elemanı itme çevrimlerinde 14,31 kNm moment değerinde, çekme çevrimlerinde 13,19 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değerine ulaşılan kadar elemanda itmede 9,28°'lik, çekmede ise 6,69°'lik dönme meydana gelmiştir (Şekil 4.4). Maksimum moment değerinde oluşan çatlaklar incelendiğinde çatlakların tüm kolon boyunca meydana geldiği, hasarın ise alt ve orta bölge arasında kolon ortasına yakın seviyede olduğu görülmüştür.



Şekil 4.4 SN-0 numunesinin maksimum burulma kapasitesinde hasar durumu

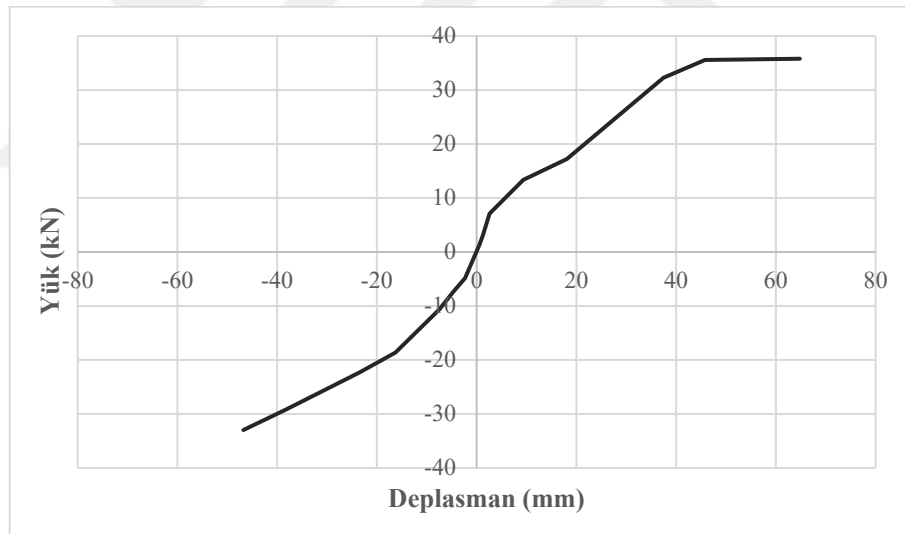
Burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra deney düzeneğinin izin verdiği sınır yükleme durumuna ulaşıldığından ve deney sistemindeki zorlanmaların artması nedeniyle deney sonlandırılmıştır.

Deneyler sırasında eleman üzerine yerleştirilen yük hücresi ve potansiyometrik cetvellerden alınan yük ve deplasman verileri kullanılarak elemanın burulma davranışını belirlemek amacıyla çeşitli grafikler çizilmiştir. Kiriş ucundan okunan deplasman ve kolonda burulma etkisini oluşturan yatay yük grafiği oluşturulmuştur. Yatay yük kolon eksenine 400 mm mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Buna karşılık deplasman verileri kiriş ucundaki ve kolon eksenindeki potansiyometrik cetvellerin farkından oluşmuştur (Şekil 4.5).



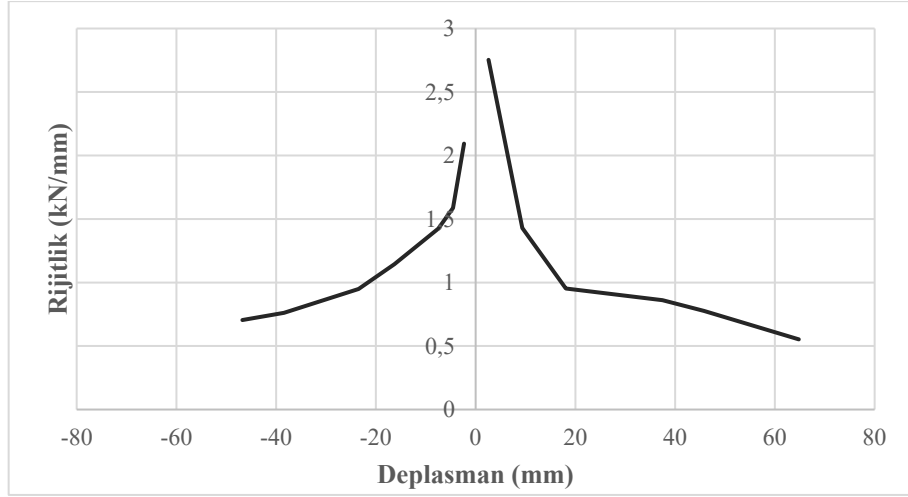
Şekil 4.5 SN-0 numunesinin yük-deplasman grafiği

Her bir çevrimde meydana gelen maksimum yüke karşılık gelen deplasmanın belirlenmesi ile çevrimsel olarak etki eden yükün zarf eğrisi elde edilmiştir (Şekil 4.6).



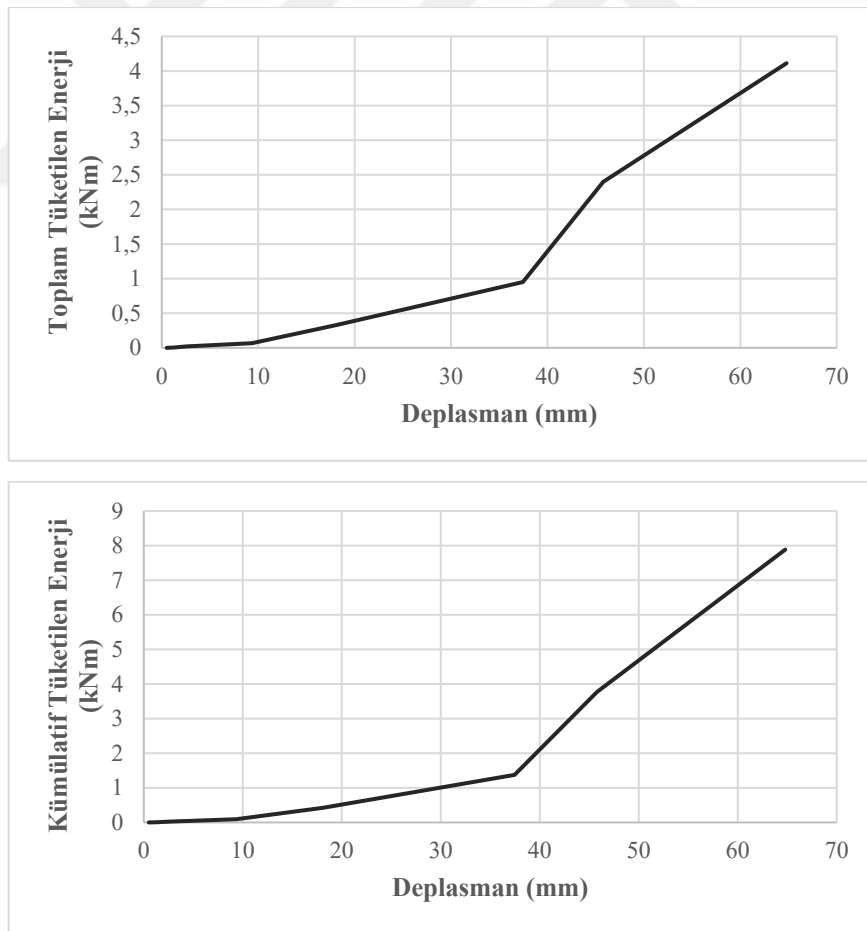
Şekil 4.6 SN-0 numunesinin yük-deplasman zarf eğrisi

Deneylerde her yük çevriminde elde edilen yükün o çevrimde meydana gelen deplasmana oranı belirlenerek rijitlik-deplasman grafikleri elde edilmiştir (Şekil 4.7).



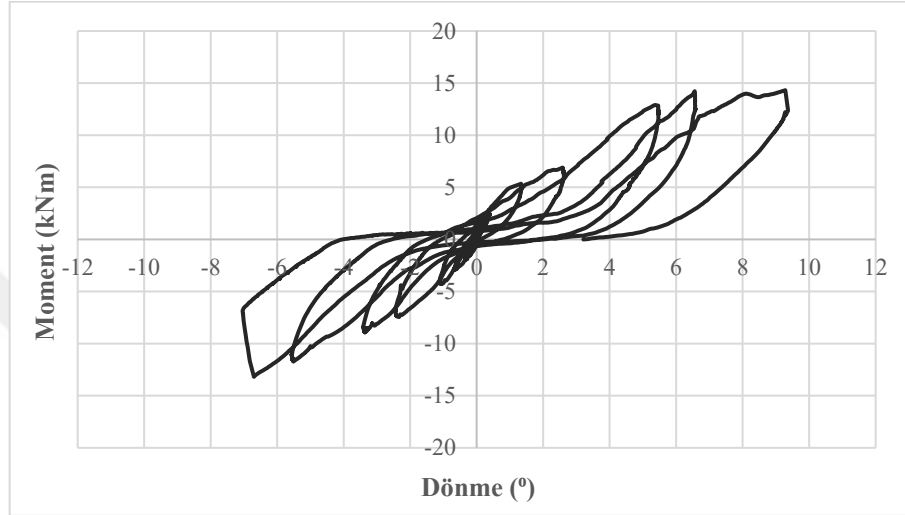
Şekil 4.7 SN-0 numunesinin rijitlik grafiği

Deney numunesinde yük-deplasman eğrisinin altında kalan alanın belirlenmesi ile tüketilen toplam enerji ve tüketilen kümülatif enerji grafiği hazırlanmıştır (Şekil 4.8).



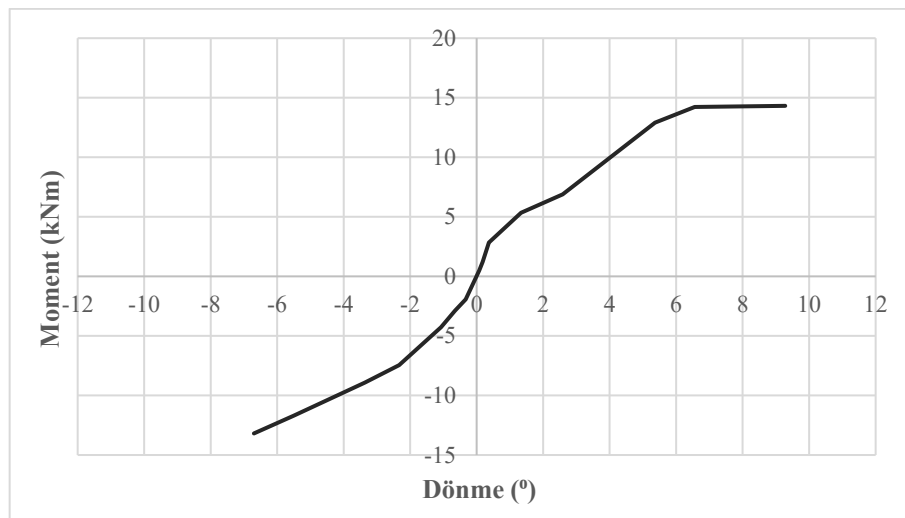
Şekil 4.8 SN-0 numunesinin toplam ve kümülatif tüketilen enerji grafiği

Yataydaki yük hücresi yardımıyla okunan yük değerinin 400 mm'lik moment kolu ile çarpılması sonucunda kolona etki eden moment değerleri belirlenmiştir. Kiriş ucundaki potansiyometrik cetvelden elde edilen deplasmanın kolon ekseninde ölçülen deplasman değerine göre farkı belirlenerek moment kolu mesafesine bölünmesi ile kolonda meydana gelen dönme miktarları belirlenmiştir. Her moment değerine karşılık gelen dönme kullanılarak moment-dönme grafiği elde edilmiştir (Şekil 4.9).



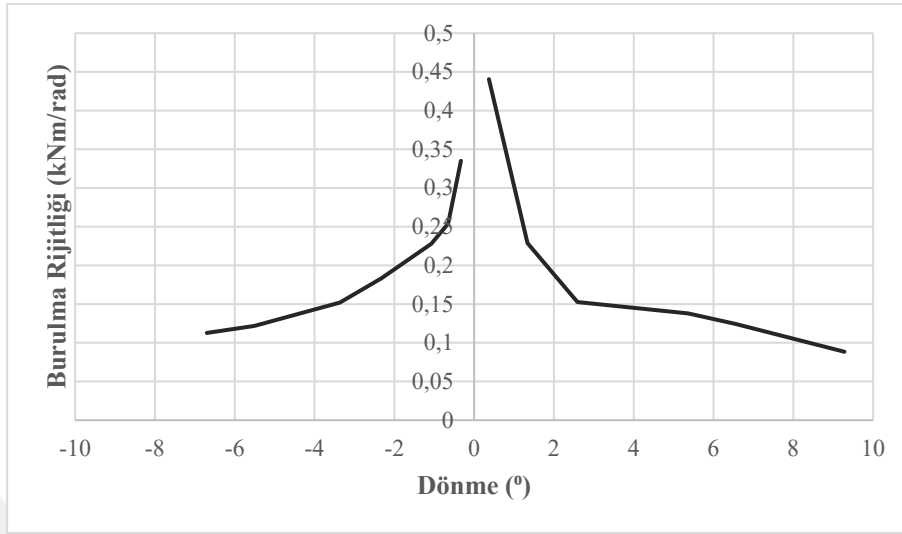
Şekil 4.9 SN-0 numunesinin moment-dönme grafiği

Her bir çevrimde meydana gelen maksimum burulma momentine karşılık gelen dönmenin belirlenmesi ile çevrimsel olarak etki eden burulmanın zarf eğrisi elde edilmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 SN-0 numunesinin moment-dönme zarf eğrisi

Her bir çevrimde okunan maksimum burulma momentinin, elemanda meydana gelen dönmeye bölünmesi ile elemanın burulma rijitliği belirlenmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 SN-0 numunesinin burulma rijitliği grafiği

SN-0 isimli eleman üzerine etki etmediğinden zamana ve dönmeye bağlı eksenel yük değişimi belirlenmemiştir.

Kolonun burulma etkisi altında hesaplanan dönme süneklik faktörü itme çevrimi için 6,97; çekme çevrimi için 6,25 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca kolona etki eden momentin kolonun üst orta ve alt yüksekliklerinde sırasıyla 12; 4,1; 0,3 derecelik dönme meydana geldiği tespit edilmiştir.

4.1.2. Deney 2 (SN-1)

Çalışma kapsamında test edilen SN-1 numunesinde deney başlangıcında kolon üzerinde $N_d=0,05A_{cfck}=18$ kN düzeyinde eksenel yük uygulanmıştır. Deneylere başlamadan önce numune yerine yerleştirilmiş ve deney düzeneği hazırlanmıştır (Şekil 4.12). Çevrimsel yükleme altında test edilecek elemanda deneye başlamadan sistemin genel kontrolü sağlanmıştır.



Şekil 4.12 SN-1 numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney sırasında her bir çevrimde kolon üzerinde gözlemlenen çatlaklar işaretlenmiştir. Elemanda meydana gelen hasar durumları belirlenmiştir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2 SN-1 numunesinin çatlak analizi

	Çevrim	Dönme (°)	Moment (kNm)	Deney Elemanında Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
1	İtme (+)	0,369	3,923	Deneyin ilk çevriminde herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-0,327	-3,765	
2	İtme (+)	0,594	4,986	İtme yönünde ilk çatlaklar oluşmuştur.
	Çekme (-)	-0,750	-5,665	Çekme yönünde ilk çatlaklar oluşmuştur .
3	İtme (+)	0,900	5,774	*İtme yönünde burulma çatlama meydana gelmiştir. Rijitlik azalmıştır. Yeni çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar kolonun orta bölgesinde yoğunlaşmıştır. Bütün kolonda çatlaklar meydana gelmiştir.
	Çekme (-)	-0,922	-5,754	*Çekme yönünde burulma çatlama meydana gelmiştir. Rijitlik azalmıştır. Daha önce oluşan çatlaklar uzamıştır ve dallara ayrılmıştır. Yeni çatlaklar oluşmuştur.
4	İtme (+)	1,178	5,891	Yeni çatlaklar oluşmuştur. Daha önce oluşan çatlaklar uzamıştır.
	Çekme (-)	-1,219	-6,522	Yeni çatlaklar oluşmuştur. Daha önce oluşan çatlaklar uzamıştır.

Çevrim		Dönme (°)	Moment (kNm)	Deney Elemanında Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
5	İtme (+)	1,492	6,433	Yeni çatlaklar oluşmuştur. Daha önce oluşan çatlaklar uzamıştır. En büyük çatlak genişliği 0,3 mm ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-1,592	-7,770	Yeni çatlaklar oluşmuştur. Daha önce oluşan çatlaklar dallanmıştır. En büyük çatlak genişliği 0,3 mm ölçülmüştür.
6	İtme (+)	2,256	7,537	Yeni çatlaklar oluşmuştur. Daha önce oluşan bazı çatlaklar dallanmış bazıları uzamıştır. En büyük çatlak genişliği 0,8 mm ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-2,252	-8,463	Yeni çatlaklar oluşmuştur. Daha önce oluşan bazı çatlaklar dallanmış bazıları uzamıştır. En büyük çatlak genişliği 0,8 mm ölçülmüştür.
7	İtme (+)	2,904	7,859	Çatlaklar uzayıp tüm kenarlarda devam edecek şekilde ve kolon boyunca oluşmuştur. En büyük çatlak genişliği 1,1 mm ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-3,012	-10,493	Çatlaklar uzamaya ve dallanmaya devam etmiştir.
8	İtme (+)	3,591	8,744	Kolon orta bölgesindeki çatlaklarda ayrılma meydana gelmeye başlamıştır. Çatlak genişliği 1,7 mm ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-3,677	-11,556	Daha önce oluşan çatlaklar dallanmaya devam etmiştir. Kabuk betonu dökülmüştür.
9	İtme (+)	4,282	9,917	Daha önce oluşan çatlaklar dallanmaya devam etmiştir. Kabuk betonu dökülmeye devam etmiştir.
	Çekme (-)	-4,356	-11,974	Kabuk betonu dökülmeye devam etmiştir.
10	İtme (+)	5,076	11,611	Kabuk betonu dökülmeye devam etmiştir.
	Çekme (-)	-5,104	-12,639	Etriyelerde açılma gözlemlenmiştir.
11	İtme (+)	5,904	13,304	Kabuk betonu tüm kenarlarda dökülmüştür.
	Çekme (-)	-5,861	-13,435	*Çekme yönünde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Kabuk betonu dökülmeye devam etmiştir. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
12	İtme (+)	6,536	14,025	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-6,556	-12,927	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
13	İtme (+)	7,322	14,134	Donatıda eğilme gözlemlenmiştir.
	Çekme (-)	-7,206	-12,790	Çekirdek betonunda çatlaklar oluşmuştur.
14	İtme (+)	7,954	14,608	*İtme yönünde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Çekirdek kısmındaki betonda hasar meydana gelmiştir.
	Çekme (-)	-8,002	-12,399	Çekirdek betonunda çatlaklar oluşmuştur.

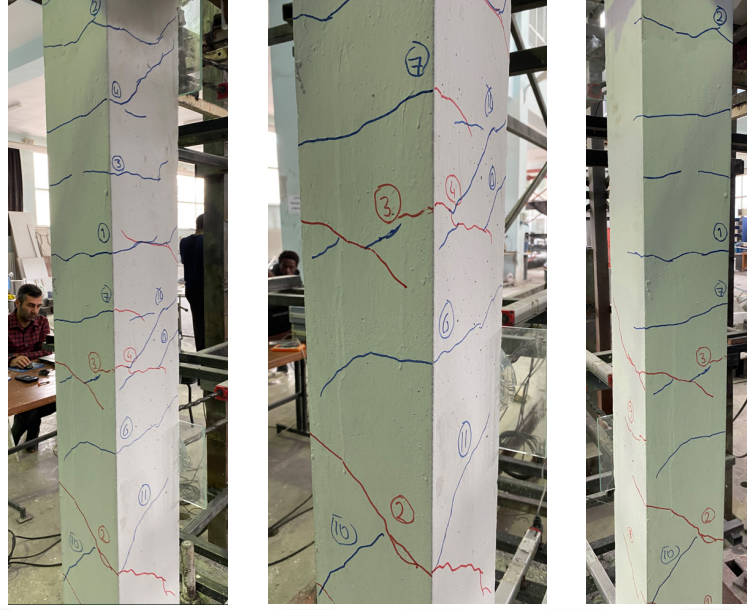
Çevrim		Dönme (°)	Moment (kNm)	Deney Elemanında Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
15	İtme (+)	8,713	13,737	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
	Çekme (-)	-9,051	-11,960	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
16	İtme (+)	9,343	13,359	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
	Çekme (-)	-9,437	-9,978	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
17	İtme (+)	10,077	12,776	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir. Kabuk betonu dökülmesi yayılmıştır.
	Çekme (-)	-10,150	-8,566	*Deney yüklemesine son verilmiştir.

Kolonda ilk çevrimde çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Kolonda meydana gelen ilk çatlaklar, itme yönünde 4,99 kNm moment değerinde, çekme yönünde ise 5,66 kNm moment değerinde meydana gelmiştir (Şekil 4.13). Bu moment değerinde elemenda belirgin bir rijitlik kaybı oluşmamıştır.



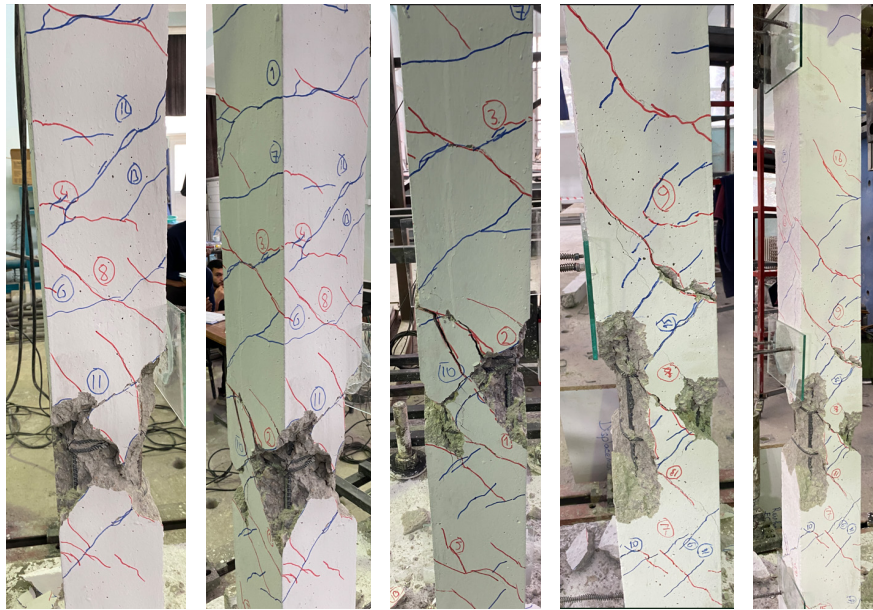
Şekil 4.13 SN-1 numunesinde meydana gelen ilk çatlaklar

Deney elemanı burulma çatlama noktasına itme çevrimlerinde 5,77 kNm moment ve 0,90° dönme açısı seviyesinde ulaşırken çekme çevrimlerinde 5,75 kNm moment ve 0,92° dönme açısında burulmada çatlama gerçekleşmiştir (Şekil 4.14). Kolonda meydana gelen ilk çatlaklar yoğun olarak kolonun 2 yüzünde ve kenarın orta noktasında meydana gelirken burulma çatlama sonrasında çatlakların ilerlemesi ile elemanın 4 yüzünde ve sürekli çatlakların oluşumu gözlemlenmiştir.



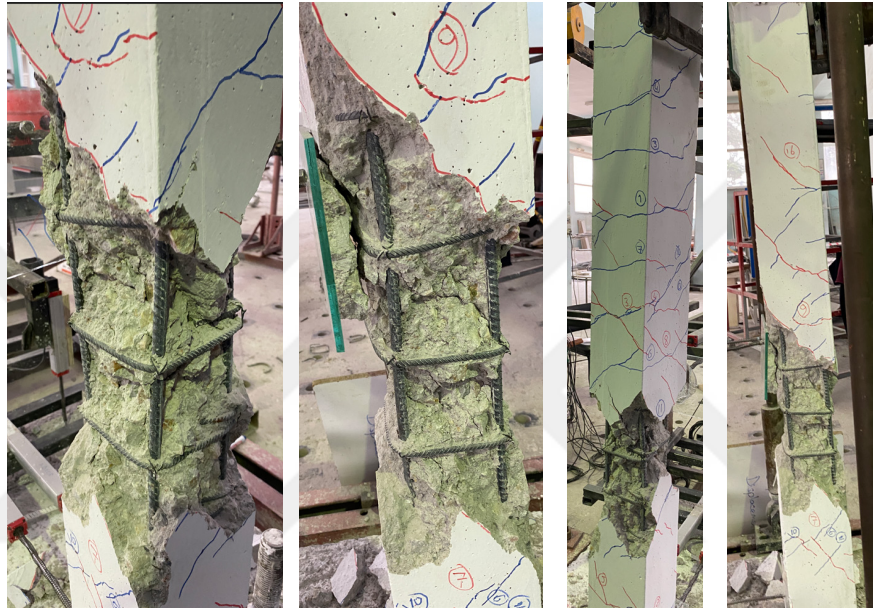
Şekil 4.14 SN-1 numunesinin burulma çatlaması düzeyinde hasar durumu

Deney elemanı itme çevrimlerinde 14,61 kNm moment değerinde, çekme çevrimlerinde 13,43 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değerine ulaşılan kadar elemanda itmede 7,95°'lik, çekmede ise 5,86°'lik dönme meydana gelmiştir (Şekil 4.15). Moment taşıma kapasitesinde meydana gelen çatlaklar incelendiğinde kolon boyunca çatlakların oluştuğu hasarın ise kolon orta bölgesinde meydana geldiği görülmüştür.



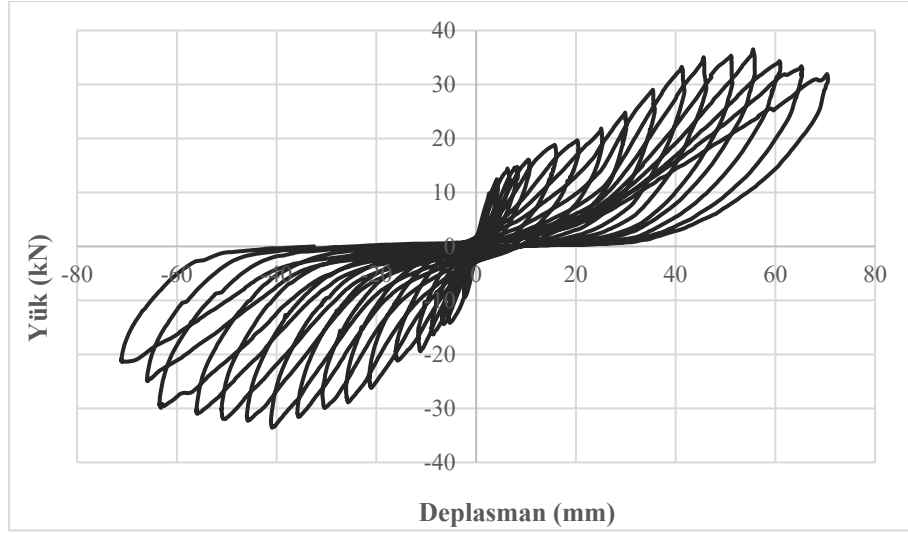
Şekil 4.15 SN-1 numunesinin maksimum burulma kapasitesinde hasar durumu

Burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra moment değeri kapasitenin %20'si oranında azaldığı noktaya kadar deney devam ettirilmiştir. Deney düzeneğinin izin verdiği sınır yükleme durumuna ulaşıldığından deney sonlandırılmıştır. Burulma taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra kolonun burulma taşıma gücü azalmış ancak kolonda bir miktar daha dönme meydana gelmiştir. Nihai durumda elemanda itme çevriminde 12,78 kNm moment ve 10,08° dönme meydana gelirken, çekmede 8,57 kNm moment etkisi ve 10,15° dönme etkisi oluşmuştur (Şekil 4.16).



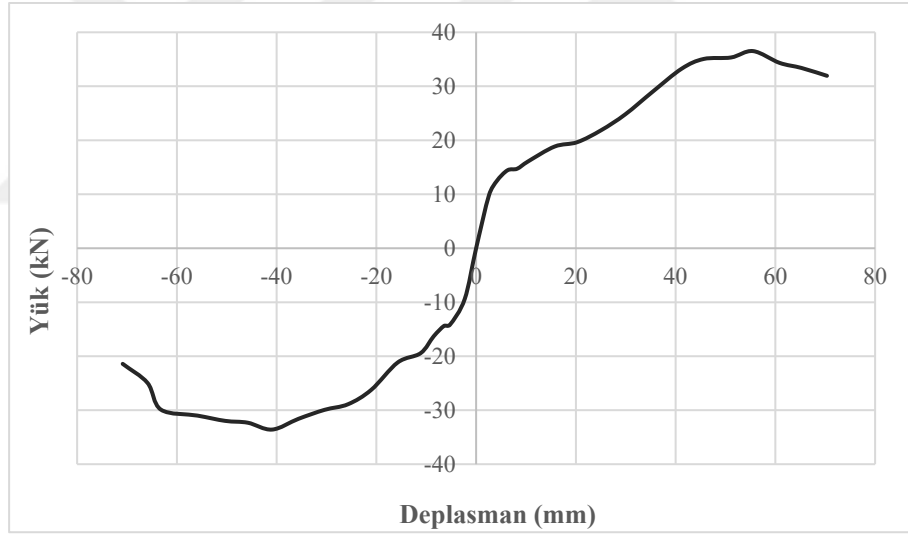
Şekil 4.16 SN-1 numunesinin nihai durumda hasar durumu

Deneyler sırasında eleman üzerine yerleştirilen yük hücresi ve potansiyometrik cetvellerden alınan yük ve deplasman verileri kullanılarak elemanın burulma davranışını belirlemek amacıyla çeşitli grafikler çizilmiştir. Yatay yük, kolon eksenine 400 mm mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Buna karşılık deplasman verileri kiriş ucundaki ve kolon eksenindeki potansiyometrik cetvellerin farkından oluşmuştur (Şekil 4.17).



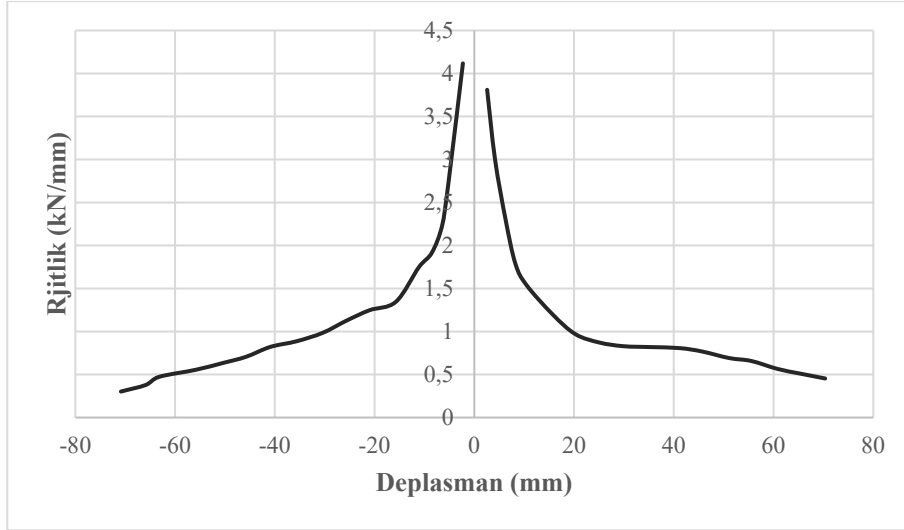
Şekil 4.17 SN-1 numunesinin yük-deplasman grafiği

Her bir çevrimde meydana gelen maksimum yüke karşılık gelen deplasmanın belirlenmesi ile çevrimsel olarak etki eden yükün zarf eğrisi elde edilmiştir (Şekil 4.18).



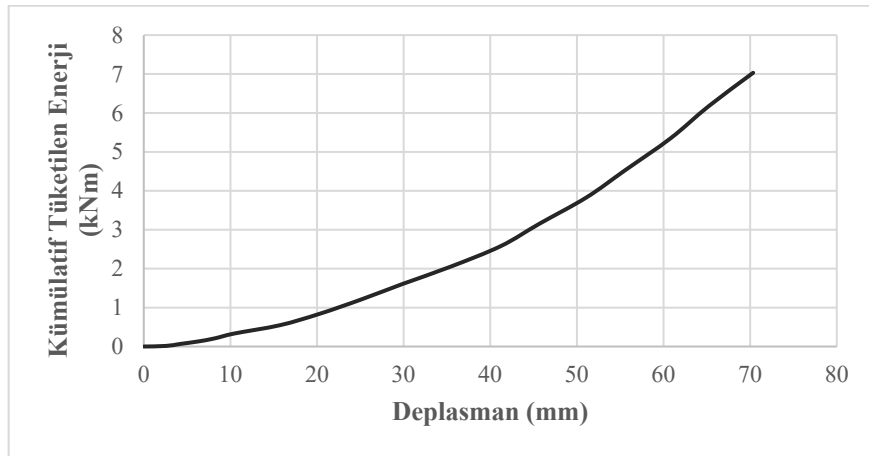
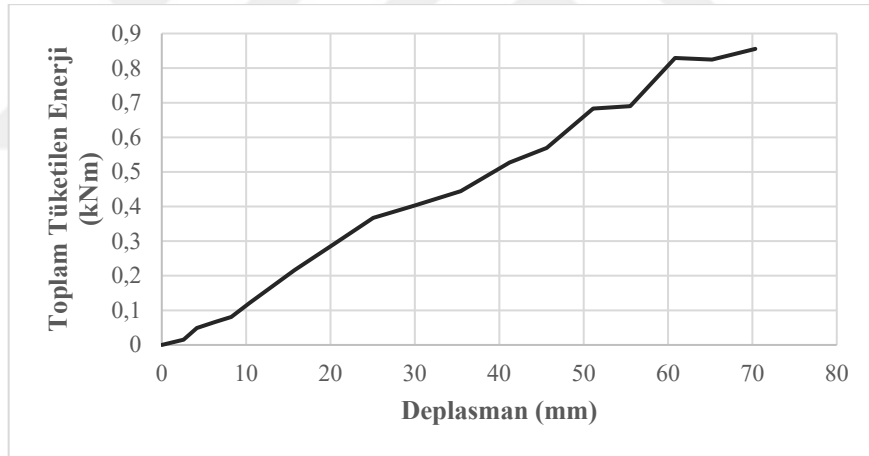
Şekil 4.18 SN-1 numunesinin yük-deplasman zarf eğrisi

Deneylerde her yük çevriminde elde edilen yükün o çevrimde meydana gelen deplasmana oranı belirlenerek rijitlik-deplasman grafikleri elde edilmiştir (Şekil 4.19).



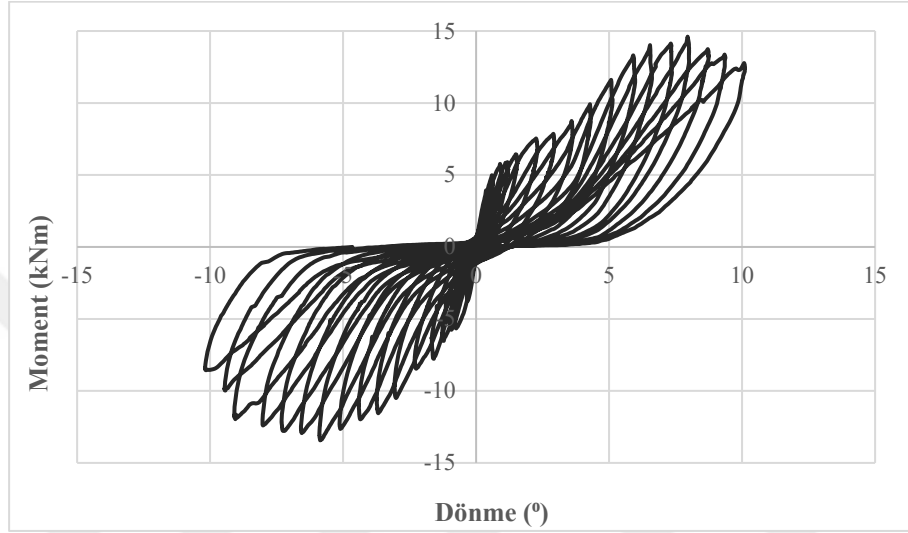
Şekil 4.19 SN-1 numunesinin rijitlik grafiği

Deney numunesinde yük-deplasman eğrisinin altında kalan alanın belirlenmesi ile tüketilen toplam enerji ve tüketilen kümülatif enerji grafiği hazırlanmıştır (Şekil 4.20).



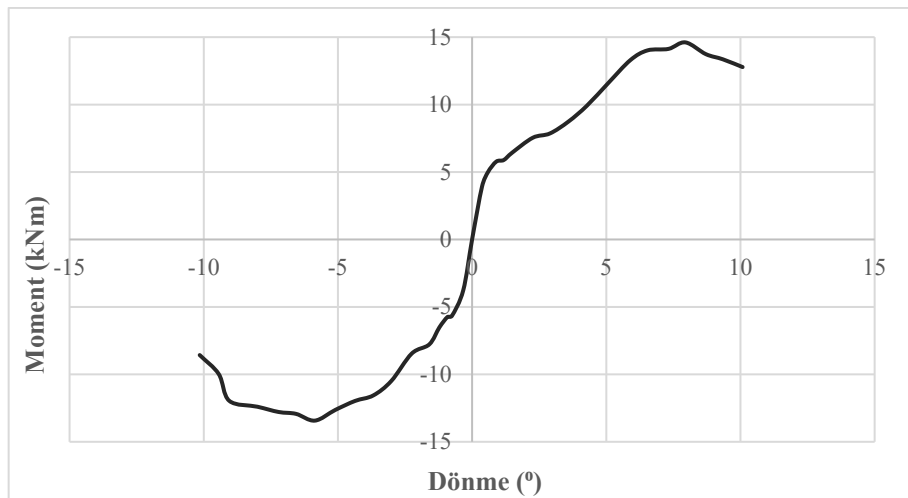
Şekil 4.20 SN-1 numunesinin toplam ve kümülatif tüketilen enerji grafiği

Yataydaki yük hücresi yardımıyla okunan yük değerinin 400 mm'lik moment kolu ile çarpılması sonucunda kolona etki eden moment değerleri belirlenmiştir. Kiriş ucundaki potansiyometrik cetvelden elde edilen deplasmanın kolon ekseninde ölçülen deplasman değerine göre farkı belirlenerek moment kolu mesafesine bölünmesi ile kolonda meydana gelen dönme miktarları belirlenmiştir. Her moment değerine karşılık gelen dönme kullanılarak moment-dönme grafiği elde edilmiştir (Şekil 4.21).



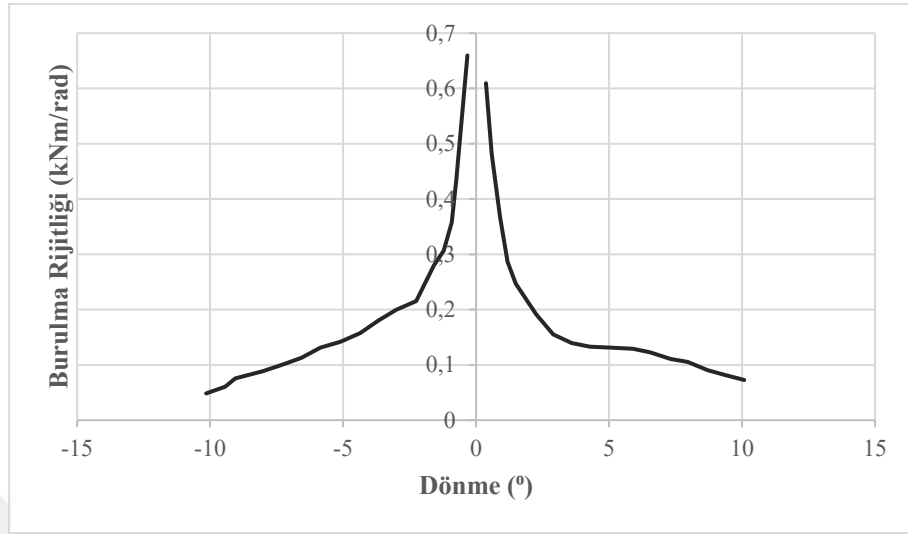
Şekil 4.21 SN-1 numunesinin moment-dönme grafiği

Her bir çevrimde meydana gelen maksimum burulma momentine karşılık gelen dönmenin belirlenmesi ile çevrimsel olarak etki eden burulmanın zarf eğrisi elde edilmiştir (Şekil 4.22).



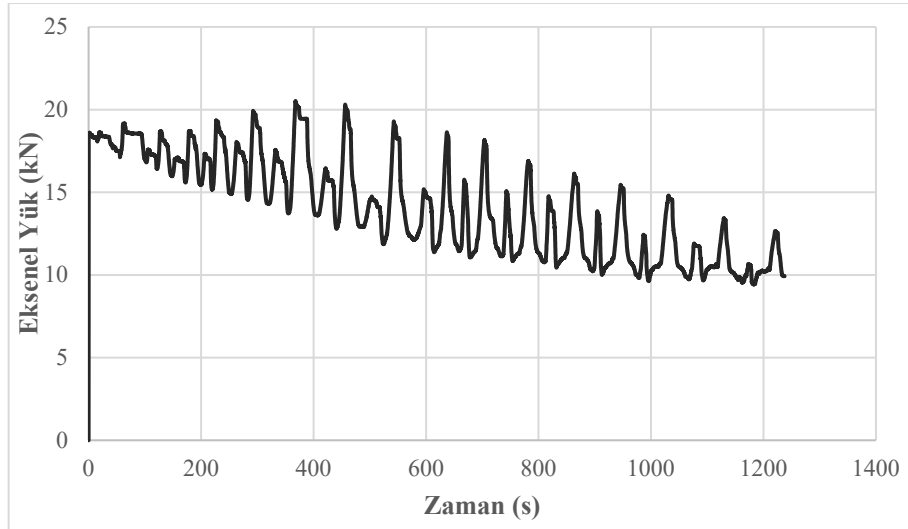
Şekil 4.22 SN-1 numunesinin moment-dönme zarf eğrisi

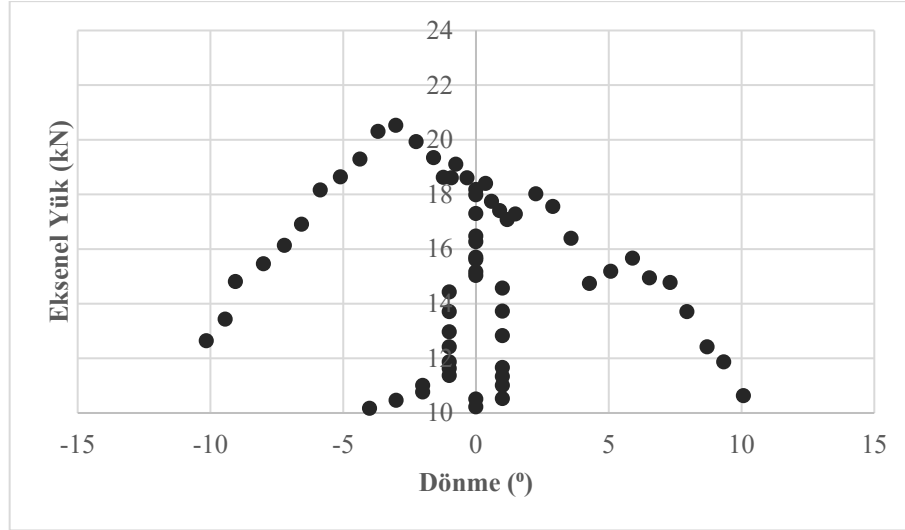
Her bir çevrimde okunan maksimum burulma momentinin, elemanda meydana gelen dönmeye bölünmesi ile elemanın burulma rijitliği belirlenmiştir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23 SN-1 numunesinin burulma rijitliği grafiği

Eleman üzerine etki eden aksel yük değerinin zamana ve dönmeye bağlı değişimi belirlenerek aksel yük-zaman grafiği ve aksel yük dönme grafiği çizilmiştir (Şekil 4.24).



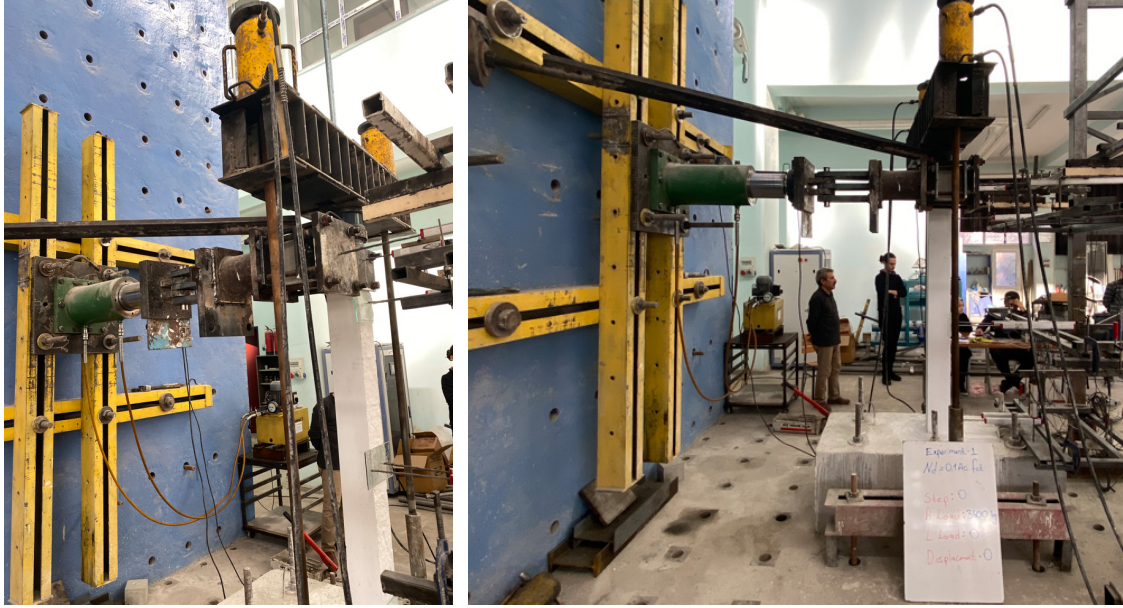


Şekil 4.24 SN-1 numunesinin eksenel yük-zaman ve eksenel yük dönme grafiği

Kolonun burulma etkisi altında hesaplanan dönme süneklik faktörü itme çevrimi için 11,2 Çekme çevrimi için 11,03 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca kolona etki eden momentin kolonun üst orta ve alt yüksekliklerinde sırasıyla 9,60; 12,60; 0,56 derecelik dönme meydana geldiği tespit edilmiştir.

4.1.3. Deney 3 (SN-2)

Çalışma kapsamında test edilen SN-2 numunesinde deney başlangıcında kolon üzerinde $N_d=0,10A_{cfck}=36$ kN düzeyinde eksenel yük uygulanmıştır. Deneylere başlamadan önce numune yerine yerleştirilmiş ve deney düzeneği hazırlanmıştır (Şekil 4.25). Çevrimsel yükleme altında test edilecek elemanda deneye başlamadan sistemin genel kontrolü sağlanmıştır.



Şekil 4.25 SN-2 numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney sırasında her bir çevrimde kolon üzerinde gözlemlenen çatlaklar işaretlenmiştir. Elemanda meydana gelen hasar durumları belirlenmiştir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3 SN-2 numunesinin çatlak analizi

	Çevrim	Dönme (°)	Moment (kNm)	Deney Elemanında Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
1	İtme (+)	0,303	2,627	Deneyin ilk çevriminde herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-0,522	-3,436	
2	İtme (+)	0,719	4,519	Herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-0,882	-3,984	Kolon orta bölgesinde 2 kenar boyunca 45 derecelik açı ile uzanan çatlaklar oluşmuştur.
3	İtme (+)	1,252	5,253	*İtme yönünde burulma çatlama meydana gelmiştir. Rijitlik azalmıştır. Çok küçük çatlaklar görülmüştür.
	Çekme (-)	-1,405	-4,492	*Çekme yönünde burulma çatlama meydana gelmiştir. Rijitlik azalmıştır. Daha önce oluşan çatlaklar diğer kenarlara doğru uzamıştır ve dallara ayrılmıştır.
4	İtme (+)	1,451	5,089	Kolon orta bölgesi yakınında yeni çatlaklar oluşmuştur.
	Çekme (-)	-1,609	-4,101	Daha önce oluşan çatlaklar uzamıştır ve dallara ayrılmıştır. En geniş çatlak genişliği 0,6 mm ölçülmüştür.

	Çevrim	Dönme (°)	Moment (kNm)	Deney Elemanında Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
5	İtme (+)	2,374	6,515	Yeni bir çatlak oluşmuştur. Daha önce oluşan çatlaklar ilerlemiştir.
	Çekme (-)	-2,229	-4,581	Yeni bir çatlak oluşmuştur. Daha önce oluşan çatlaklar ilerlemiştir. Çatlaklarda genişleme gözlemlenmemiştir.
6	İtme (+)	3,042	6,995	Yeni çatlaklar oluşmuştur. Daha önce oluşan çatlaklar uzamış ve dallanmıştır. En geniş çatlağın genişliği 1,3 mm ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-3,168	-5,102	Yeni çatlaklar oluşmuştur. Daha önce oluşan çatlaklar uzamış ve dallanmıştır.
7	İtme (+)	3,673	7,461	Kolon orta kısmında kabuk betonda ayrılma görülmüştür. En geniş çatlak 2,1 mm olarak ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-3,659	-6,563	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir. Oluşan ilk çatlak 3,4 mm ölçülmüştür.
8	İtme (+)	4,384	8,010	Çekirdek betonunda çatlak oluşumu gözlemlenmiştir.
	Çekme (-)	-4,329	-7,345	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir.
9	İtme (+)	5,111	8,401	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir.
	Çekme (-)	-5,112	-7,962	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir.
10	İtme (+)	5,821	8,902	Çekirdek betonunda çatlakların genişlediği gözlemlenmiştir.
	Çekme (-)	-5,890	-8,422	*Çekme yönünde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşılmıştır.
11	İtme (+)	6,608	9,382	*İtme yönünde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Çekirdek kısmındaki betonda hasar meydana gelmiştir.
	Çekme (-)	-7,012	-8,175	Boyuna donatılarda dönme meydana gelmiştir. Etriyeler açılmaya başlamıştır.
12	İtme (+)	7,246	9,101	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
	Çekme (-)	-7,186	-7,297	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
13	İtme (+)	7,952	8,977	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
	Çekme (-)	-8,040	-7,708	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
14	İtme (+)	8,550	8,024	*Deney yüklemesine son verilmiştir.

Kolonda ilk çevrimde çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Kolonda meydana gelen ilk çatlaklar orta bölgede çekme yönünde ve 3,98 kNm moment değerinde meydana gelmiştir (Şekil 4.26). Bu yük değerinde elemanda belirgin bir rijitlik kaybı oluşmamıştır.



Şekil 4.26 SN-2 numunesinde meydana gelen ilk çatlaklar

Deney elemanı burulma çatlama noktasına itme çevrimlerinde 5,25 kNm moment ve $1,25^\circ$ dönme açısı seviyesinde ulaşırken çekme çevrimlerinde 4,49 kNm moment ve $1,41^\circ$ dönme açısında burulmada çatlama gerçekleşmiştir (Şekil 4.27). Kolonda meydana gelen ilk çatlaklar yoğun olarak kolonun 2 yüzünde ve kenarın orta noktasında meydana gelirken burulma çatlama ile elemanın 4 yüzünde ve sürekli çatlakların oluşumu gözlemlenmiştir.



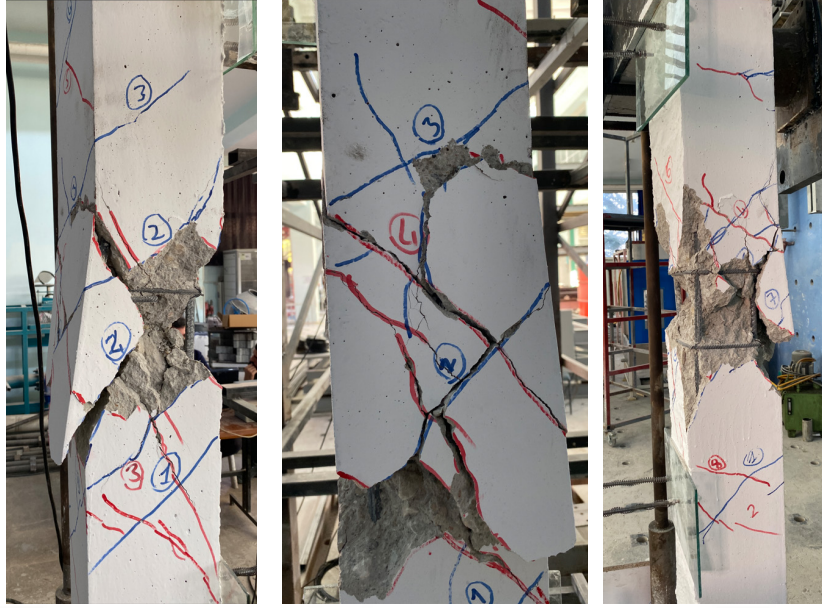
Şekil 4.27 SN-2 numunesinin burulma çatlama düzeyinde hasar durumu

Deney elemanı itme çevrimlerinde 9,38 kNm moment değerinde, çekme çevrimlerinde 8,42 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değerine ulaşılan kadar elemanda itmede 6,6°'lik, çekmede ise 5,89°'lik dönme meydana gelmiştir (Şekil 4.28). Moment taşıma kapasitesinde meydana gelen çatlaklar incelendiğinde yoğunlukla kolon orta bölgesinde çatlakların oluştuğu hasarın bu bölgede meydana geldiği görülmüştür.



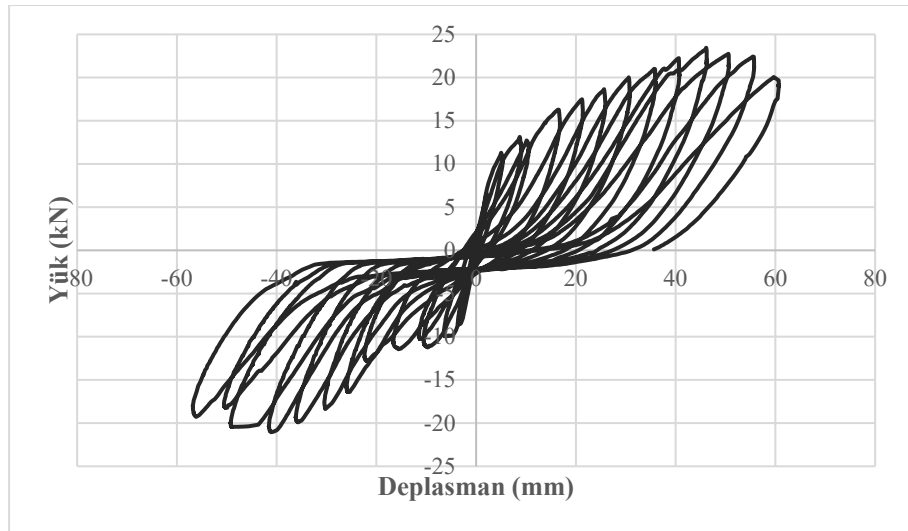
Şekil 4.28 SN-2 numunesinin maksimum burulma kapasitesinde hasar durumu

Burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra moment değeri kapasitenin %20'si oranında azaldığı noktaya kadar deney devam ettirilmiştir. Deney sistemindeki zorlanmaların artması nedeniyle deney sonlandırılmıştır. Burulma taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra kolonun burulma taşıma gücü azalmış ancak kolonda bir miktar daha dönme meydana gelmiştir. Nihai durumda elemanda itme çevriminde 8,02 kNm moment ve 8,54° dönme meydana gelirken, çekmede 7,70 kNm moment etkisi ve 8,04° dönme etkisi oluşmuştur (Şekil 4.29).



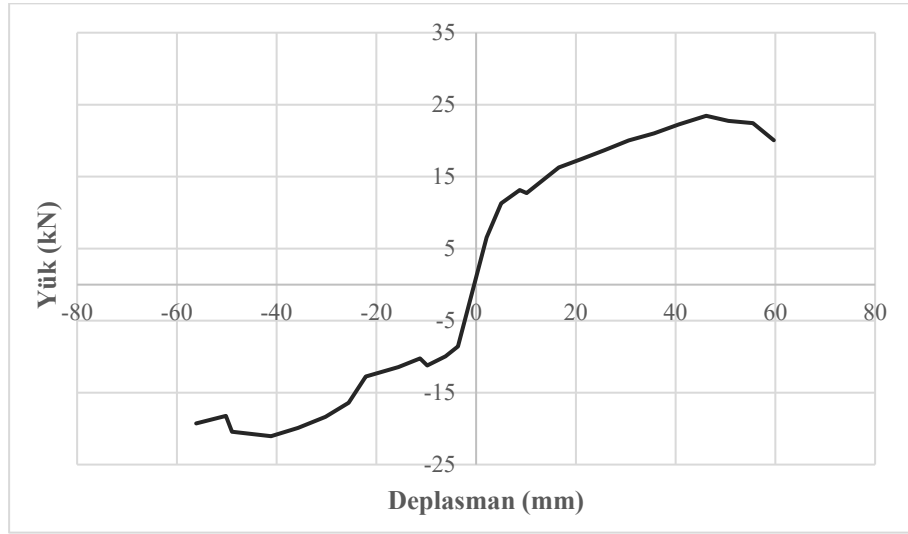
Şekil 4.29 SN-2 numunesinin nihai durumda hasar durumu

Deneyler sırasında eleman üzerine yerleştirilen yük hücresi ve potansiyometrik cetvellerden alınan yük ve deplasman verileri kullanılarak elemanın burulma davranışını belirlemek amacıyla çeşitli grafikler çizilmiştir. Yatay yük kolon eksenine 400 mm mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Buna karşılık deplasman verileri kiriş ucundaki ve kolon eksenindeki potansiyometrik cetvellerin farkından oluşmuştur (Şekil 4.30).



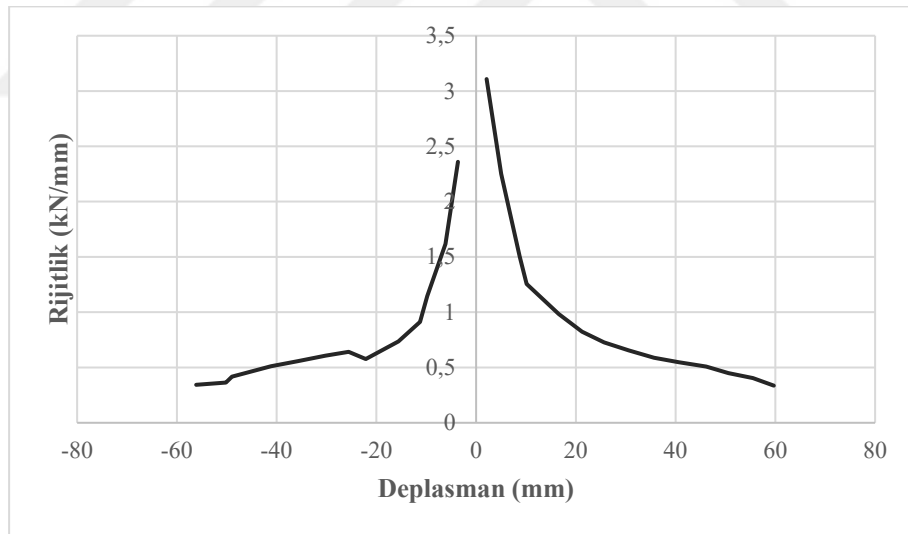
Şekil 4.30 SN-2 numunesinin yük-deplasman grafiği

Her bir çevrimde meydana gelen maksimum yüke karşılık gelen deplasmanın belirlenmesi ile çevrimsel olarak etki eden yükün zarf eğrisi elde edilmiştir (Şekil 4.31).



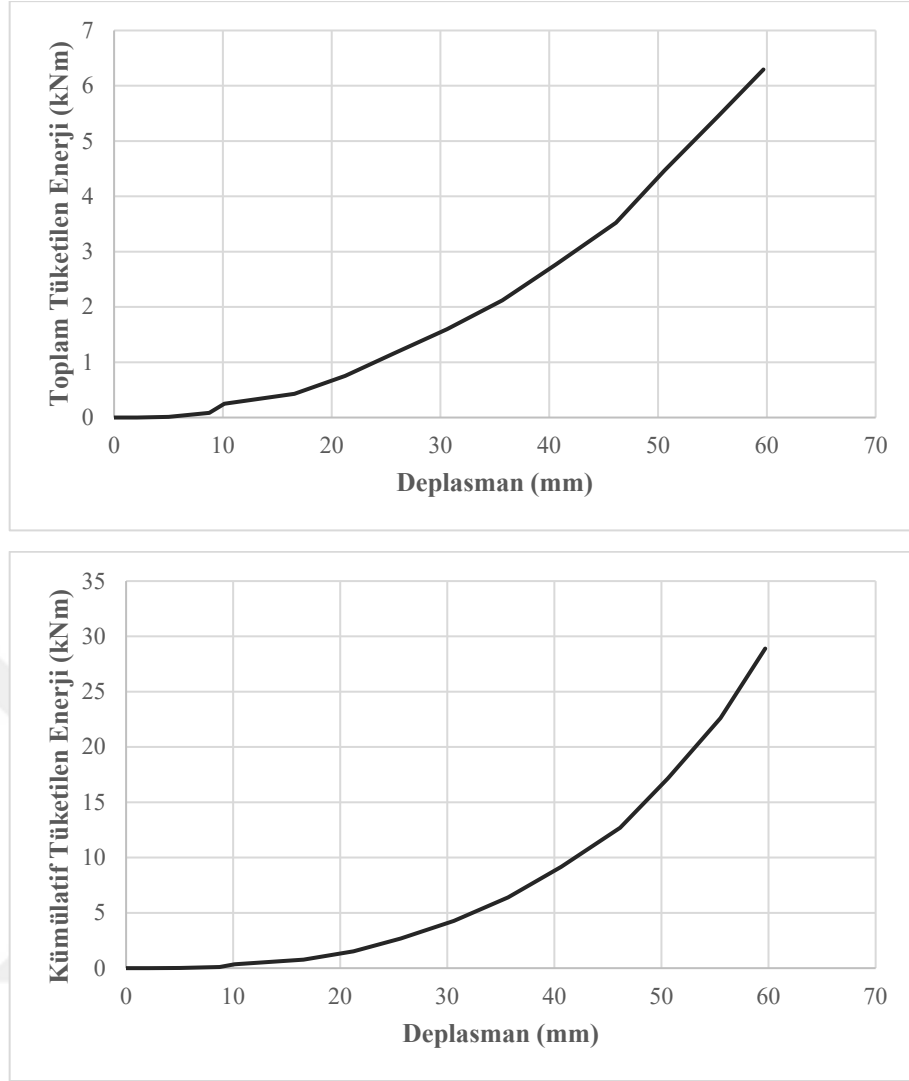
Şekil 4.31 SN-2 numunesinin yük-deplasman zarf eğrisi

Deneylerde her yük çevriminde elde edilen yükün o çevrimde meydana gelen deplasmana oranı belirlenerek rijitlik-deplasman grafikleri elde edilmiştir (Şekil 4.32).



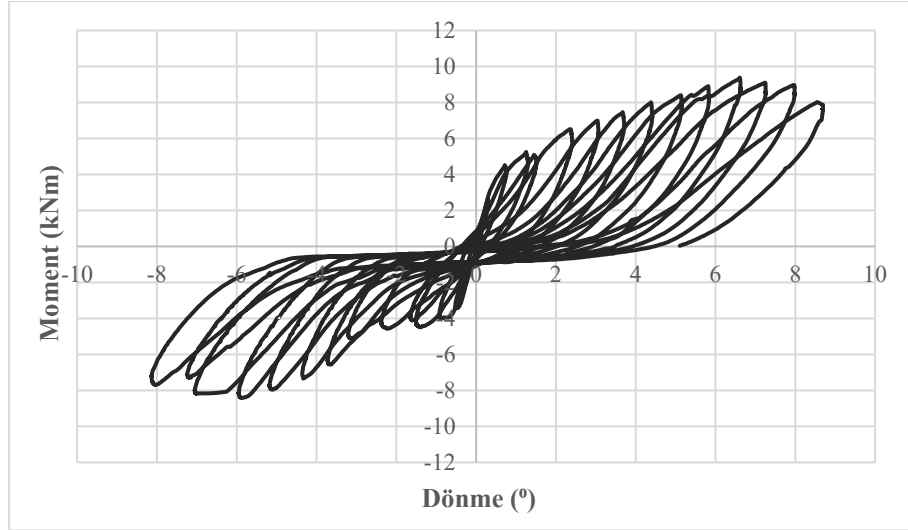
Şekil 4.32 SN-2 numunesinin rijitlik grafiği

Deney numunesinde yük-deplasman eğrisinin altında kalan alanın belirlenmesi ile tüketilen toplam enerji ve tüketilen kümülatif enerji grafiği hazırlanmıştır (Şekil 4.33)



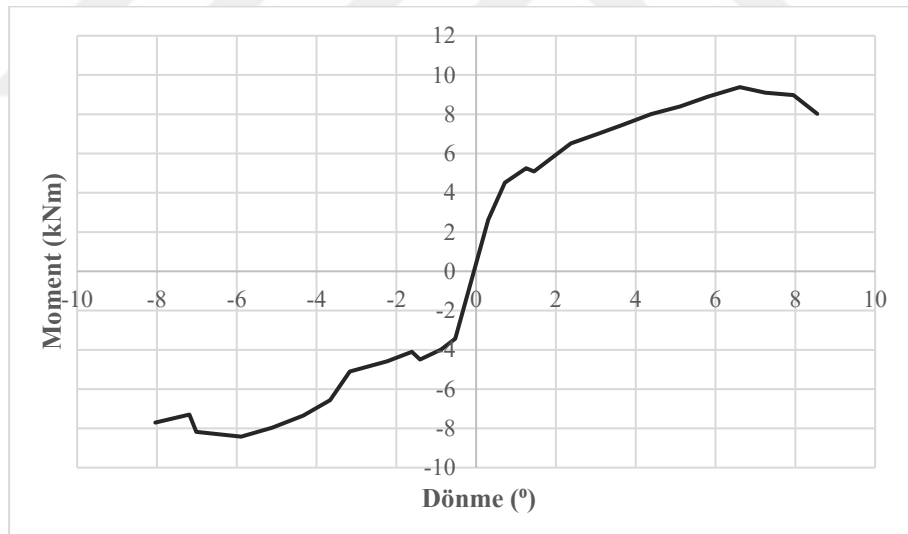
Şekil 4.33 SN-2 numunesinin toplam ve kümülatif tüketilen enerji grafiği

Yataydaki yük hücresi yardımıyla okunan yük değerinin 400 mm'lik moment kolu ile çarpılması sonucunda kolona etki eden moment değerleri belirlenmiştir. Kiriş ucundaki potansiyometrik cetvelden elde edilen deplasmanın kolon ekseninde ölçülen deplasman değerine göre farkı belirlenerek moment kolu mesafesine bölünmesi ile kolonda meydana gelen dönme miktarları belirlenmiştir. Her moment değerine karşılık gelen dönme kullanılarak moment-dönme grafiği elde edilmiştir (Şekil 4.34).



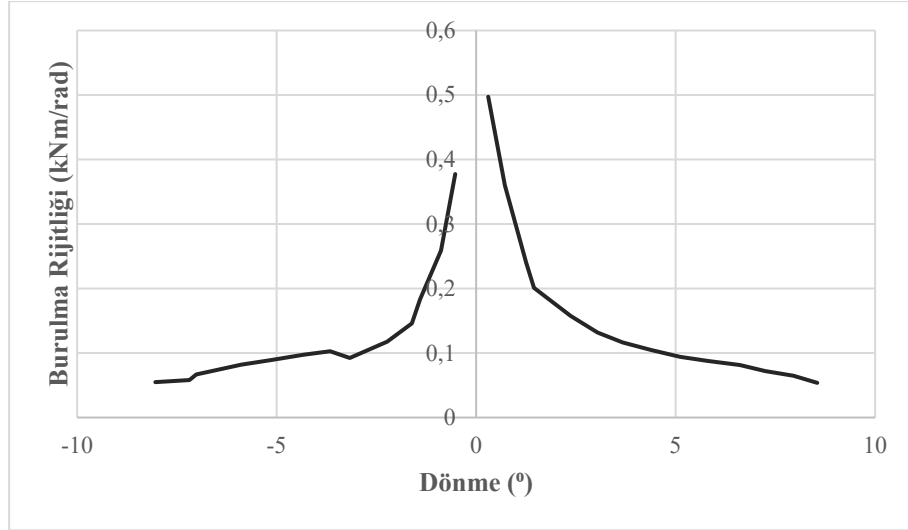
Şekil 4.34 SN-2 numunesinin moment-dönme grafiği

Her bir çevrimde meydana gelen maksimum burulma momentine karşılık gelen dönmenin belirlenmesi ile çevrimsel olarak etki eden burulmanın zarf eğrisi elde edilmiştir (Şekil 4.35).



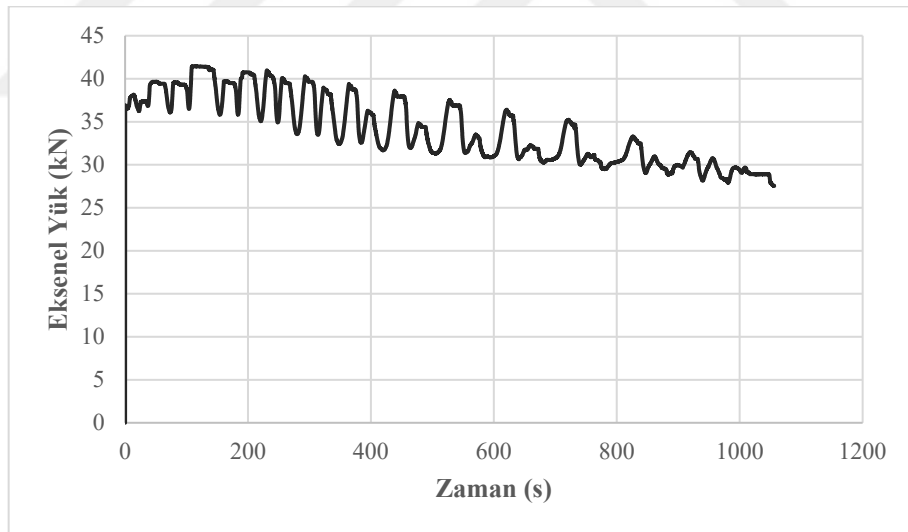
Şekil 4.35 SN-2 numunesinin moment-dönme zarf eğrisi

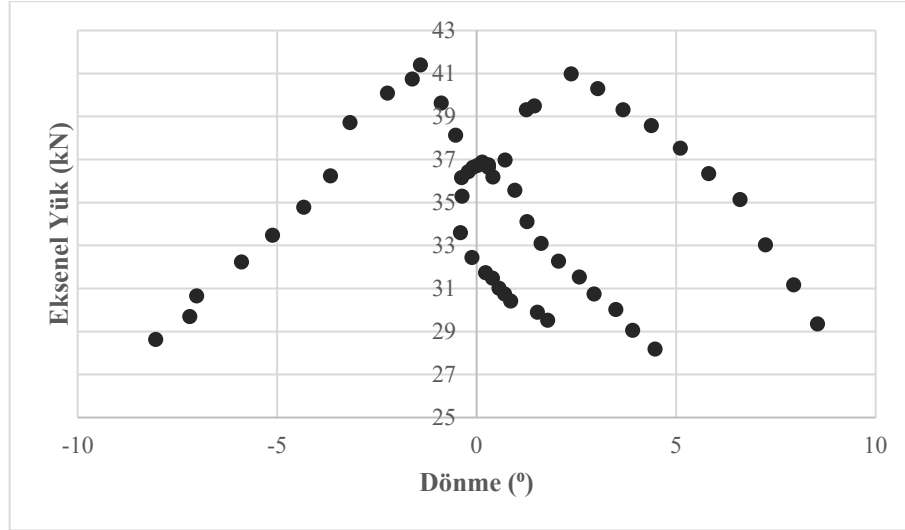
Her bir çevrimde okunan maksimum burulma momentinin, elemanda meydana gelen dönme bölünmesi ile elemanın burulma rijitliği belirlenmiştir (Şekil 4.36).



Şekil 4.36 SN-2 numunesinin burulma rijitliği grafiği

Eleman üzerine etki eden eksenel yük değerinin zamana ve dönmeye bağlı değişimi belirlenerek eksenel yük-zaman grafiği ve eksenel yük dönme grafiği çizilmiştir (Şekil 4.37).





Şekil 4.37 SN-2 numunesinin eksenel yük-zaman ve eksenel yük-dönme grafiği

Kolonun burulma etkisi altında hesaplanan dönme süneklik faktörü itme çevrimi için 6,84 Çekme çevrimi için 5,70 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca kolona etki eden momentin kolonun üst orta ve alt yüksekliklerinde sırasıyla 5,35; 0,38; 0,14 derecelik dönme meydana geldiği tespit edilmiştir.

4.1.4. Deney 4 (SN-3)

Çalışma kapsamında test edilen SN-3 numunesinde deney başlangıcında kolon üzerinde $N_d=0,15A_{cfck}=54$ kN düzeyinde eksenel yük uygulanmıştır. Deneylere başlamadan önce numune yerine yerleştirilmiş ve deney düzeneği hazırlanmıştır (Şekil 4.38). Çevrimsel yükleme altında test edilecek elemanda deneye başlamadan sistemin genel kontrolü sağlanmıştır.



Şekil 4.38 SN-3 numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney sırasında her bir çevrimde kolon üzerinde gözlemlenen çatlaklar işaretlenmiştir. Elemanda meydana gelen hasar durumları belirlenmiştir (Çizelge 4.4).

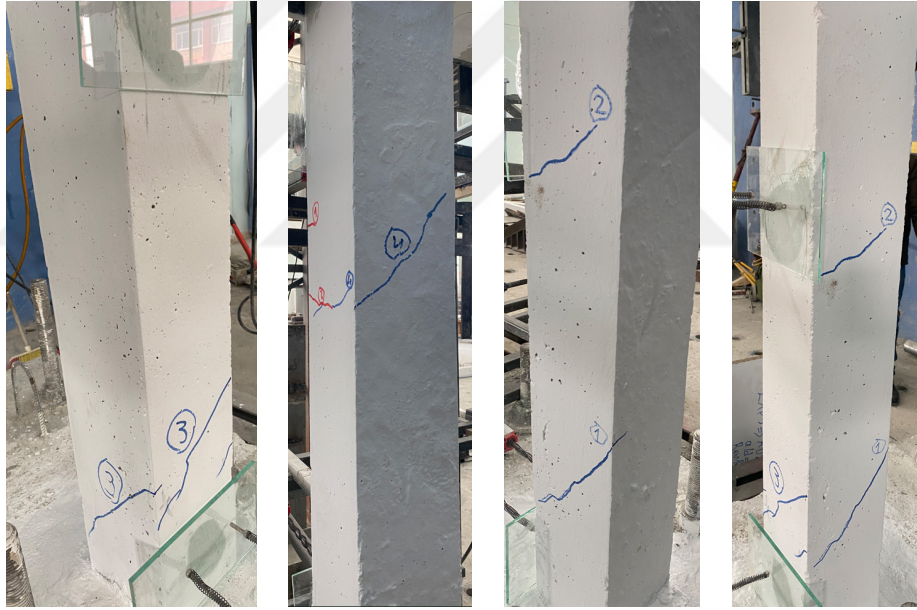
Çizelge 4.4 SN-0 numunesinin çatlak analizi

	Çevrim	Dönme (°)	Moment (kNm)	Deney Elemanında Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
1	İtme (+)	0,278	3,738	Deneyin ilk iki çevriminde herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-0,454	-4,156	
2	İtme (+)	0,597	5,877	
	Çekme (-)	-0,592	-4,897	
3	İtme (+)	0,862	7,091	Kolonun alt ve orta bölgesinde ilk çatlaklar oluşmuştur.
	Çekme (-)	-0,897	-6,652	*Çekme yönünde burulma çatlama meydana gelmiştir. Rijitlik azalmıştır.
4	İtme (+)	1,280	7,866	*İtme yönünde burulma çatlama meydana gelmiştir. Rijitlik azalmıştır.
	Çekme (-)	-1,311	-7,036	Yeni çatlaklar oluşmuştur. Daha önce oluşan çatlaklar dallanmış ve uzamıştır. En büyük çatlak genişliği 0,2 mm ölçülmüştür.
5	İtme (+)	1,447	8,051	Tüm çatlaklarda uzama meydana gelmiştir. Bazı çatlaklar dallanmıştır. Yeni çatlaklar oluşmuştur. En büyük çatlak genişliği 0,3 mm ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-1,448	-6,536	Mevcut çatlaklarda uzama ve dallanma oluşmuştur. Bazı çatlaklar dallanmıştır. Yeni çatlaklar oluşmuştur. En büyük çatlak genişliği 0,3 mm ölçülmüştür.

	Çevrim	Dönme (°)	Moment (kNm)	Deney Elemanında Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
6	İtme (+)	2,274	9,327	Yeni çatlaklar oluşmuştur. Daha önce oluşan çatlaklar dallanmış ve uzamıştır. En büyük çatlak genişliği 0,6 mm ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-2,062	-8,826	Yeni çatlaklar oluşmuştur. Oluşan bazı çatlaklar daha önce oluşan çatlaklarla birleşmiştir.
7	İtme (+)	2,891	8,792	Yeni çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Çatlaklar kolon alt ve orta bölgesinde yoğunlaşmıştır. Mevcut çatlaklar genişlemiştir. En büyük çatlak genişliği 1,7 mm ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-2,891	-8,942	Yeni çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Daha önce oluşan çatlaklar uzamıştır ve dallara ayrılmıştır. Çekmede en büyük çatlak 1,6 mm ölçülmüştür.
8	İtme (+)	3,596	8,851	Yeni çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-3,596	-9,162	Kabuk betonda çatlaklar ayrılmaya başlamıştır. Hasar kolon alt bölgesinde yoğunlaşmıştır.
9	İtme (+)	4,432	8,947	Kolon alt bölgesinde kabuk beton dökülmeye başlamıştır.
	Çekme (-)	-4,432	-9,224	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir
10	İtme (+)	5,137	9,265	*İtme yönünde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-5,108	-8,465	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir
11	İtme (+)	5,137	8,786	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir
	Çekme (-)	-5,756	-9,937	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir
12	İtme (+)	5,756	7,937	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir
	Çekme (-)	-6,477	-9,944	Kolonun tüm kenarlarında kabuk betonu dökülmüştür.
13	İtme (+)	6,532	7,564	Boyuna donatılarda eğilme meydana gelmiştir.
	Çekme (-)	-7,204	-9,766	*Çekme yönünde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
14	İtme (+)	7,099	7,413	Çekirdek bölgesinde çatlaklar oluşmuştur.
	Çekme (-)	-7,846	-8,943	Çekirdek bölgesinde çatlak oluşumu devam etmiştir.
15	İtme (+)	7,917	7,036	Çekirdek bölgesinde çatlaklar genişlemiştir. Donatılarda dönme gözle görülmüştür.
	Çekme (-)	-8,689	-8,552	Etriyeler açılmaya başlamıştır. Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
16	İtme (+)	8,641	6,316	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
	Çekme (-)	-9,427	-7,647	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.

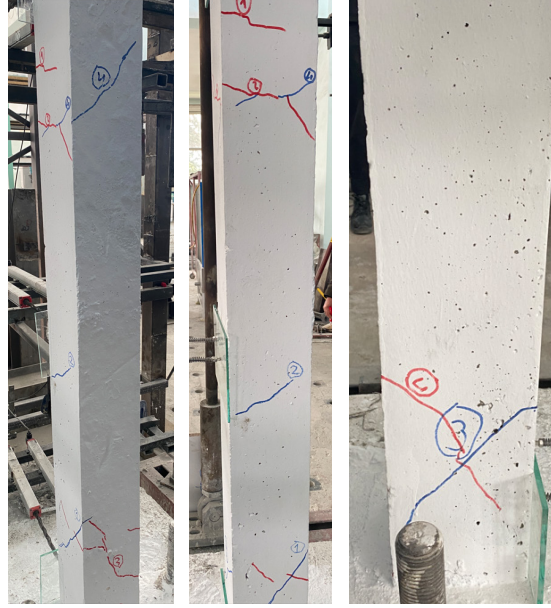
Çevrim	Dönme (°)	Moment (kNm)	Deney Elemanında Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
17	İtme (+)	9,394	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
	Çekme (-)	-10,102	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
18	İtme (+)	10,127	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
	Çekme (-)	-10,960	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
19	İtme (+)	11,010	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
	Çekme (-)	-11,507	Çekirdek betonu tamamen kırılmıştır.
20	İtme (+)	11,528	*Deney yüklemesine son verilmiştir.

Kolonda ilk iki çevrimde çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Kolonda meydana gelen ilk çatlaklar 6,65 kNm moment değerinde meydana gelmiştir (Şekil 4.39). Bu yük değerinde elemanda belirgin bir rijitlik kaybı oluşmamıştır.



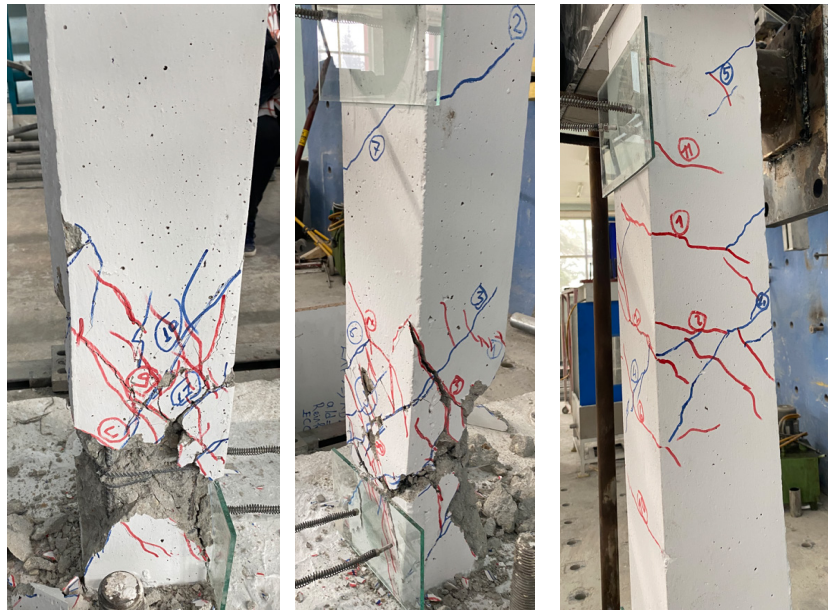
Şekil 4.39 SN-3 numunesinde meydana gelen ilk çatlaklar

Deney elemanı burulma çatlama noktasına itme çevrimlerinde 7,86 kNm moment ve 1,28° dönme açısı seviyesinde ulaşırken çekme çevrimlerinde ilk çatlakların oluşması ile 6,65 kNm moment ve 0,90° dönme açısında burulmada çatlama gerçekleşmiştir (Şekil 4.40). Kolonda meydana gelen ilk çatlaklar incelendiğinde, elemanın 4 yüzünde ve sürekli çatlakların oluşumu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.40 SN-3 numunesinin burulma çatlama düzeyinde hasar durumu

Deney elemanı itme çevrimlerinde 9,22 kNm moment değerinde, çekme çevrimlerinde 9,76 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değerine ulaşılan kadar elemenda itmede $5,14^\circ$ lik, çekmede ise $7,20^\circ$ lik dönme meydana gelmiştir (Şekil 4.41). Maksimum moment değerinde oluşan çatlaklar incelendiğinde çatlakların genellikle kolon alt ve üst bölgesinde meydana geldiği, hasarın da alt bölgede olduğu görülmüştür.



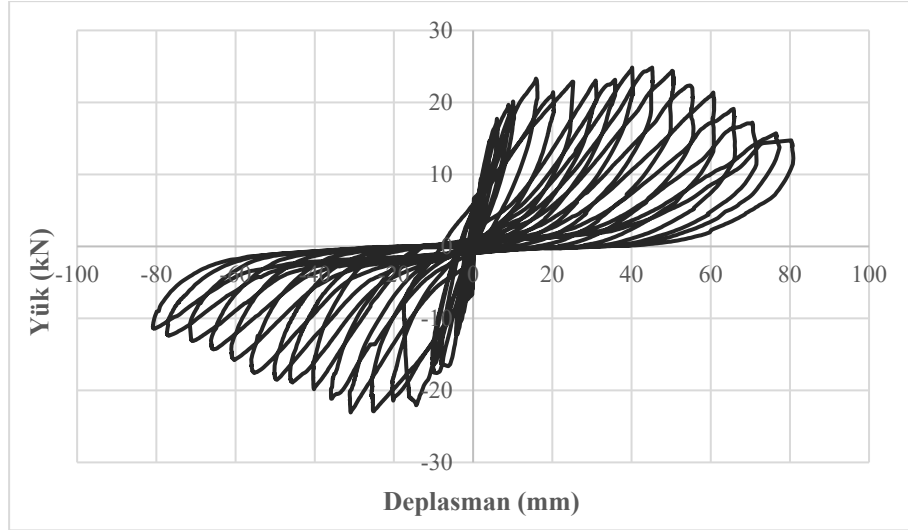
Şekil 4.41 SN-3 numunesinin maksimum burulma kapasitesinde hasar durumu

Burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşıldıktan hemen sonra moment değeri kapasitenin %20'si oranında azaldığı noktaya kadar deney devam ettirilmiştir. Burulma taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra kolonun burulma taşıma gücü azalmış ancak kolonda bir miktar daha dönme meydana gelmiştir. Nihai durumda elemanda itme çevriminde 7,95 kNm moment ve 9,18° dönme meydana gelirken, çekmede 7,38 kNm moment etkisi ve 7,18° dönme etkisi oluşmuştur (Şekil 4.42).



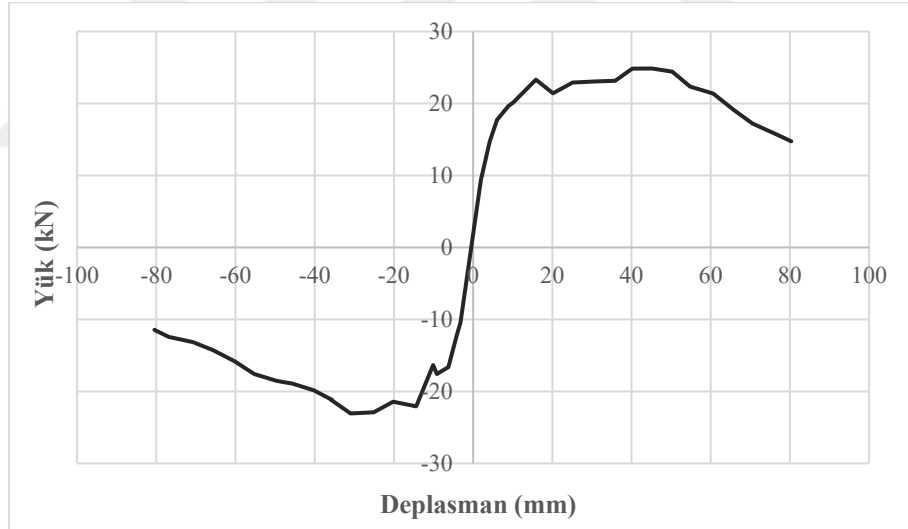
Şekil 4.42 SN-3 numunesinin nihai durumda hasar durumu

Deneyler sırasında eleman üzerine yerleştirilen yük hücresi ve potansiyometrik cetvellerden alınan yük ve deplasman verileri kullanılarak elemanın burulma davranışını belirlemek amacıyla çeşitli grafikler çizilmiştir. Yatay yük kolon eksenine 400 mm mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Buna karşılık deplasman verileri kiriş ucundaki ve kolon eksenindeki potansiyometrik cetvellerin farkından oluşmuştur (Şekil 4.43).



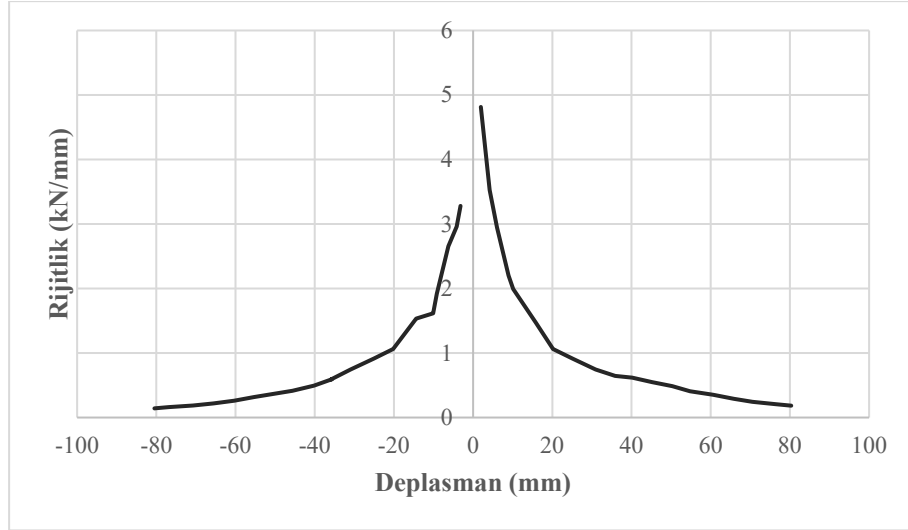
Şekil 4.43 SN-3 numunesinin yük-deplasman grafiği

Her bir çevrimde meydana gelen maksimum yüke karşılık gelen deplasmanın belirlenmesi ile çevrimsel olarak etki eden yükün zarf eğrisi elde edilmiştir (Şekil 4.44).



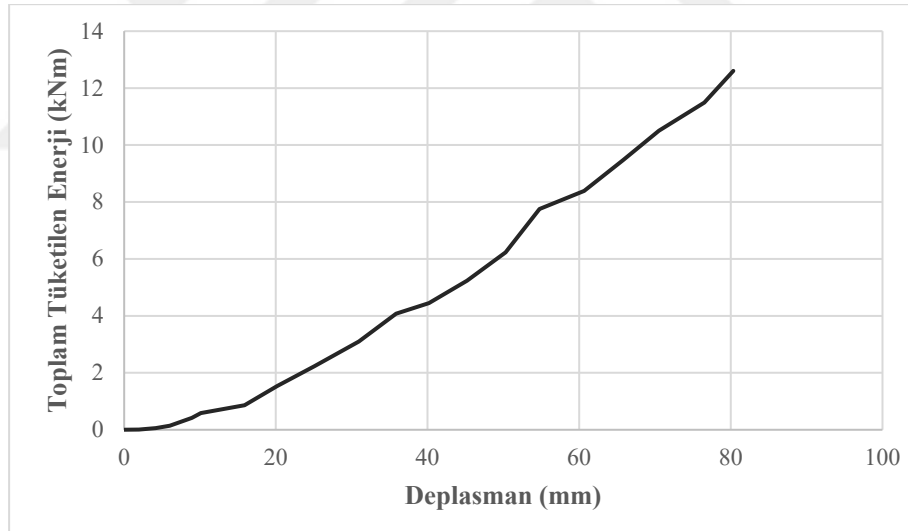
Şekil 4.44 SN-3 numunesinin yük-deplasman zarf eğrisi

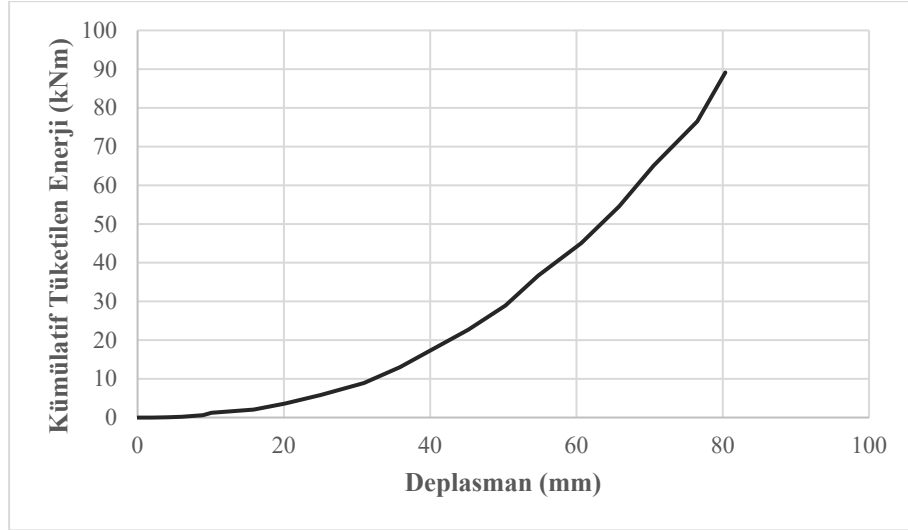
Deneylerde her yük çevriminde elde edilen yükün o çevrimde meydana gelen deplasmana oranı belirlenerek rijitlik-deplasman grafikleri elde edilmiştir (Şekil 4.45).



Şekil 4.45 SN-3 numunesinin rijitlik grafiği

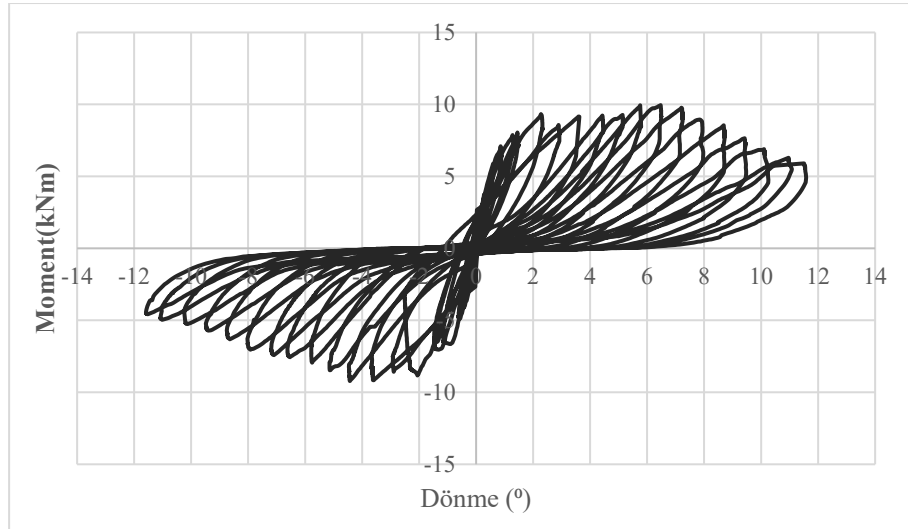
Deney numunesinde yük-deplasman eğrisinin altında kalan alanın belirlenmesi ile tüketilen toplam enerji ve tüketilen kümülatif enerji grafiği hazırlanmıştır (Şekil 4.46).





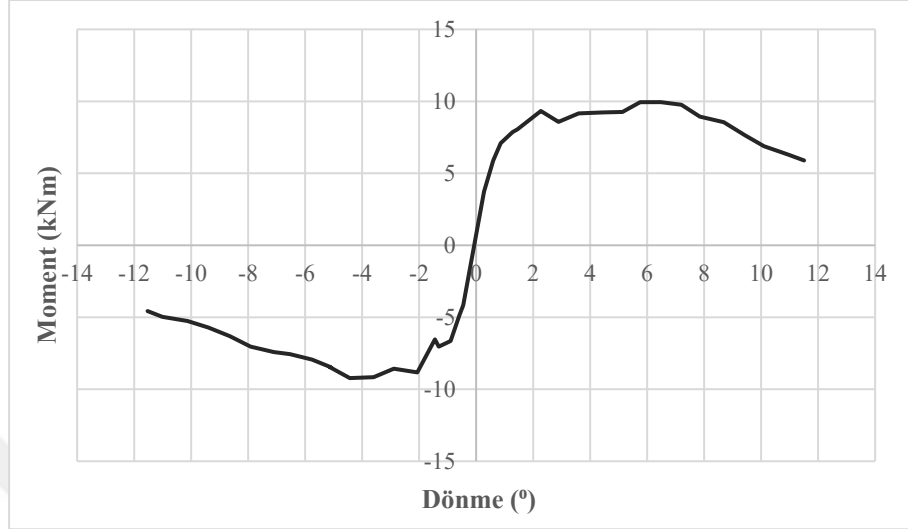
Şekil 4.46 SN-3 numunesinin toplam ve kümülatif tüketilen enerji grafiği

Yataydaki yük hücresi yardımıyla okunan yük değerinin 400 mm'lik moment kolu ile çarpılması sonucunda kolona etki eden moment değerleri belirlenmiştir. Kiriş ucundaki potansiyometrik cetvelden elde edilen deplasmanın kolon ekseninde ölçülen deplasman değerine göre farkı belirlenerek moment kolu mesafesine bölünmesi ile kolonda meydana gelen dönme miktarları belirlenmiştir. Her moment değerine karşılık gelen dönme kullanılarak moment-dönme grafiği elde edilmiştir (Şekil 4.47).



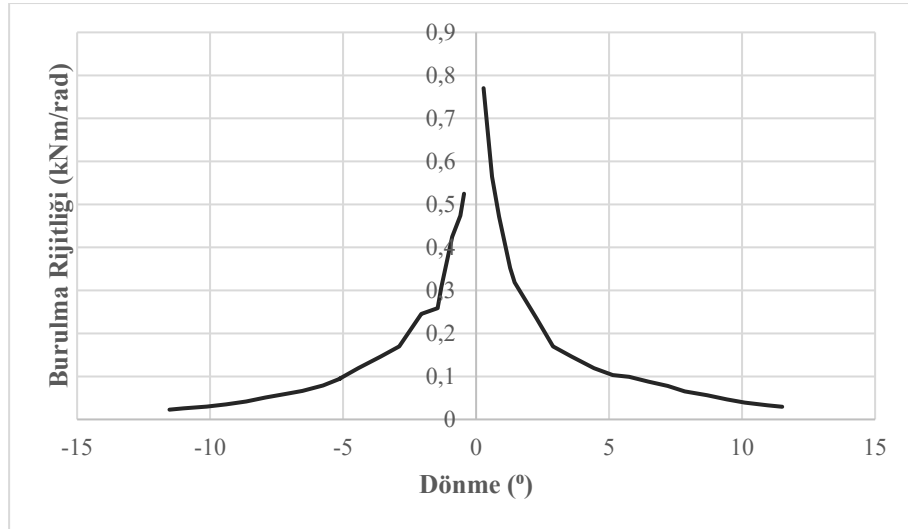
Şekil 4.47 SN-3 numunesinin moment-dönme grafiği

Her bir çevrimde meydana gelen maksimum burulma momentine karşılık gelen dönmenin belirlenmesi ile çevrimsel olarak etki eden burulmanın zarf eğrisi elde edilmiştir (Şekil 4.48).



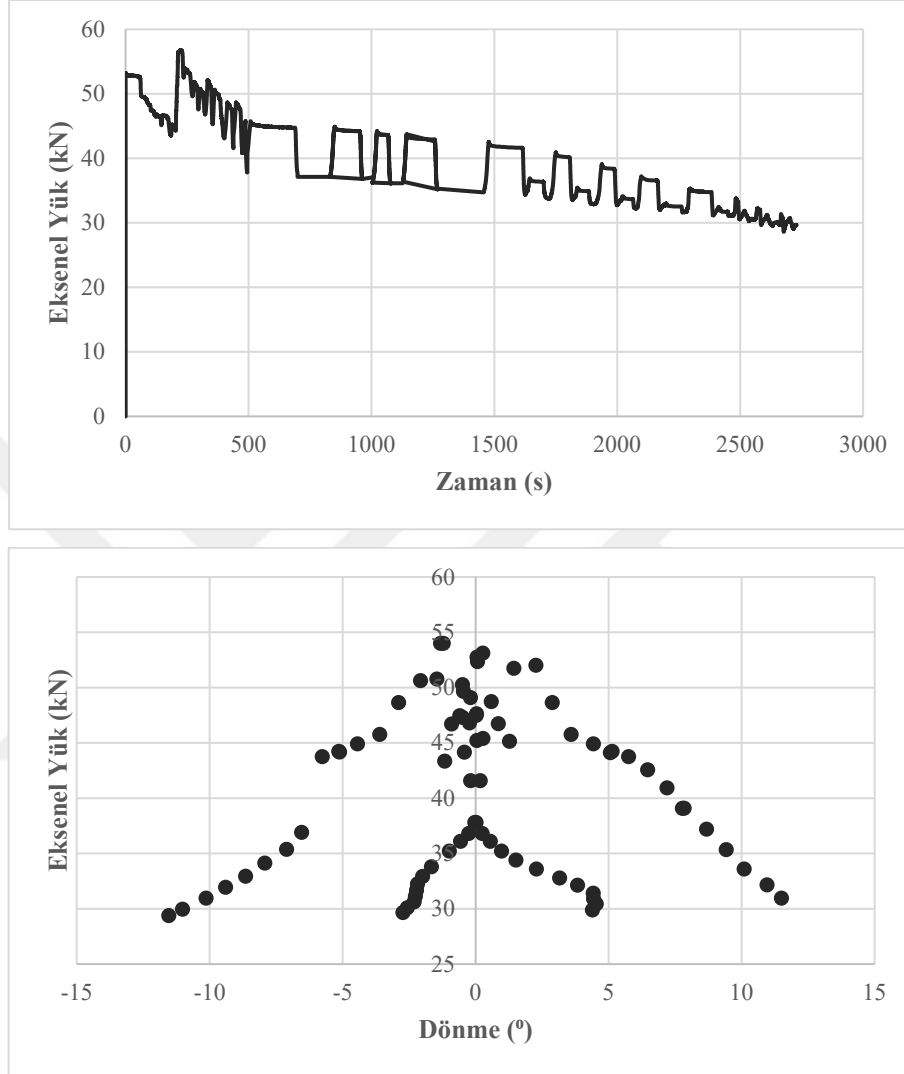
Şekil 4.48 SN-3 numunesinin moment-dönme zarf eğrisi

Her bir çevrimde okunan maksimum burulma momentinin, elemanda meydana gelen dönmeye bölünmesi ile elemanın burulma rijitliği belirlenmiştir (Şekil 4.49).



Şekil 4.49 SN-3 numunesinin burulma rijitliği grafiği

Eleman üzerine etki eden eksenel yük değerinin zamana ve dönmeye bağlı değişimi belirlenerek eksenel yük-zaman grafiği ve eksenel yük dönme grafiği çizilmiştir (Şekil 4.50).



Şekil 4.50 SN-3 numunesinin eksenel yük-zaman ve eksenel yük-dönme grafiği

Kolonun burulma etkisi altında hesaplanan dönme süneklik faktörü itme çevrimi için 7,18 Çekme çevrimi için 7,98 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca kolona etki eden momentin kolonun üst orta ve alt yüksekliklerinde sırasıyla 8,51; 13,40; 0,91 derecelik dönme meydana geldiği tespit edilmiştir.

4.1.5. Deney 5 (SN-4)

Çalışma kapsamında test edilen SN-4 numunesinde deney başlangıcında kolon üzerinde $N_d=0,20A_c f_{ck}=72$ kN düzeyinde eksenel yük uygulanmıştır. Deneylere başlamadan önce numune yerine yerleştirilmiş ve deney düzeneği hazırlanmıştır (Şekil 4.51). Çevrimsel yükleme altında test edilecek elemanda deneye başlamadan sistemin genel kontrolü sağlanmıştır.



Şekil 4.51 SN-4 numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney sırasında her bir çevrimde kolon üzerinde gözlemlenen çatlaklar işaretlenmiştir. Elemanda meydana gelen hasar durumları belirlenmiştir (Çizelge 4.5).

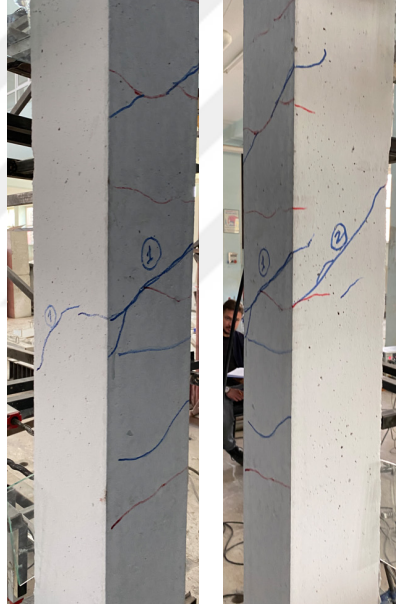
Çizelge 4.5 SN-4 numunesinin çatlak analizi

Çevrim	Dönme (°)	Moment (kNm)	Deney Elemanında Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
1	İtme (+)	0,357	Deneyin ilk çevriminde herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-0,312	
2	İtme (+)	0,580	Herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Kolon orta bölgesinde 3 kenar boyunca uzanan bir burulma çatlakları oluşmuştur.
	Çekme (-)	-0,785	
3	İtme (+)	0,874	İtme yönünde ilk çatlaklar oluşmuştur. Daha önce oluşan çatlak uzamıştır. Çatlak genişliği 0,4 mm olarak ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-0,872	

Çevrim	Dönme (°)	Moment (kNm)	Deney Elemanında Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu	
4	İtme (+)	1,186	7,416	Kolon orta bölgesinde yeni çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar tüm kolona yayılmıştır.
	Çekme (-)	-1,452	-7,966	Yeni çatlaklar oluşmuştur. İlk oluşan çatlak genişliği 0,9 mm olarak ölçülmüştür.
5	İtme (+)	1,464	7,224	*İtme yönünde burulma çatlama meydana gelmiştir. Rijitlik azalmıştır. İtme yönünde çatlaklar tüm kolon boyunca meydana gelmiştir. En geniş çatlak 0,7 mm olarak ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-1,579	-7,397	Yeni çatlaklar oluşmuştur. İlk oluşan çatlak genişliği 1,2 mm olarak ölçülmüştür.
6	İtme (+)	2,238	8,116	Daha önce oluşan çatlaklar uzamıştır. Yeni çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Daha önce oluşan çatlaklar uzamıştır ve dallara ayrılmıştır. En büyük çatlak genişliği 1,4 mm ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-2,127	-7,960	*Çekme yönünde burulma çatlama meydana gelmiştir. Rijitlik azalmıştır. Daha önce oluşan çatlaklar uzamıştır ve dallara ayrılmıştır. İlk çatlak genişliği 1,4 mm ölçülmüştür.
7	İtme (+)	2,889	8,644	Kolon orta bölgesindeki çatlaklarda ayrılma meydana gelmeye başlamıştır. Çatlak genişliği 2,7 mm ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-2,820	-8,810	Kabuk beton dökülmüştür.
8	İtme (+)	3,597	9,761	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir.
	Çekme (-)	-3,639	-10,017	Oluşan ilk çatlak yayılmaya ve ayrılmaya devam etmiştir.
9	İtme (+)	4,410	10,276	Kolonun hasarlı kısmında tüm kenarlarda kabuk beton dökülmüştür.
	Çekme (-)	-4,191	-10,655	Boyuna donatılarda burkulma meydana gelmiştir.
10	İtme (+)	5,028	10,598	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-5,078	-12,033	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
11	İtme (+)	5,895	11,003	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-5,785	-13,000	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
12	İtme (+)	6,549	11,524	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-6,510	-13,926	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
13	İtme (+)	7,253	11,757	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-7,276	-14,386	*Çekme yönünde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
14	İtme (+)	7,805	11,689	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-7,989	-13,837	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
15	İtme (+)	8,590	11,737	*İtme yönünde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Çekirdek kısmındaki betonda hasar meydana gelmiştir.
	Çekme (-)	-8,603	-13,185	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
16	İtme (+)	9,498	11,709	Etriyeler açılmaya başlamıştır. Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
	Çekme (-)	-9,483	-12,410	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.

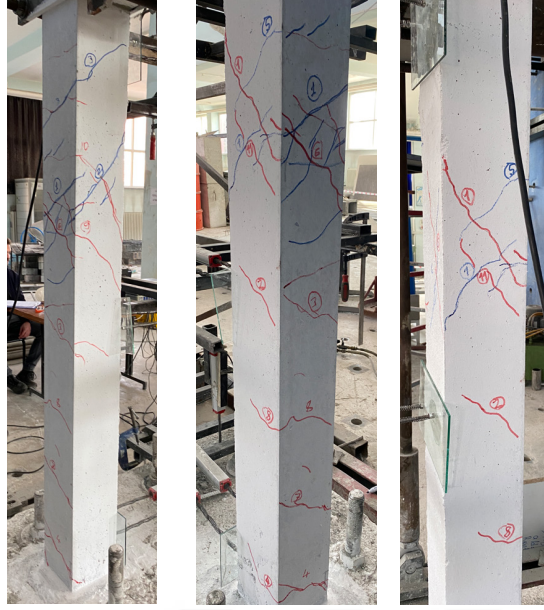
Çevrim	Dönme (°)	Moment (kNm)	Deney Elemanında Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
17	İtme (+)	10,131	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
	Çekme (-)	-10,280	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
18	İtme (+)	10,801	Çekirdek kısmındaki betonda hasar artmaya devam etmiştir.
	Çekme (-)	-10,745	Çekirdek betonu tamamen kırılmıştır.
19	İtme (+)	11,666	Donatılarda zorlanmalar devam etmiş, betonda boşluk oluşmuştur.
	Çekme (-)	-11,467	*Deney yüklemesine son verilmiştir.

Kolonda ilk çevrimde çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Kolonda meydana gelen ilk çatlak çekme yönünde 7,10 kNm moment değerinde meydana gelmiştir (Şekil 4.52). Bu yük değerinde elemanda belirgin bir rijitlik kaybı oluşmamıştır.



Şekil 4.52 SN-4 numunesinde meydana gelen ilk çatlaklar

Deney elemanı burulma çatlama noktasına itme çevrimlerinde 7,22 kNm moment ve 1,46° dönme açısı seviyesinde ulaşırken çekme çevrimlerinde 7,96 kNm moment ve 1,45° dönme açısında burulmada çatlama gerçekleşmiştir (Şekil 4.53). Kolonda meydana gelen ilk çatlaklar gevrek bir biçimde ve yoğun olarak kolonun 3 yüzünde ve kenarın orta noktasında meydana gelirken burulma çatlama ile elemanın 4 yüzünde, tüm kolon boyunca ve sürekli çatlakların oluşumu gözlemlenmiştir.



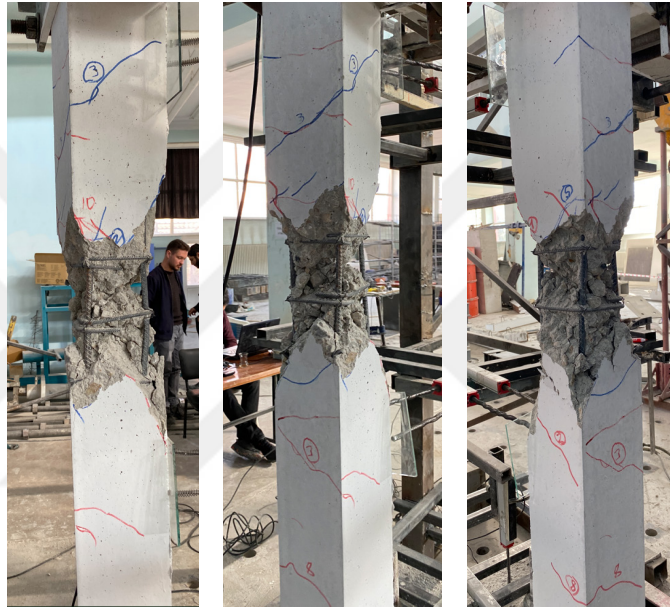
Şekil 4.53 SN-4 numunesinin burulma çatlama düzeyinde hasar durumu

Deney elemanı itme çevrimlerinde 11,73 kNm moment değerinde, çekme çevrimlerinde 14,38 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değerine ulaşılan kadar elemanda itmede 8,59°'lik, çekmede ise 7,27°'lik dönme meydana gelmiştir (Şekil 4.54). Maksimum moment değerinde elemanda oluşan çatlaklar incelendiğinde çatlakların genellikle orta bölgede olduğu, hasarın da ortada meydana geldiği görülmüştür.



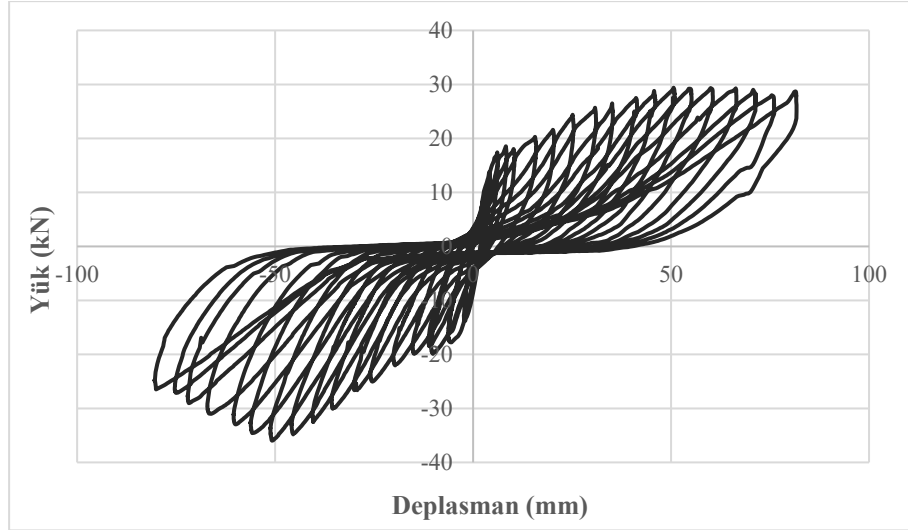
Şekil 4.54 SN-4 numunesinin maksimum burulma kapasitesinde hasar durumu

Burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra çekirdek betonunda çatlaklar meydana gelmiş, moment değeri kapasitenin %20'si oranında azaldığı noktaya kadar deney devam ettirilmiştir. Deney düzeneğinin izin verdiği sınır yükleme durumuna ulaşıldığından ve kapasitede azaldığından deney sonlandırılmıştır. Burulma taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra kolonun burulma taşıma gücü azalmış ancak kolonda bir miktar daha dönme meydana gelmiştir. Nihai durumda elemanda itme çevriminde 11,21 kNm moment ve 10,80° dönme meydana gelirken, çekmede 11,51 kNm moment etkisi ve 10,28° dönme etkisi oluşmuştur (Şekil 4.55).



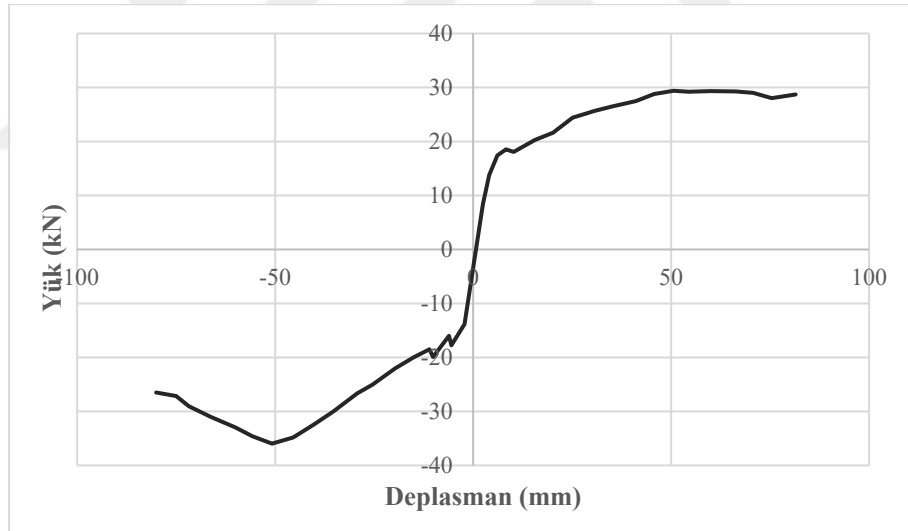
Şekil 4.55 SN-4 numunesinin nihai durumda hasar durumu

Deneyler sırasında eleman üzerine yerleştirilen yük hücresi ve potansiyometrik cetvellerden alınan yük ve deplasman verileri kullanılarak elemanın burulma davranışını belirlemek amacıyla çeşitli grafikler çizilmiştir. Yatay yük kolon eksenine 400 mm mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Buna karşılık deplasman verileri giriş ucundaki ve kolon eksenindeki potansiyometrik cetvellerin farkından oluşmuştur (Şekil 4.56).



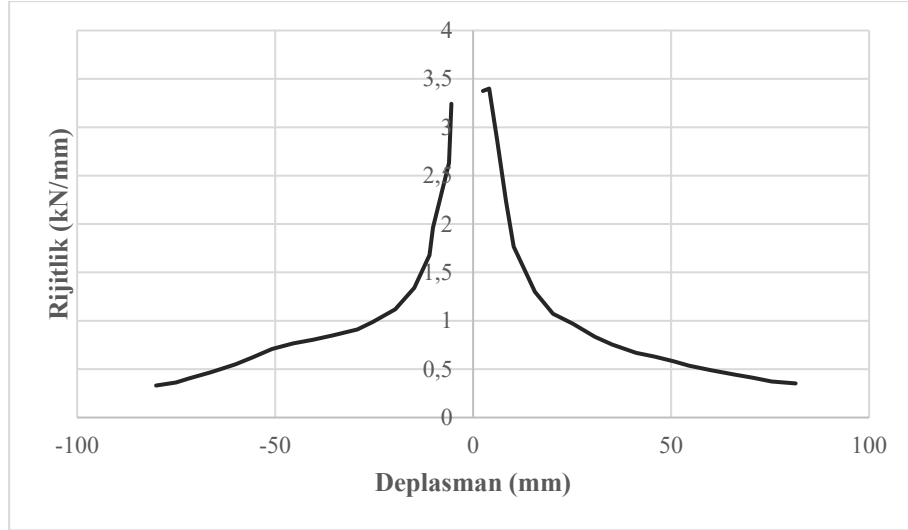
Şekil 4.56 SN-4 numunesinin yük-deplasman grafiği

Her bir çevrimde meydana gelen maksimum yüke karşılık gelen deplasmanın belirlenmesi ile çevrimsel olarak etki eden yükün zarf eğrisi elde edilmiştir (Şekil 4.57).



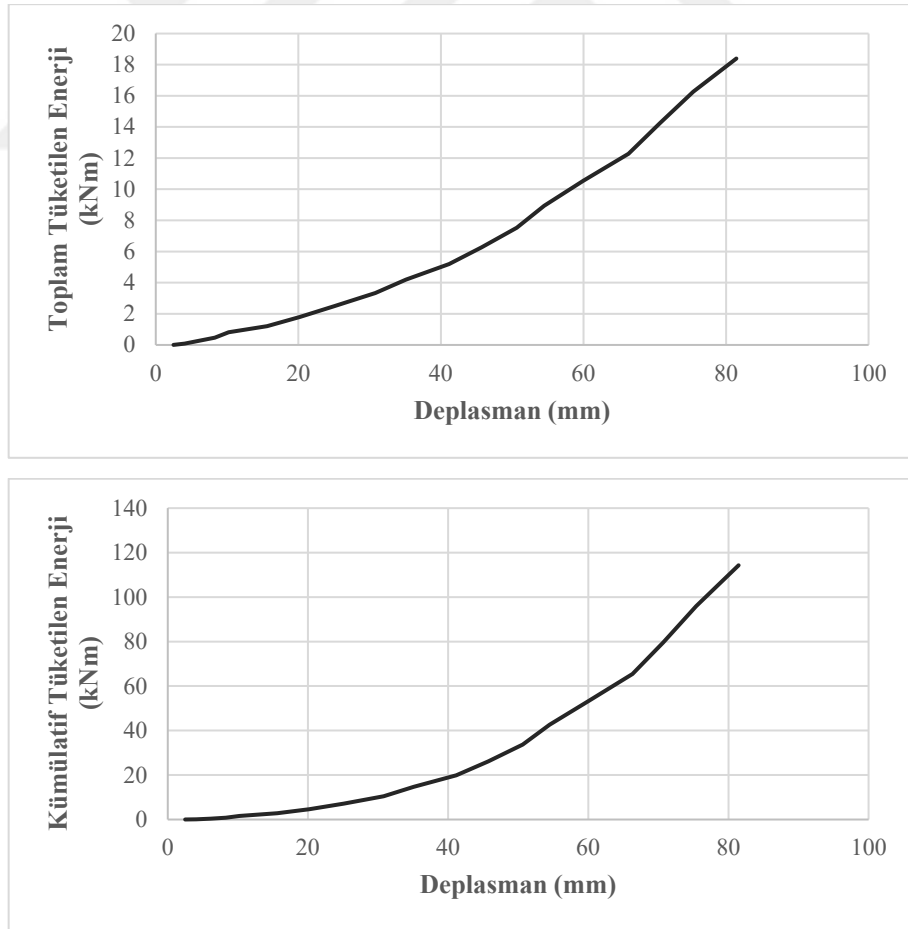
Şekil 4.57 SN-4 numunesinin yük-deplasman zarf eğrisi

Deneylerde her yük çevriminde elde edilen yükün o çevrimde meydana gelen deplasmana oranı belirlenerek rijitlik-deplasman grafikleri elde edilmiştir (Şekil 4.58).



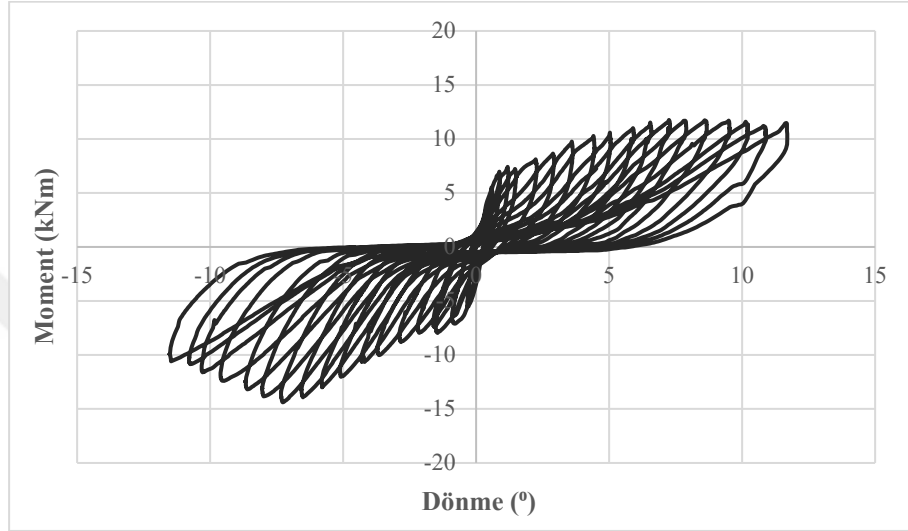
Şekil 4.58 SN-4 numunesinin rijitlik grafiği

Deney numunesinde yük-deplasman eğrisinin altında kalan alanın belirlenmesi ile tüketilen toplam enerji ve tüketilen kümülatif enerji grafiği hazırlanmıştır (Şekil 4.59).



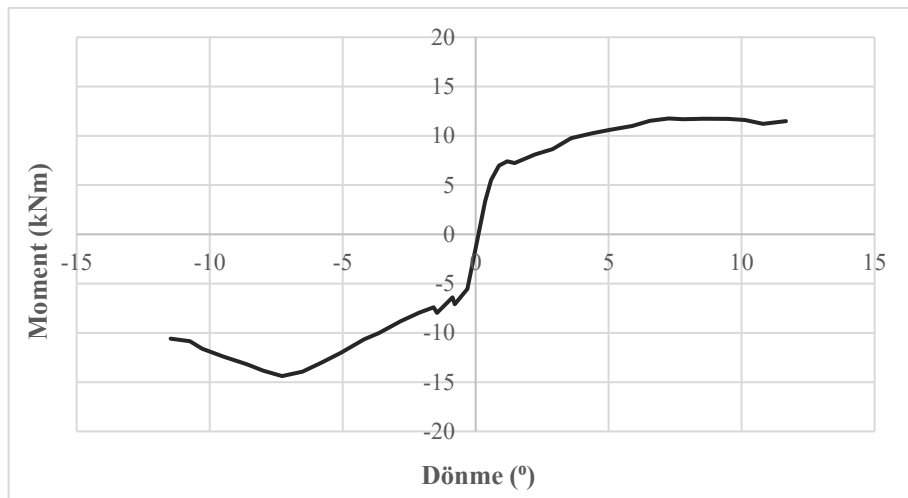
Şekil 4.59 SN-4 numunesinin toplam ve kümülatif tüketilen enerji grafiği

Yataydaki yük hücresi yardımıyla okunan yük değerinin 400 mm'lik moment kolu ile çarpılması sonucunda kolona etki eden moment değerleri belirlenmiştir. Kiriş ucundaki potansiyometrik cetvelden elde edilen deplasmanın kolon ekseninde ölçülen deplasman değerine göre farkı belirlenerek moment kolu mesafesine bölünmesi ile kolonda meydana gelen dönme miktarları belirlenmiştir. Her moment değerine karşılık gelen dönme miktarları kullanılarak moment-dönme grafiği elde edilmiştir (Şekil 4.60).



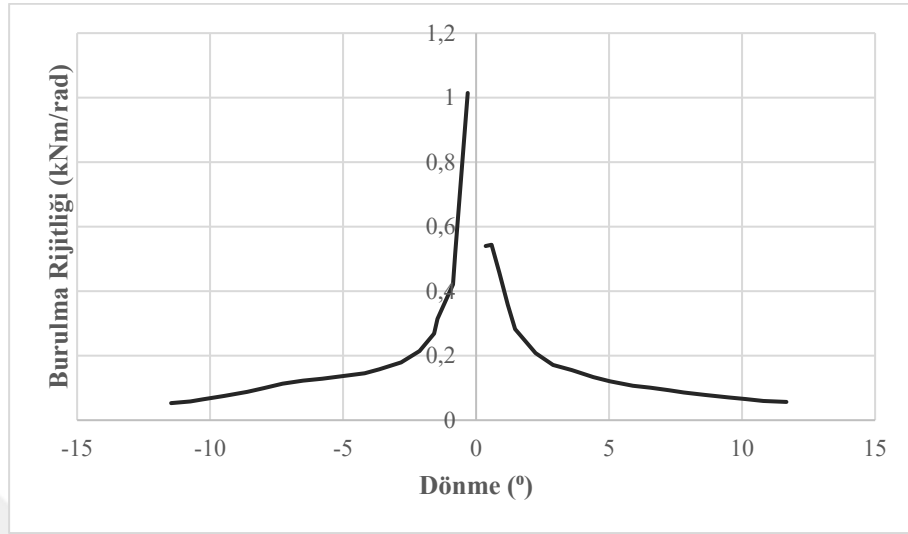
Şekil 4.60 SN-4 numunesinin moment-dönme grafiği

Her bir çevrimde meydana gelen maksimum burulma momentine karşılık gelen dönmenin belirlenmesi ile çevrimsel olarak etki eden burulmanın zarf eğrisi elde edilmiştir (Şekil 4.61).



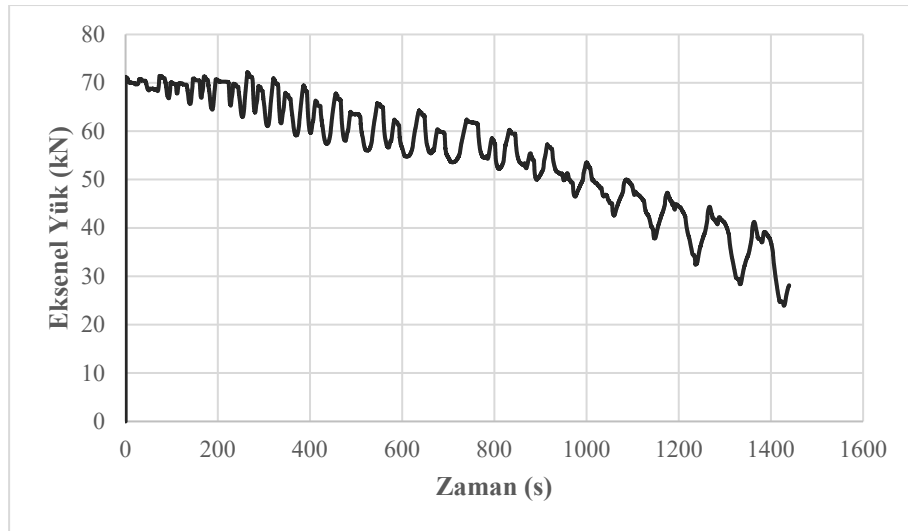
Şekil 4.61 SN-4 numunesinin moment-dönme zarf eğrisi

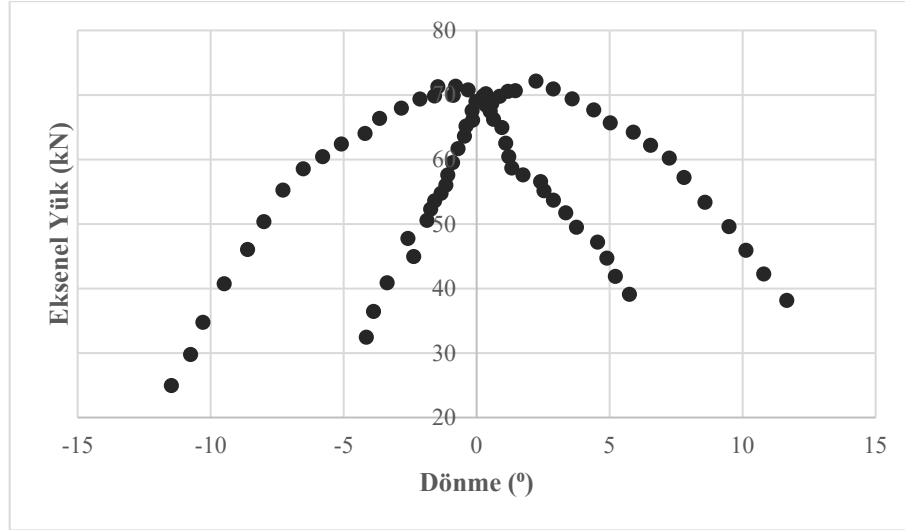
Her bir çevrimde okunan maksimum burulma momentinin, elemanda meydana gelen dönmeye bölünmesi ile elemanın burulma rijitliği belirlenmiştir (Şekil 4.62).



Şekil 4.62 SN-4 numunesinin burulma rijitliği grafiği

Eleman üzerine etki eden eksenel yük değerinin zamana ve dönmeye bağlı değişimi belirlenerek eksenel yük-zaman grafiği ve eksenel yük dönme grafiği çizilmiştir (Şekil 4.63).





Şekil 4.63 SN-4 numunesinin eksenel yük-zaman ve eksenel yük-dönme grafiği

Kolonun burulma etkisi altında hesaplanan dönme süneklik faktörü itme çevrimi için 7,39; çekme çevrimi için 7,09 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca kolona etki eden momentin kolonun üst orta ve alt yüksekliklerinde sırasıyla 7,37; 0,9; 0,22 derecelik dönme meydana geldiği tespit edilmiştir.

4.1.6. Deney 6 (SN-5)

Çalışma kapsamında test edilen SN-5 numunesinde deney başlangıcında kolon üzerinde $N_d=0,25A_{cf_{ck}}=90$ kN düzeyinde eksenel yük uygulanmıştır. Deneylere başlamadan önce numune yerine yerleştirilmiş ve deney düzeneği hazırlanmıştır (Şekil 4.64). Çevrimsel yükleme altında test edilecek elemanda deneye başlamadan sistemin genel kontrolü sağlanmıştır.



Şekil 4.64 SN-5 numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney sırasında her bir çevrimde kolon üzerinde gözlemlenen çatlaklar işaretlenmiştir. Elemanda meydana gelen hasar durumları belirlenmiştir (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6 SN-5 Numunesinin çatlak analizi

	Çevrim	Dönme (°)	Moment (kNm)	Deney Elemanında Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
1	İtme (+)	0,304	5,054	Deneyin ilk çevriminde herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-0,286	-4,019	
2	İtme (+)	0,571	6,947	İlk çatlaklar oluşmuştur.
	Çekme (-)	-0,648	-6,892	Herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir.
3	İtme (+)	0,829	7,962	*İtme yönünde burulma çatlama meydana gelmiştir. Rijitlik azalmıştır. İtme yönünde çatlaklar tüm kolon boyunca meydana gelmiştir. En geniş çatlak 0,1 mm olarak ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-1,025	-8,044	Çekme yönünde ilk çatlaklar oluşmuştur. En büyük çatlak genişliği 0,2 mm ölçülmüştür.
4	İtme (+)	1,243	8,511	Daha önce oluşan çatlaklar uzamıştır ve dallara ayrılmıştır. Yeni çatlaklar oluşmuştur. En büyük çatlak genişliği 0,2 mm ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-1,376	-8,161	Daha önce tüm kolon boyunca oluşan çatlaklar uzamıştır ve dallara ayrılmıştır. Yeni çatlaklar oluşmuştur. En büyük çatlak 0,7 mm ölçülmüştür.
5	İtme (+)	1,427	7,983	Yeni çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Daha önce oluşan çatlaklar uzamıştır ve dallara ayrılmıştır. En büyük çatlak 0,5 mm ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-1,488	-7,811	*Çekme yönünde burulma çatlama meydana gelmiştir. Rijitlik azalmıştır. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.

Çevrim		Dönme (°)	Moment (kNm)	Deney Elemanında Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
6	İtme (+)	2,341	9,334	*İtme yönünde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir. En büyük çatlak genişliği 1,4 mm ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-2,095	-7,962	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir. Daha önce oluşan çatlaklar uzamıştır ve dallara ayrılmıştır. En büyük çatlak genişliği 1,6 mm ölçülmüştür.
7	İtme (+)	2,873	9,149	Kolon orta bölgesindeki çatlaklarda ayrılma meydana gelmeye başlamıştır. Çatlak genişliği 2,5 mm ölçülmüştür.
	Çekme (-)	-2,848	-8,634	Kolon orta bölgesindeki çatlaklarda ayrılma meydana gelmeye başlamıştır. Kabuk betonu dökülmüştür. Orta bölgede çatlaklar 3,5 mm'yi geçmiştir.
8	İtme (+)	3,647	9,059	Kabuk betonu dökülmeye devam etmiştir.
	Çekme (-)	-3,711	-9,238	Çekirdek çatlaklar oluşmaya başlamıştır.
9	İtme (+)	3,955	8,435	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir.
	Çekme (-)	-4,369	-9,786	Çekirdek betonunda çatlaklar ayrılmaya başlamıştır.
10	İtme (+)	4,996	7,702	*İtme yönünde nihai moment taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir.
	Çekme (-)	-5,052	-9,896	*Çekme yönünde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
11	İtme (+)	5,777	8,394	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir.
	Çekme (-)	-5,781	-10,630	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir.
12	İtme (+)	6,514	8,833	Çekirdek betonu tamamen hasar görmüştür.
	Çekme (-)	-6,533	-11,467	Boyuna donatılarda gözle görülür eğilme meydana gelmiştir.
13	İtme (+)	7,143	9,169	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-7,134	-12,605	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
14	İtme (+)	8,020	9,745	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-7,802	-13,215	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
15	İtme (+)	8,898	10,609	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-8,619	-13,407	*Deney yüklemesine son verilmiştir.

Kolonda ilk çevrimde çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Kolonda meydana gelen ilk çatlak 6,94 kNm moment değerinde meydana gelmiştir (Şekil 4.65). Bu yük değerinde elemanda belirgin bir rijitlik kaybı oluşmamıştır.



Şekil 4.65 SN-5 numunesinde meydana gelen ilk çatlaklar

Deney elemanı burulma çatlama noktasına, itme çevrimlerinde 7,96 kNm moment ve $0,83^\circ$ dönme açısı seviyesinde ulaşırken çekme çevrimlerinde 7,81 kNm moment ve $1,49^\circ$ dönme açısında burulmada çatlama gerçekleşmiştir (Şekil 4.66). Kolonda meydana gelen ilk çatlaklar yoğun olarak kolonun 2 yüzünde ve kenarın orta noktasında meydana gelirken burulma çatlama ile elemanın 4 yüzünde ve sürekli çatlakların oluşumu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.66 SN-5 numunesinin burulma çatlama düzeyinde hasar durumu

Deney elemanı itme çevrimlerinde 9,33 kNm moment değerinde, çekme çevrimlerinde 9,90 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değerine ulaşılan kadar elemanda itmede $2,34^\circ$ 'lik, çekmede ise $5,05^\circ$ 'lik dönme meydana gelmiştir (Şekil 4.67). Maksimum moment değerinde oluşan çatlaklar incelendiğinde çatlakların genellikle kolon orta bölgesinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Kolonda hasar da bu bölgede oluşmuştur.



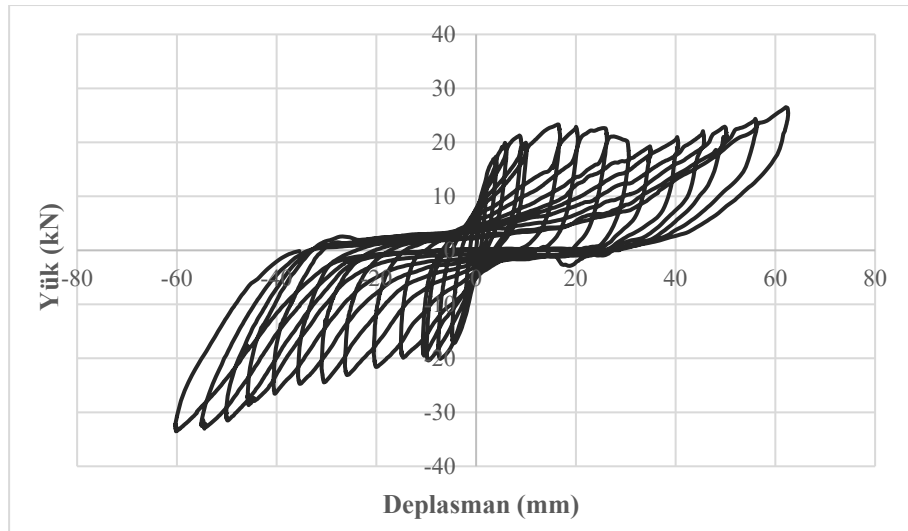
Şekil 4.67 SN-5 numunesinin maksimum burulma kapasitesinde hasar durumu

Burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra moment değeri kapasitenin %20'si oranında azaldığı noktaya kadar deney devam ettirilmiştir. Deney düzeneğinin izin verdiği sınır yükleme durumuna ulaşıldığından ve deney sistemindeki zorlanmaların artması nedeniyle deney sonlandırılmıştır. Burulma taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra kolonun burulma taşıma gücü azalmış ancak kolonda bir miktar daha dönme meydana gelmiştir. Nihai durumda elemanda itme çevriminde 7,70 kNm moment ve $4,99^\circ$ dönme meydana gelirken, çekmede 7,92 kNm moment etkisi ve $8,59^\circ$ dönme etkisi oluşmuştur (Şekil 4.68).



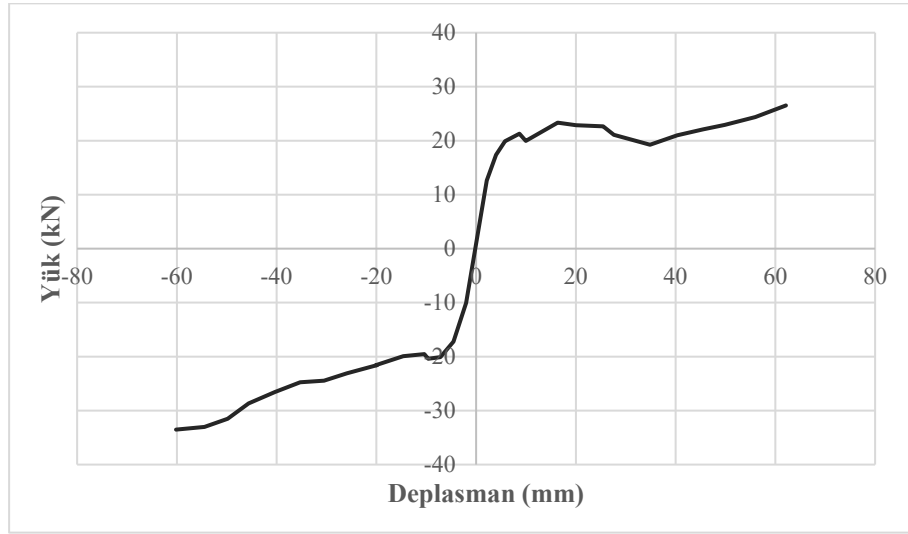
Şekil 4.68 SN-5 numunesinin nihai durumda hasar durumu

Deneyler sırasında eleman üzerine yerleştirilen yük hücresi ve potansiyometrik cetvellerden alınan yük ve deplasman verileri kullanılarak elemanın burulma davranışını belirlemek amacıyla çeşitli grafikler çizilmiştir. Yatay yük kolon eksenine 400 mm mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Buna karşılık deplasman verileri kiriş ucundaki ve kolon eksenindeki potansiyometrik cetvellerin farkından oluşmuştur (Şekil 4.69).



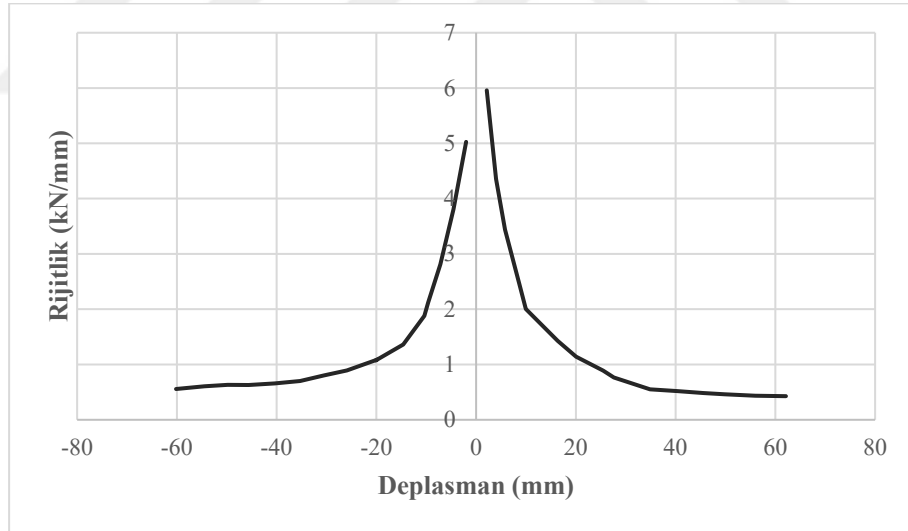
Şekil 4.69 SN-5 numunesinin yük-deplasman grafiği

Her bir çevrimde meydana gelen maksimum yüke karşılık gelen deplasmanın belirlenmesi ile çevrimsel olarak etki eden yükün zarf eğrisi elde edilmiştir (Şekil 4.70).



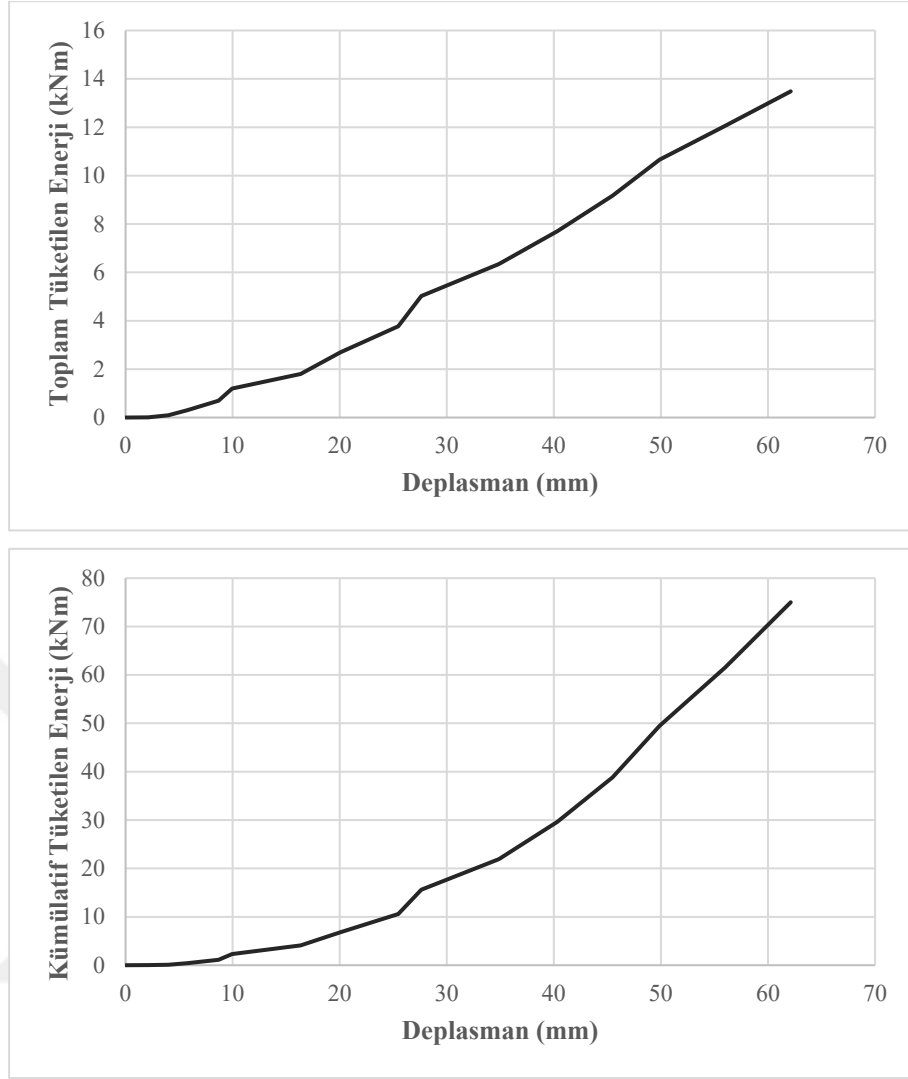
Şekil 4.70 SN-5 numunesinin yük-deplasman zarf eğrisi

Deneylerde her yük çevriminde elde edilen yükün o çevrimde meydana gelen deplasmana oranı belirlenerek rijitlik-deplasman grafikleri elde edilmiştir (Şekil 4.71).



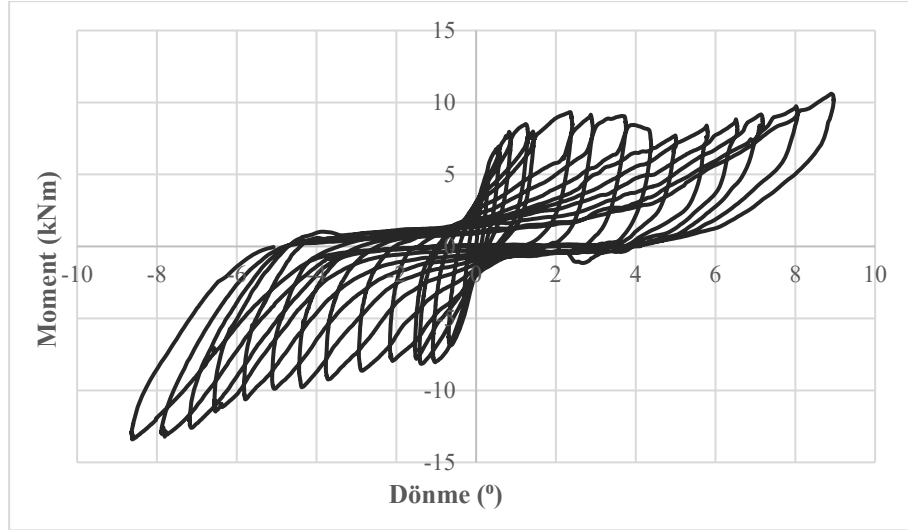
Şekil 4.71 SN-5 numunesinin rijitlik grafiği

Deney numunesinde yük-deplasman eğrisinin altında kalan alanın belirlenmesi ile tüketilen toplam enerji ve tüketilen kümülatif enerji grafiği hazırlanmıştır (Şekil 4.72).



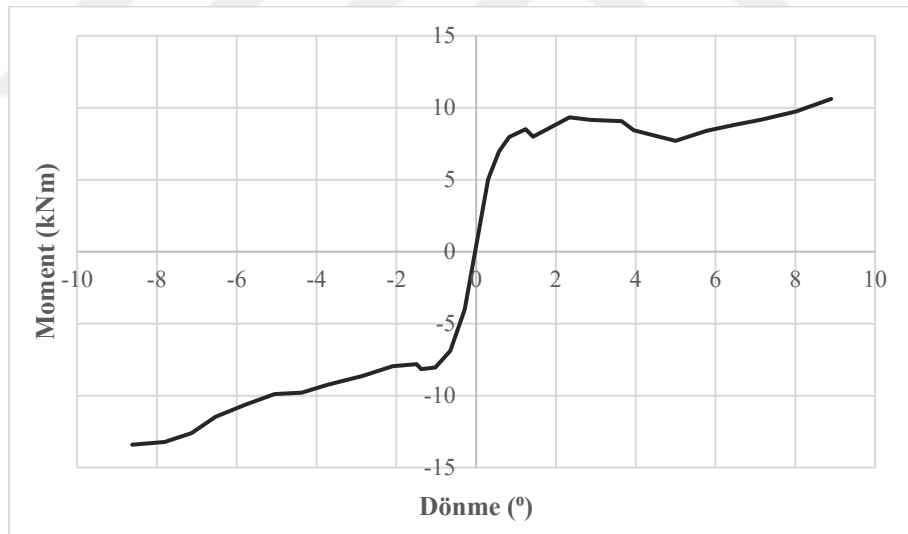
Şekil 4.72 SN-5 numunesinin toplam ve kümülatif tüketilen enerji grafiği

Yataydaki yük hücresi yardımıyla okunan yük değerinin 400 mm'lik moment kolu ile çarpılması sonucunda kolona etki eden moment değerleri belirlenmiştir. Kiriş ucundaki potansiyometrik cetvelden elde edilen deplasmanın kolon ekseninde ölçülen deplasman değerine göre farkı belirlenerek moment kolu mesafesine bölünmesi ile kolonda meydana gelen dönme miktarları belirlenmiştir. Her moment değerine karşılık gelen dönme kullanılarak moment-dönme grafiği elde edilmiştir (Şekil 4.73).



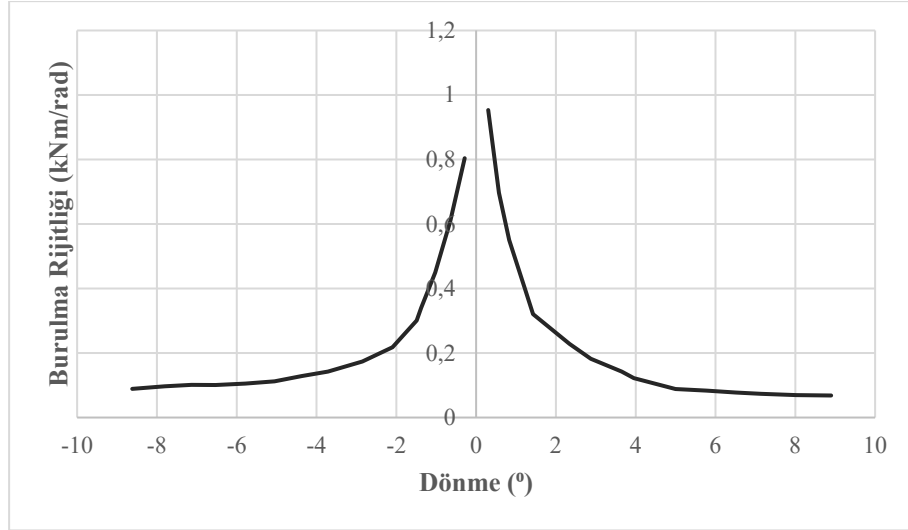
Şekil 4.73 SN-5 numunesinin moment-dönme grafiği

Her bir çevrimde meydana gelen maksimum burulma momentine karşılık gelen dönmenin belirlenmesi ile çevrimsel olarak etki eden burulmanın zarf eğrisi elde edilmiştir (Şekil 4.74).



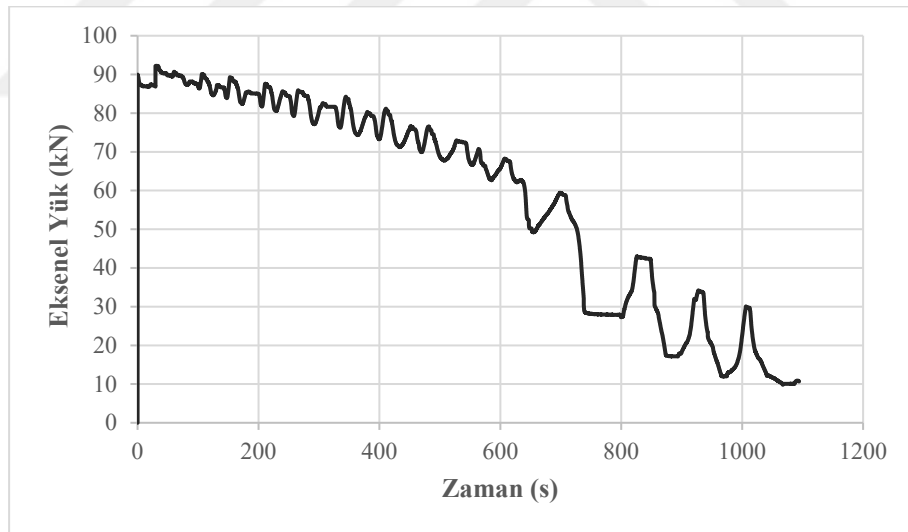
Şekil 4.74 SN-5 numunesinin moment-dönme zarf eğrisi

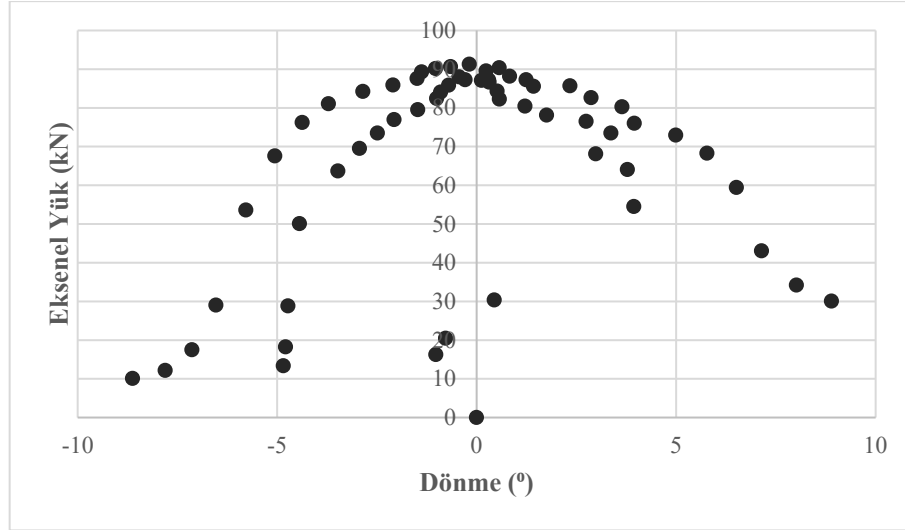
Her bir çevrimde okunan maksimum burulma momentinin, elemanda meydana gelen dönme bölünmesi ile elemanın burulma rijitliği belirlenmiştir (Şekil 4.75).



Şekil 4.75 SN-5 numunesinin burulma rijitliği grafiği

Eleman üzerine etki eden eksenel yük değerinin zamana ve dönmeye bağlı değişimi belirlenerek eksenel yük-zaman grafiği ve eksenel yük dönme grafiği çizilmiştir (Şekil 4.76).





Şekil 4.76 SN-5 numunesinin eksenel yük-zaman ve eksenel yük-dönme grafiği

Kolonun burulma etkisi altında hesaplanan dönme süneklik faktörü itme çevrimi için 6,02; çekme çevrimi için 5,76 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca kolona etki eden momentin kolonun üst orta ve alt yüksekliklerinde sırasıyla 4,4; 0,43; 0,1 derecelik dönme meydana geldiği tespit edilmiştir.

4.1.7. Deney 7 (SN-6)

Çalışma kapsamında test edilen SN-6 numunesinde deney başlangıcında kolon üzerinde $N_d=0,30A_c f_{ck}=108$ kN düzeyinde eksenel yük uygulanmıştır. Deneylere başlamadan önce numune yerine yerleştirilmiş ve deney düzeneği hazırlanmıştır (Şekil 4.77). Çevrimsel yükleme altında test edilecek elemanda deneye başlamadan sistemin genel kontrolü sağlanmıştır.



Şekil 4.77 SN-6 numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

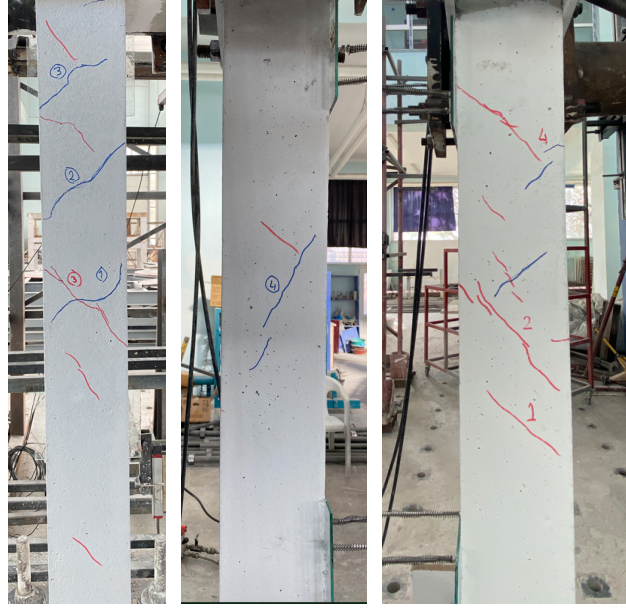
Deney sırasında her bir çevrimde kolon üzerinde gözlemlenen çatlaklar işaretlenmiştir. Elemanda meydana gelen hasar durumları belirlenmiştir (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7 SN-6 numunesinin çatlak analizi

Çevrim		Dönme (°)	Moment (kNm)	Deney Elemanında Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
1	İtme (+)	0,369	3,795	Deneyin ilk iki çevriminde herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-0,327	-2,743	
2	İtme (+)	0,578	4,926	
	Çekme (-)	-0,824	-4,106	
3	İtme (+)	1,009	6,359	*İtme yönünde burulma çatlama meydana gelmiştir. Rijitlik azalmış ve itme yönünde ilk çatlaklar kolon orta bölgesinde meydana gelmiştir.
	Çekme (-)	-1,144	-5,779	*Çekme yönünde burulma çatlama meydana gelmiştir. Rijitlik azalmıştır. Çekme yönünde ilk çatlaklar meydana gelmiştir.
4	İtme (+)	1,159	6,222	Daha önce oluşan çatlaklar uzamıştır.
	Çekme (-)	-1,236	-5,663	Yeni çatlaklar oluştu ve önceki çatlaklar uzamıştır.
5	İtme (+)	1,469	6,407	En büyük çatlak genişliği 0,4 mm olarak ölçülmüştür. Yeni çatlaklar oluşmuştur.
	Çekme (-)	-1,573	-6,472	Oluşan ilk çatlak uzamış ve 0,5 mm kalınlığa ulaşmıştır.
6	İtme (+)	2,135	6,867	Çatlaklar uzamaya devam etmiş ve dallanma oluşmaya başlamıştır. 1,3 mm çatlak genişliğine ulaşılmıştır.
	Çekme (-)	-2,159	-7,158	Önceki çatlaklar uzamış ve dallanmıştır. İtme yönündeki çatlaklarda 1,4 mm çatlak genişliğine ulaşılmıştır.

Çevrim		Dönme (°)	Moment (kNm)	Deney Elemanında Gözlemlenen Çatlak ve Hasar Oluşumu
7	İtme (+)	2,906	7,916	Orta bölgede çatlak genişliği 3,5 mm'yi aşmış ve ilk oluşan çatlaklardan ayrılmalar aşmıştır.
	Çekme (-)	-3,065	-8,961	Kabuk betonu dökülmüştür. Hasarın olmadığı bölgede çatlaklar dallanmaya devam etmiştir.
8	İtme (+)	3,598	9,411	Kabuk betonu dökülmeye devam etmiştir.
	Çekme (-)	-3,682	-9,640	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir.
9	İtme (+)	4,389	11,551	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir.
	Çekme (-)	-4,435	-10,621	Kabuk beton dökülmeye devam etmiştir.
10	İtme (+)	5,052	12,833	Çekirdek betonunda kesme çatlakları oluşmaya başlamıştır.
	Çekme (-)	-4,988	-10,875	Boyuna donatılar eğilmeye başlamıştır.
11	İtme (+)	5,798	14,678	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-5,683	-11,094	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
12	İtme (+)	6,511	14,829	*Maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-6,637	-11,396	*Maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
13	İtme (+)	7,062	14,479	Boyuna donatılarda burkulma meydana gelmiştir.
	Çekme (-)	-7,446	-10,882	Çekirdek betonunda kırılma meydana gelmiştir.
14	İtme (+)	8,000	13,649	Çekirdek betonunda hasar oluşmuş ve donatılarda burkulma artmıştır. Etriyeler açılmaya başlamıştır.
	Çekme (-)	-7,935	-9,798	Etriyeler açılmaya başlamıştır.
15	İtme (+)	8,589	11,578	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
	Çekme (-)	-8,777	-9,380	Yeni çatlak ve hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.
16	İtme (+)	-0,268	0,578	*Deney yüklemesine son verilmiştir.

Kolonda ilk iki çevrimde çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Kolonda meydana gelen ilk çatlak 6,36 kNm moment değerinde meydana gelmiştir. Bu moment değerinde elemenda burulma çatlama meydana gelmiştir. Deney elemanı burulma çatlama noktasına itme çevrimlerinde 6,36 kNm moment ve 1,14° dönme açısı seviyesinde ulaşırken çekme çevrimlerinde 5,77 kNm moment ve 1,01° dönme açısında burulmada çatlama gerçekleşmiştir (Şekil 4.78). Kolonda meydana gelen ilk çatlaklar yoğun olarak kolonun 2 yüzünde ve kenarın orta noktasında meydana gelmiştir.



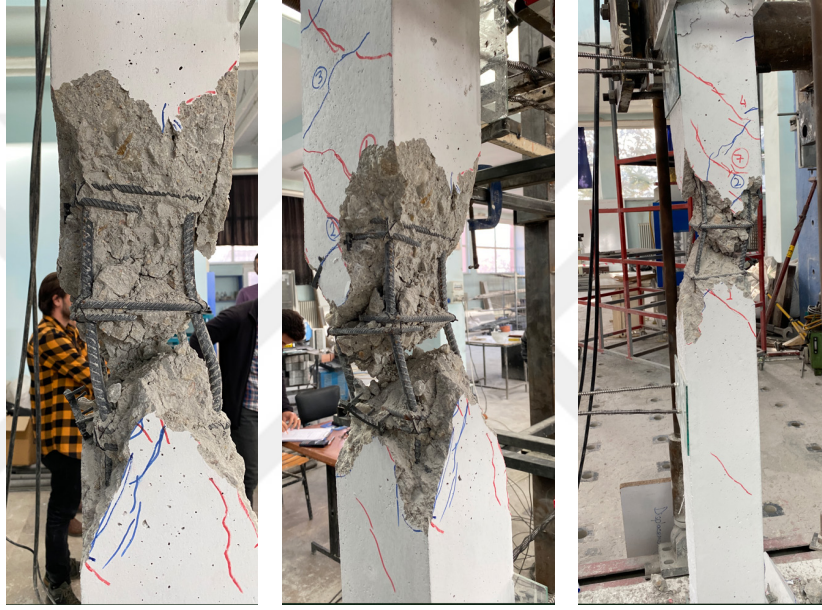
Şekil 4.78 SN-6 numunesinin burulma çatlama düzeyinde hasar durumu

Deney elemanı itme çevrimlerinde 14,83 kNm moment değerinde, çekme çevrimlerinde 11,40 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değerine ulaşılan kadar elemanda itmede 6,51°'lik, çekmede ise 6,63°'lik dönme meydana gelmiştir (Şekil 4.79). Maksimum moment değerinde oluşan çatlaklar incelendiğinde çatlakların genellikle kolon orta ve üst bölgesine yakın olduğu hasarın da bu bölgede meydana geldiği görülmüştür.



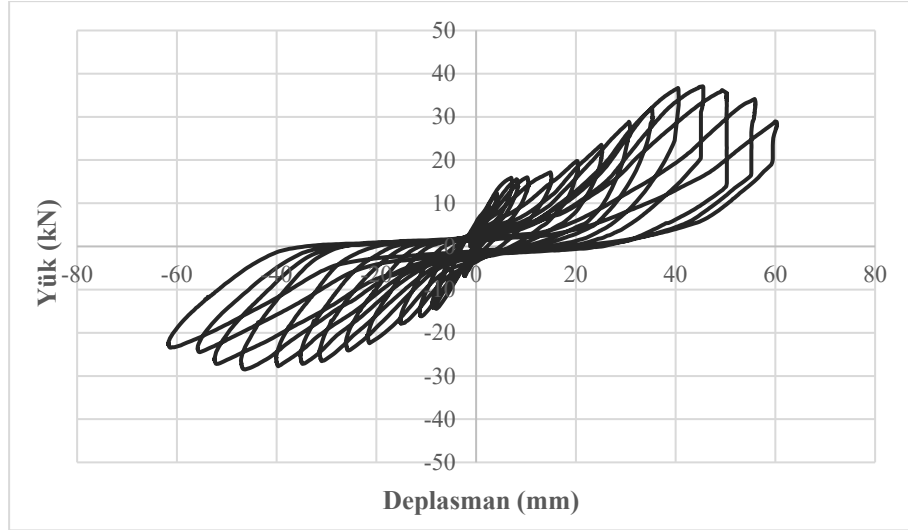
Şekil 4.79 SN-6 numunesinin maksimum burulma kapasitesinde hasar durumu

Burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra moment değeri kapasitenin %20'si oranında azaldığı noktaya kadar deney devam ettirilmiştir. Deney düzeneğinin izin verdiği sınır yükleme durumuna ulaşıldığından ve deney sistemindeki zorlanmaların artması nedeniyle deney sonlandırılmıştır. Burulma taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra kolonun burulma taşıma gücü azalmış ancak kolonda bir miktar daha dönme meydana gelmiştir. Nihai durumda elemanda itme çevriminde 11,57 kNm moment ve 8,58° dönme meydana gelirken, çekmede 9,37 kNm moment etkisi ve 8,77° dönme etkisi oluşmuştur (Şekil 4.80).



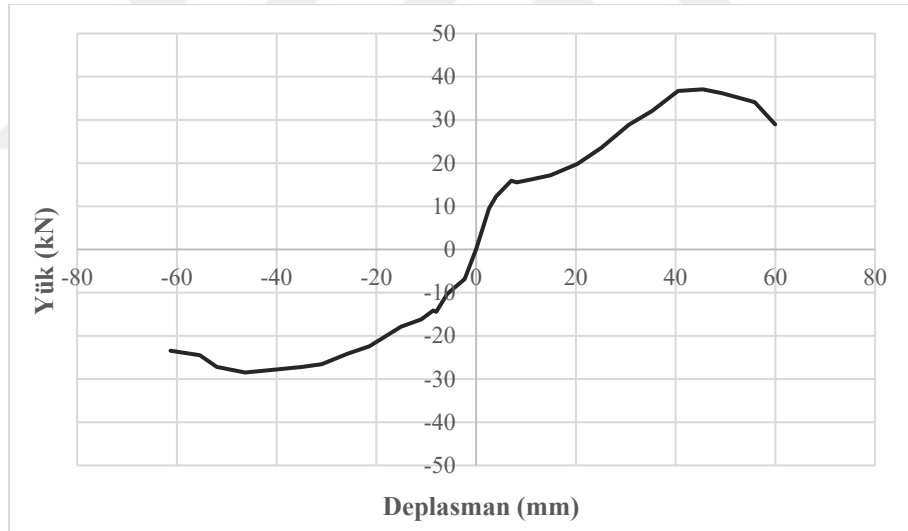
Şekil 4.80 SN-6 numunesinin nihai durumda hasar durumu

Deneyler sırasında eleman üzerine yerleştirilen yük hücresi ve potansiyometrik cetvellerden alınan yük ve deplasman verileri kullanılarak elemanın burulma davranışını belirlemek amacıyla çeşitli grafikler çizilmiştir. Yatay yük kolon eksenine 400 mm mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Buna karşılık deplasman verileri giriş ucundaki ve kolon eksenindeki potansiyometrik cetvellerin farkından oluşmuştur (Şekil 4.81).



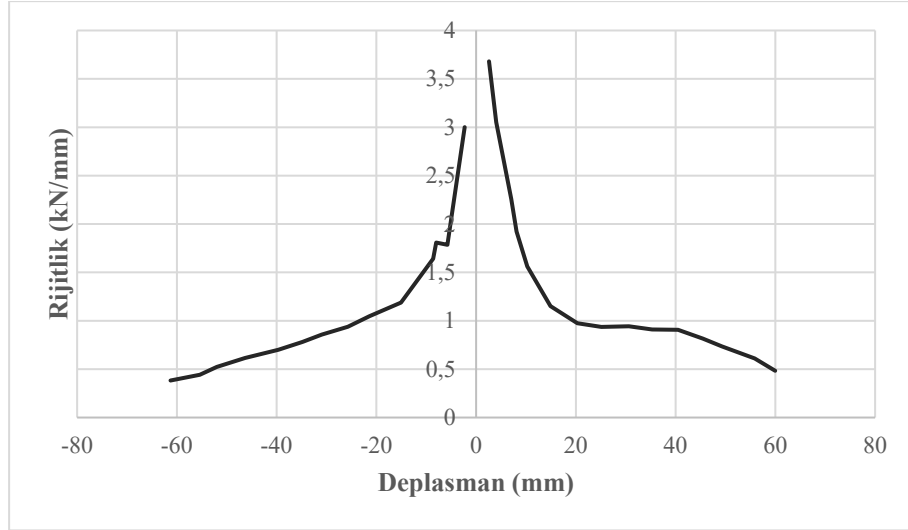
Şekil 4.81 SN-6 numunesinin yük-deplasman grafiği

Her bir çevrimde meydana gelen maksimum yüke karşılık gelen deplasmanın belirlenmesi ile çevrimsel olarak etki eden yükün zarf eğrisi elde edilmiştir (Şekil 4.82).



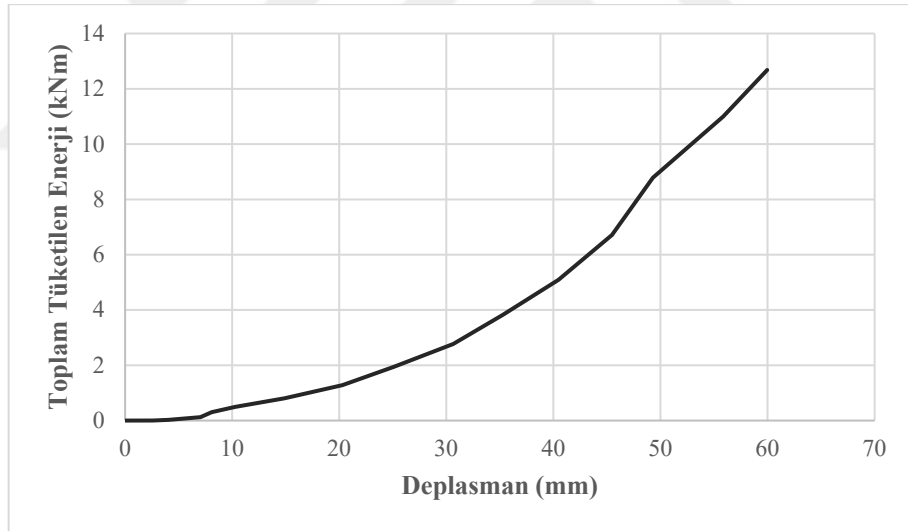
Şekil 4.82 SN-6 numunesinin yük-deplasman zarf eğrisi

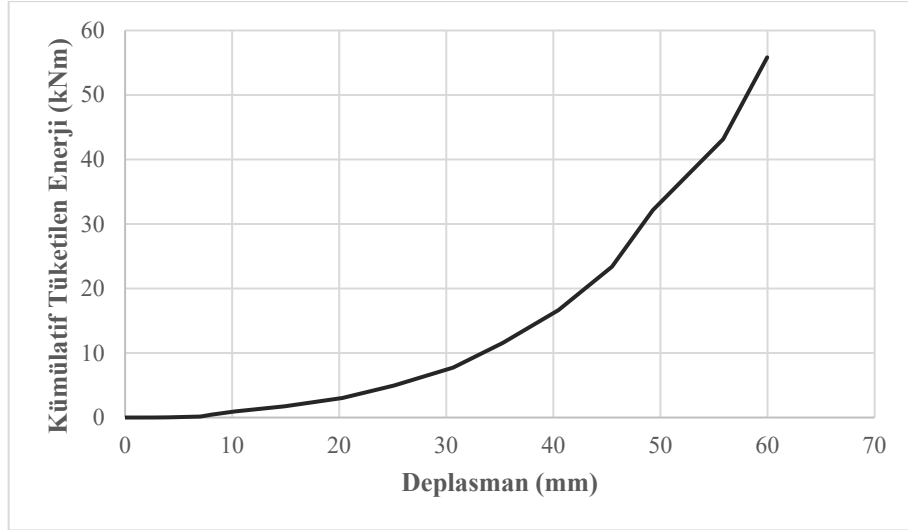
Deneylerde her yük çevriminde elde edilen yükün o çevrimde meydana gelen deplasmana oranı belirlenerek rijitlik-deplasman grafikleri elde edilmiştir (Şekil 4.83).



Şekil 4.83 SN-6 numunesinin rijitlik grafiği

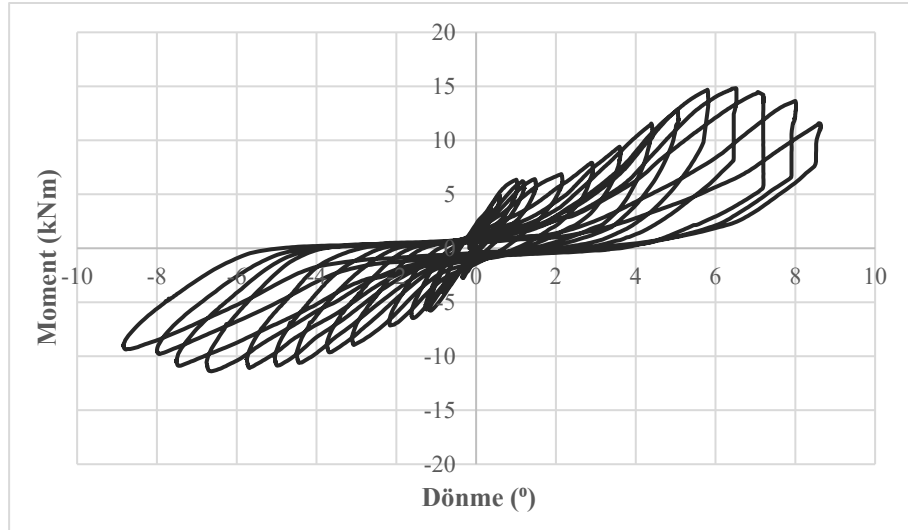
Deney numunesinde yük-deplasman eğrisinin altında kalan alanın belirlenmesi ile tüketilen toplam enerji ve tüketilen kümülatif enerji grafiği hazırlanmıştır (Şekil 4.84).





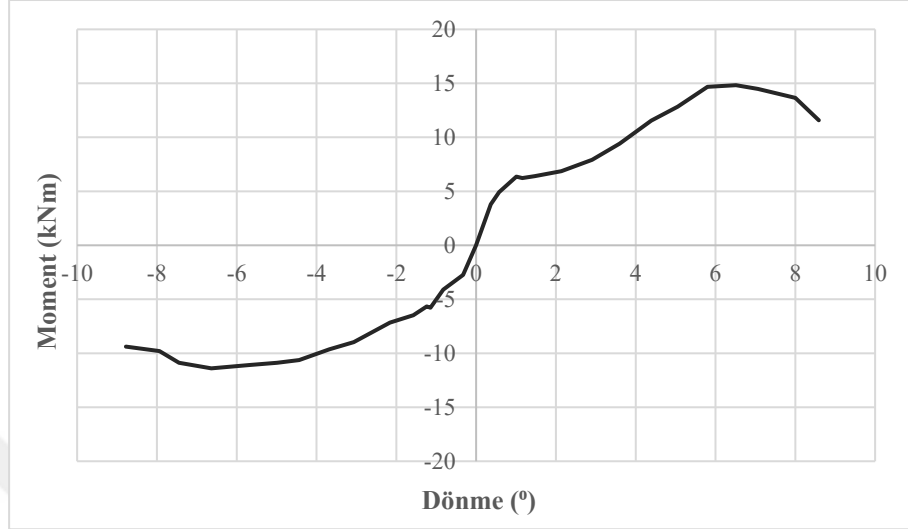
Şekil 4.84 SN-6 numunesinin toplam ve kümülatif tüketilen enerji grafiği

Yataydaki yük hücresi yardımıyla okunan yük değerinin 400 mm’lik moment kolu ile çarpılması sonucunda kolona etki eden moment değerleri belirlenmiştir. Kiriş ucundaki potansiyometrik cetvelden elde edilen deplasmanın kolon ekseninde ölçülen deplasman değerine göre farkı belirlenerek moment kolu mesafesine bölünmesi ile kolonda meydana gelen dönme miktarları belirlenmiştir. Her moment değerine karşılık gelen dönme kullanılarak moment-dönme grafiği elde edilmiştir (Şekil 4.85).



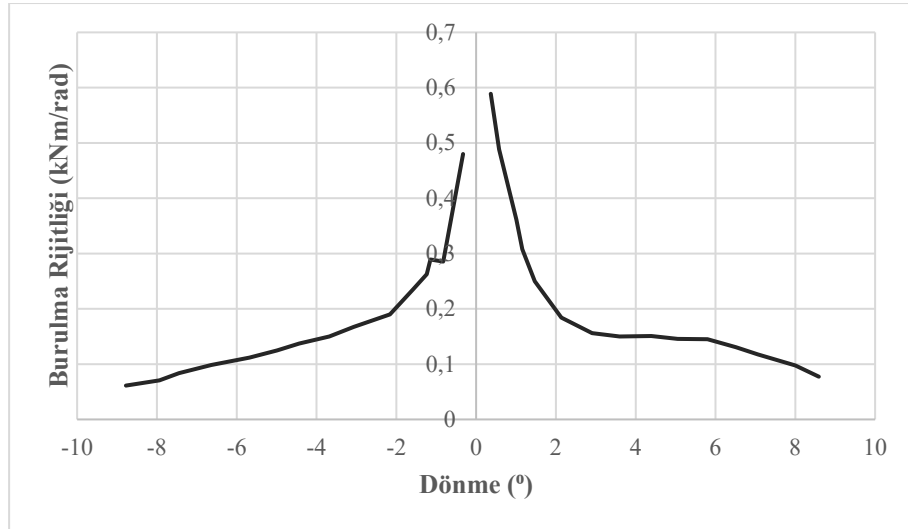
Şekil 4.85 SN-6 numunesinin moment-dönme grafiği

Her bir çevrimde meydana gelen maksimum burulma momentine karşılık gelen dönmenin belirlenmesi ile çevrimsel olarak etki eden burulmanın zarf eğrisi elde edilmiştir (Şekil 4.86).



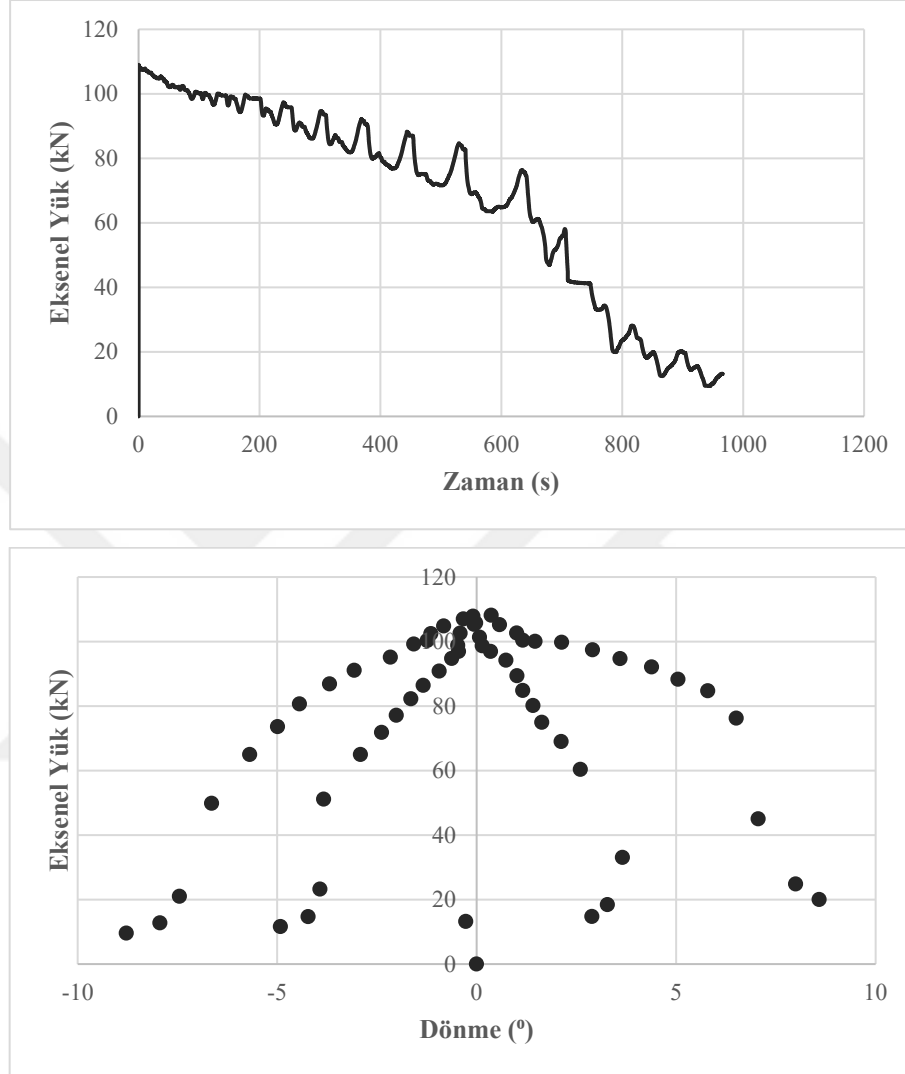
Şekil 4.86 SN-6 numunesinin moment-dönme zarf eğrisi

Her bir çevrimde okunan maksimum burulma momentinin, elemanda meydana gelen dönmeye bölünmesi ile elemanın burulma rijitliği belirlenmiştir (Şekil 4.87).



Şekil 4.87 SN-6 numunesinin burulma rijitliği grafiği

Eleman üzerine etki eden eksenel yük değerinin zamana ve dönmeye bağlı değişimi belirlenerek eksenel yük-zaman grafiği ve eksenel yük dönme grafiği çizilmiştir (Şekil 4.88).



Şekil 4.88 SN-6 numunesinin eksenel yük-zaman ve eksenel yük-dönme grafiği

Kolonun burulma etkisi altında hesaplanan dönme süneklik faktörü itme çevrimi için 8,00; çekme çevrimi için 7,70 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca kolona etki eden momentin kolonun üst orta ve alt yüksekliklerinde sırasıyla 5,09; 1,91; 0,13 derecelik dönme meydana geldiği tespit edilmiştir.

4.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

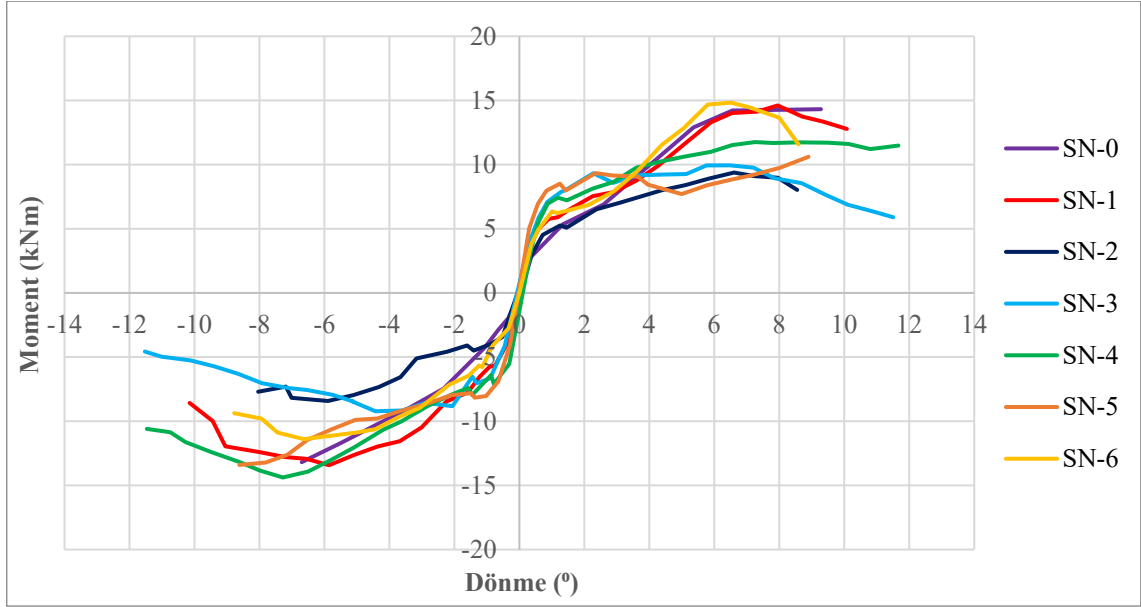
Deneylerden elde edilen deneysel veriler, çalışmanın amacına ulaşması ve eksenel yük etkisindeki kolonun burulma davranışının incelenmesi amacıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda grafiklerin yanı sıra elemanların hasar durumları, davranış biçimleri, çatlak dağılımları hasar bölgeleri, dönme miktarları, kapasiteleri ve süneklikleri de irdelenmiştir. Deney elemanlarının grafiklerinin karşılaştırmasında;

- Moment-Dönme Grafiği
- Burulma Rijitliği Grafiği
- Kümülatif Tüketilen Enerji Grafiği
- Kolonda Eksenel Yükün Değişimi Grafiği

kullanılmıştır.

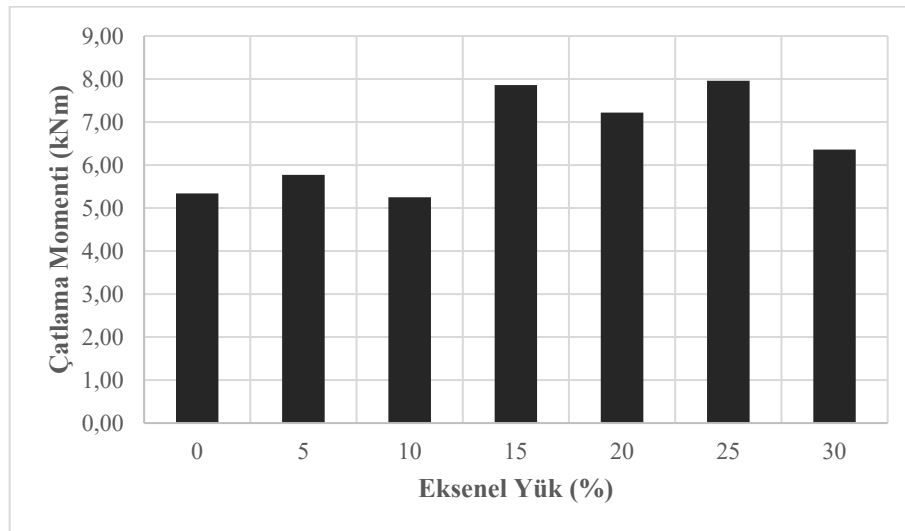
4.2.1. Moment-dönme grafiklerinin karşılaştırılması

Deneylerde her çevrimden elde edilen moment ve dönme açısı verileri elde edilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak elemanların moment-dönme grafikleri elde edilmiştir. Kolonda eksenel yük seviyesinin belirlenebilmesi amacıyla farklı eksenel yük seviyesinde bulunan deney numunelerinde elde edilen moment-dönme grafikleri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.89).



Şekil 4.89 Numunelerin moment-dönme değerlerinin karşılaştırılması

Numunelerde, burulma çatlama momenti değeri hem itme hem çekme çevrimlerinde eksenel yük seviyesine bağlı artmıştır. Burulma çatlama momenti, SN-0, SN-1, SN-2 numunelerinde yaklaşık 5 kNm iken eksenel yük seviyesinin arttığı SN-3, SN-4 ve SN-5 numunelerinde %40 oranında artarak 7-8 kNm aralığında ölçülmüştür. Eksenel yükün %30 seviyesine çıktığı SN-6 numunesinde burulmada çatlama momenti %20 oranında azalmıştır (Şekil 4.90).

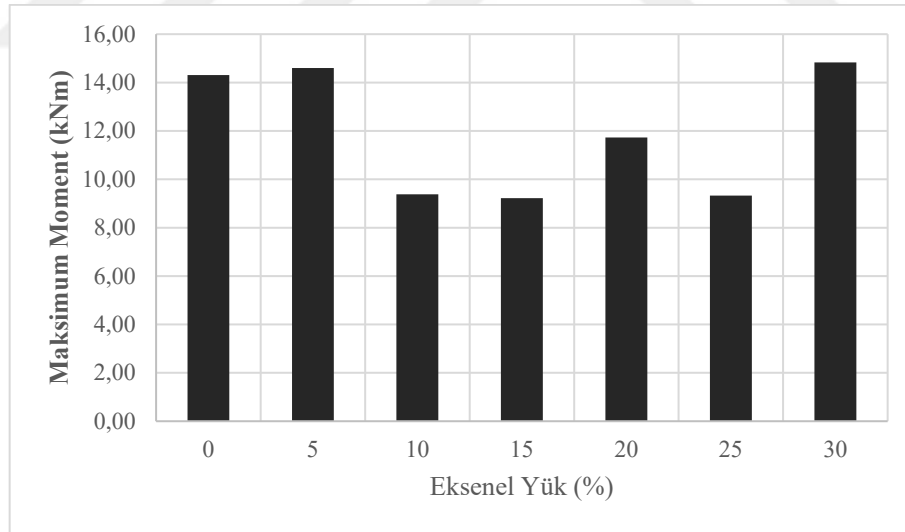


Şekil 4.90 Farklı eksenel yük seviyelerinde çatlama momenti

Çatlama momenti değerinde numunelerin dönme açısı $0,80-1,5^{\circ}$ arasındadır. Çekme yönünde dönme açısı $0,89-2,12^{\circ}$ arasında ölçülmüştür. Burulma çatlama noktası tüm kolonlarda birbirine yakın dönme açıları arasında gerçekleşirken, burulmada çatlama momenti tüm elemanlarda birbirinden farklıdır.

Deneylerden elde edilen moment-dönme grafiklerine göre, tüm numuneler için başlangıç rijitlikleri benzerdir. Çatlama sonrasında tüm elemanlarda rijitlik %90'a yakın oranda azalmıştır. Kolonda %15 ve %20 seviyesinde eksenel yük bulunan SN-3 ve SN-4 numuneleri diğer numunelere göre daha sünek davranış göstermiş ve daha fazla dönme etkisine maruz kalmıştır.

Elemana etki eden maksimum burulma momenti değeri SN-0 ve SN-1 numunelerinde 14 kNm mertebesinde iken, eksenel yükün artması ile 9 kNm'ye düşmüştür. En yüksek eksenel yük seviyesindeki SN-6 numunesinde ise tekrar 14 kNm seviyesinde ölçülmüştür. SN-0, SN-1 ve SN-6 numunelerinde çatlama sonrasındaki burulma rijitliği değeri de diğer numunelere göre daha yüksektir. Bu nedenle elemanda burulma taşıma kapasitesi artmıştır. Eksenel yük değerinin %10 ile %25 seviyesinde daha düşük burulma momenti taşıma kapasitesi ölçülmüştür (Şekil 4.91).



Şekil 4.91 Farklı eksenel yük seviyelerinde maksimum moment

Deneyler sonucunda, numunelerin burulma çatlama momenti ve bu moment değerinde meydana gelen dönmenin açısı; maksimum burulma momenti taşıma kapasitesi ve bu kapasitede yapacağı dönme açısı belirlenmiştir (Çizelge 4.8).

Çizelge 4.8 Tüm numunelerde kritik moment ve dönme değerleri

Numune	Çatlama Momenti (kNm)		Çatlama Dönme Açısı (°)		Maksimum Burulma Momenti (kNm)		Maksimum Burulma Dönme Açısı (°)	
	İtme (+)	Çekme (-)	İtme (+)	Çekme (-)	İtme (+)	Çekme (-)	İtme (+)	Çekme (-)
SN-0	5,34	-4,26	1,33	-1,07	14,31	-13,19	9,28	-6,69
SN-1	5,77	-5,75	0,90	-0,92	14,60	-13,43	7,95	-5,86
SN-2	5,25	-4,49	1,25	-1,40	9,38	-8,42	6,60	-5,89
SN-3	7,86	-6,65	1,28	-0,89	9,22	-9,76	5,14	-7,20
SN-4	7,22	-7,96	1,46	-2,12	11,73	-14,38	8,59	-7,27
SN-5	7,96	-7,81	0,83	-1,48	9,33	-9,89	2,34	-5,05
SN-6	6,36	-5,78	1,00	-1,14	14,83	-11,40	6,51	-6,63

Nihai taşıma gücündeki dönme değerinin, burulmada çatlama noktasındaki dönme değerine oranı olarak ifade edilen dönme süneklik faktörü, elemanın dönme etkisindeki sünekliğini belirlemek açısından önemlidir. Çizelge 4.9’da deney numunelerine ait dönme süneklik faktörü değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.9 Deney numunelerinin dönme süneklik faktörü

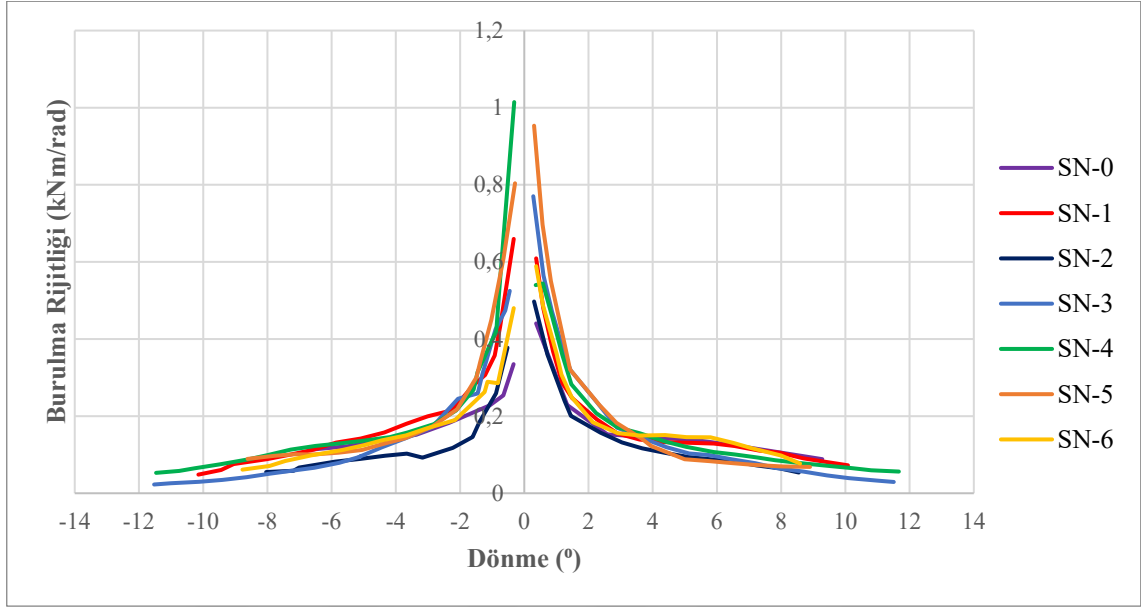
Numune	Dönme Süneklik Faktörü	
	İtme (+)	Çekme (-)
SN-0	6,97	6,25
SN-1	11,20	11,03
SN-2	6,84	5,70
SN-3	7,18	7,98
SN-4	7,39	7,09
SN-5	6,02	5,76
SN-6	8,00	7,70

Çizelgeye göre tüm numunelerde birbirine yakın dönme süneklik faktörü hesaplanmıştır. Yalnızca SN-1 numunesi, dönme etkilerinde daha sünek davranış göstermiştir. Bu numunede oluşan çatlaklar incelendiğinde çatlakların kolon boyunca yayıldığı ve hasarın geniş bir bölgede meydana geldiği görülmüştür.

4.2.2. Rijitlik grafiklerinin karşılaştırılması

Numunelerin burulma etkisine karşı nasıl bir davranış sergilediğini belirlemek için tüm çevrimlerde, burulma etkisindeki rijitlik değerleri belirlenmiştir. her çevrimden elde edilen moment ve dönme açısı verileri kullanılarak hesaplanan rijitlik değeri

elemanın burulma ve dönme etkilerine ne kadar mukavemet gösterdiğini belirtmektedir. Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak elemanların rijitlik-dönme grafikleri elde edilmiştir. Kolonda aksenal yük seviyesinin davranışa etkisinin belirlenebilmesi amacıyla tüm numunelerdeki rijitlik grafikleri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.92).



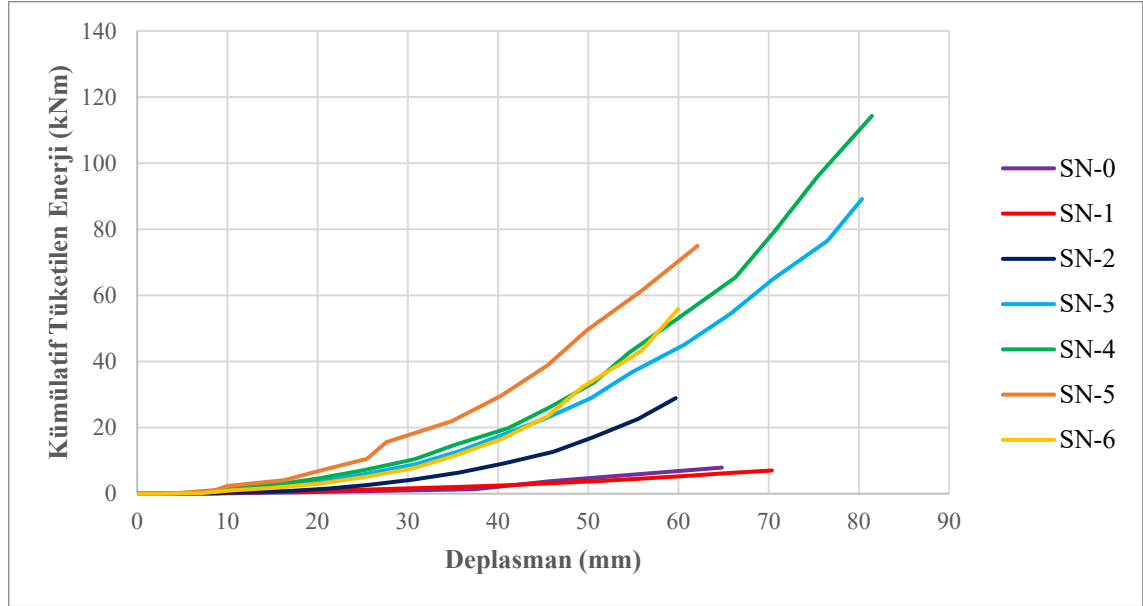
Şekil 4.92 Numunelerin burulma rijitliği değerlerinin karşılaştırılması

Deneylerde tüm kolonlara aynı dönme etkisi verilmiştir. Ancak elemanın bu etkiye karşı gösterdiği direnç tüm numunelerde farklıdır. Davranış rijitliğe bağlı değişmektedir. Aksenal yük bulunmayan SN-0 numunesinde ve SN-2 numunesinde başlangıç rijitliği 0,3 kNm/rad seviyesindedir. Eleman üzerinde aksenal yükün artması elemanın burulma rijitliğini arttırmıştır. İlk çevrimlerde SN-3, SN-4 ve SN-5 numunelerinin başlangıç burulma rijitlikleri sırasıyla 0,78; 0,97; 0,95 kNm/rad olarak ölçülmüştür.

Tüm numunelerde 0,2-1 kNm/rad aralığında olan burulma rijitlikleri, çatlamanın oluşması ile 0-0,2 kNm/rad seviyesine düşmektedir. Burulma çatlama oluşması ile burulma rijitliği %90'a yakın oranda azalmıştır. Rijitliğin azalması ile elemanda gevrek ve ani kırılmalar meydana gelmiştir. Burulma rijitliği azalan elemanda aksenal yük seviyesinin artması ile boyuna donatılarda burkulmalar ve çekirdek betonunda büyük hasarlar gözlemlenmiştir.

4.2.3. Kümülatif tüketilen enerji kapasitelerinin karşılaştırılması

Elemanlarda burulma etkisinde harcanan enerjilerin belirlenmesi ve karşılaştırılması amacıyla deney boyunca tüketilen toplam enerji miktarları belirlenmiş ve bu değerler her çevrim için eklenerek deneydeki kümülatif enerji grafikleri elde edilmiştir. Elemanın tükettiği enerjilerin karşılaştırması yapılmıştır (Şekil 4.93).

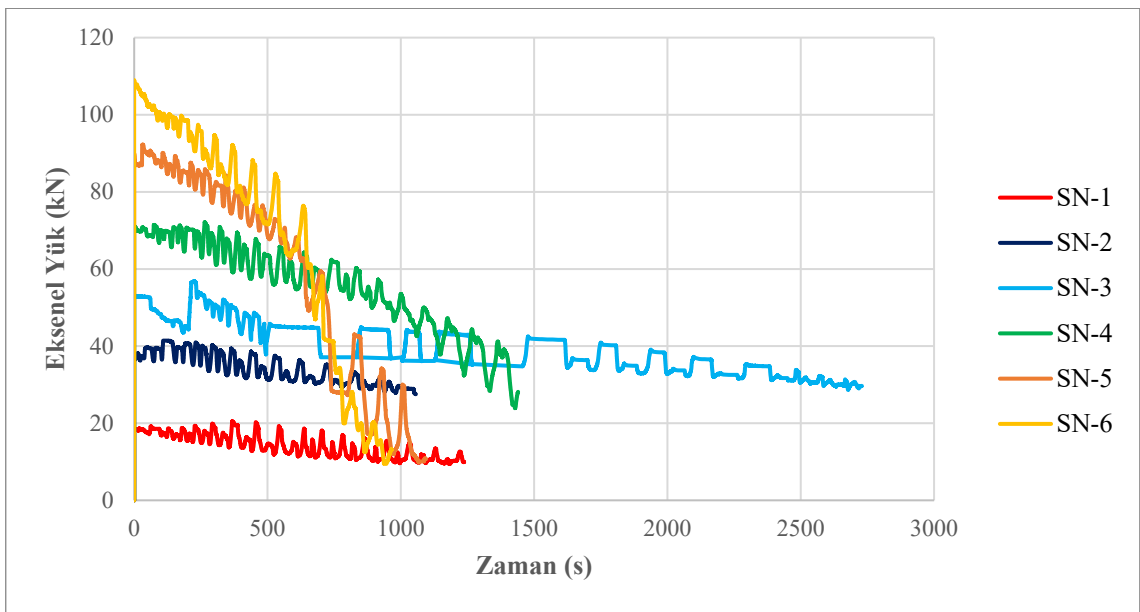


Şekil 4.93 Numunelerin kümülatif enerji tüketimlerinin karşılaştırılması

Deney boyunca SN-0 ve SN-1 numuneleri 7-8 kNm enerji tüketmiştir. Eksenel yük seviyesi %10 ve üzerinde olan numuneler, eksenel yükün az olduğu veya bulunmadığı SN-0 ve SN-1 numunelerine göre 14 kata kadar daha fazla enerji tüketmiştir. SN-3 ve SN-4 numunelerinin kümülatif tüketilen enerji değerleri sırasıyla 90 ve 110 kNm ölçülmüştür. Bu numuneler diğerlerine göre daha fazla dönme etkisine maruz kalmış ve daha fazla enerji tüketmiştir. SN-5 ve SN-6 numunesinde eksenel yükün artması ile numunenin tükettiği enerji miktarı %40 oranında azalmıştır.

4.2.4. Eksenel yük değişimlerinin karşılaştırılması

Deneylerin başlangıcında kolon üzerinde sabit eksenel yük etkisi oluşturulmuştur. Deneyler boyunca burulma etkisindeki kolonun üzerinde bulunan eksenel yükün değişimi incelenmiştir. Burulmanın elemana etki etmesi ile kolonda oluşan dönme nedeniyle eleman uzamaya çalışmıştır. Eleman üzerinde eksenel sıkıştırma etkisi bulunması nedeniyle uzama engellendiğinden, kolonda ekstra eksenel yük oluşmuştur. Tüm numunelerde çatlakların oluşması ile elemanın üzerindeki sıkışmanın azalması nedeniyle eksenel yük giderek azalmıştır (Şekil 4.94).

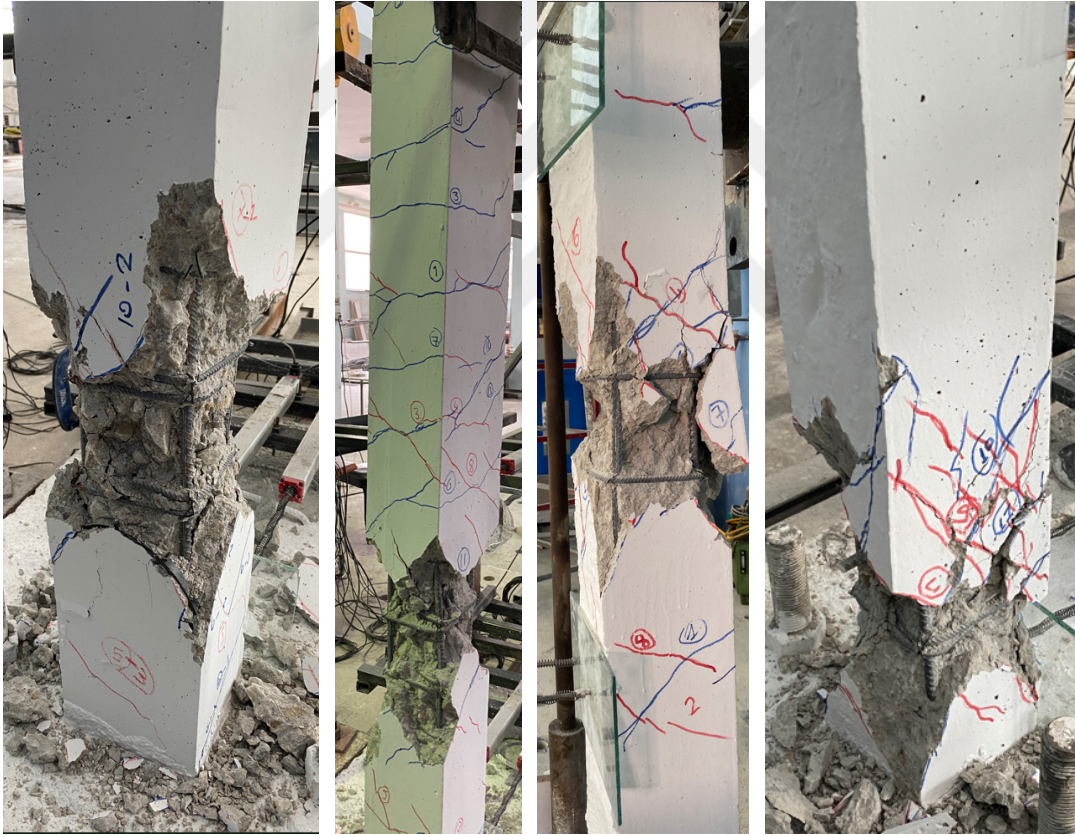


Şekil 4.94 Numunelerin eksenel yük karşılaştırılması

Numuneler üzerindeki eksenel yük değişimi incelendiğinde SN-6 haricindeki tüm numunelerde burulma etkisiyle eksenel yükte %2 ile %10 oranında artış gözlemlenmiştir. Hemen hemen yakın sürelerde gerçekleştirilen deneylerde eksenel yükün artması ile eksenel yük daha hızlı ve daha fazla büyük adımlarla azalmıştır.

4.2.5. Hasar durumlarının karşılaştırılması

Deneyler sonucunda elde edilen veriler haricinde davranış konusunda bilgi verebilecek bazı gözlemsel veriler ve belirlenen bazı özellikler bulunmaktadır. Burulma etkisindeki kolonda burulma çatlama, maksimum burulma momenti taşıma kapasitesi, burulma etkisindeki elemanın dönme sünekliği, kolonda meydana gelen çatlak durumları ve dağılımları, hasarın meydana geldiği kolon bölgesi gibi verilerdir. Grafiklerin yanında bu verilerin de incelenmesi kolonların burulma etkisindeki davranışını belirlemek konusunda fikir vermektedir. Kolonlarda meydana gelen hasarın yeri burulma ve burulma davranışı açısından önem taşımaktadır. Deney numunelerinde meydana gelen hasarlar ve hasar bölgeleri sırasıyla Şekil 4.95' te verilmiştir.





Şekil 4.95 Numunelerde hasar gören bölgelerin karşılaştırılması

Hasar durumları incelendiğinde SN-0 ve SN-4 numunelerinde hasarın kolon alt bölgesinde olduğu, diğer numunelerde ise kolon orta bölgesine yakın noktalarda olduğu tespit edilmiştir.

Numunelerde oluşan çatlaklar incelendiğinde çatlakların çoğunlukla kolon kenarının ortasında kayma gerilmelerinin en yüksek olduğu kısımdan başlayarak kenarlara doğru devam ettiği ve kolonun diğer kenarına devam ettiği görülmüştür. Numunelerde çoğunlukla kolon boyunca çatlaklar görülmüştür. Oluşan çatlaklar kolon boyunca devam eden diyagonal çatlaklardır. Elemanlarda hasar genellikle ilk çatlakların olduğu bölgede meydana gelmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında yürütülen bu tez çalışması kapsamında, farklı eksenel yük seviyelerindeki kolonlarda, burulma etkisi altındaki davranış incelenmiştir.

Çalışma kapsamında eksenel yük seviyesinin yanı sıra, burulma etkisindeki kolonun davranışı, burulmanın oluşumu ve kolon üzerindeki etkileri, burulma etkisindeki kolonda meydana gelen hasarlar incelenmiştir. Çalışma kapsamında 7 adet kolon numunesi tasarlanan burulma deney düzeneğinde test edilmiştir. Kolonlarda değişken olarak eksenel yük seviyeleri dikkate alınmıştır. Düzeneğin kurulumu ve çalıştırılması amacıyla 2 adet ön deney numunesi kullanılmıştır. Numunelerin üretimi ve deney düzeneğinin kurulumunun ardından testler gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler bilgisayar ortamına aktarılmış; gerekli düzenlemeler ve hesaplamalar sonucunda son haline getirilmiştir. Elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Davranışın belirlenmesi amacıyla gözlemsel veriler kaydedilmiştir.

Çalışma kapsamında test edilen deney elemanlarının burulmada çatlama momentleri, burulma momenti taşıma kapasiteleri, dönme miktarları, hasar durumları değerlendirilmiştir.

5.1. Sonuçlar

- Tasarlanan deney düzeneği ile kolon üzerinde eksenel yük ve burulma etkileri oluşturulmuştur. Yapılan ön deneylerde burulmanın etkimesi sonucunda kolonun dört yüzünde devam eden, kolon boyunca ve 45° açılı, diyagonal burulma çatlaklarının oluşumu gözlemlenmiştir.
- Eksenel yük ve burulma etkilerinin incelendiği çalışmada, kolonda yatay yükün etkisi ile eğilme meydana gelmesi istenmemiştir. Bu amaçla kolon üzerine yerleştirilen gijon yardımıyla kolon duvara sabitlenmiştir. Elemanda meydana gelen eğilme ihmal edilebilecek seviyelerde kalmıştır.
- Eksenel yük etkisindeki kolonun burulma etkisi oluştuğunda serbestçe dönebilmesi için tasarlanan bilyeli döner mafsal, üzerine gelen eksenel yükü taşımaktadır ve tüm testlerde döner mafsal sistemin çalıştığı gözlemlenmiştir.

- Üretim kolaylığı sağlamak amacıyla ayrı ayrı üretilen kolon ve temel grout harcı ile birleştirilmiştir. Yapılan testlerde yüksek dayanıma sahip bu harç ile yapılan kolon temel birleşiminde hiçbir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir.
- Numunelerde, rijitliği büyük oranda azaltan burulma çatlama momenti değeri hem itme hem çekme çevrimlerinde eksenel yük seviyesine bağlı artmıştır. Burulma çatlama momenti, eksenel yükün %10 seviyesine kadar yaklaşık 5 kNm, bu eksenel yük seviyesinin üstündeki yüklemelerde ise 7-8 kNm olarak ölçülmüştür. Çatlama momenti değerinde meydana gelen dönmeler incelendiğinde numunelerin dönme açısı 0,80-1,5° arasındadır. Çekme yönünde ise dönme açısı 0,89-2,12° arasında değişmiştir. Burulma çatlama noktası tüm kolonlarda birbirine yakın dönme açılarında gerçekleşirken, burulmada çatlama momenti tüm elemanlarda birbirinden farklıdır. Buna göre yönetmeliklerdeki burulma çatlama hesaplarında belirtilen kesit boyutları ve malzeme özelliklerinin yanı sıra elemana etki eden yükler de çatlama momenti değerini etkilemiştir.
- Elemana etki eden maksimum burulma momenti değeri SN-0 ve SN-1 numunelerinde 14 kNm mertebesinde iken, eksenel yükün artması ile 9 kNm'ye düşmüştür. En yüksek eksenel yük seviyesindeki SN-6 numunesinde ise tekrar 14 kNm seviyesinde ölçülmüştür. SN-0, SN-1 ve SN-6 numunelerinde çatlama sonrasındaki burulma rijitliği diğer numunelere göre daha yüksektir. Bu nedenle elemanda burulma taşıma kapasitesi artmıştır. Eksenel yük değerinin %10 ile %25 seviyesinde burulma momenti taşıma kapasitesini azaldığı görülmektedir. Bu durumda gerçek yapılarda burulma hasarının, orta seviyeli eksenel yük taşıyan ara kat kolonlarında ortaya çıkması beklenebilir.
- Orta seviyede eksenel yük taşıyan SN-3 ve SN-4 elemanlarında daha fazla dönme etkisi oluşurken, bu elemanlarda maksimum moment taşıma kapasiteleri daha düşük seviyede kalmıştır. Eksenel yükün orta seviyelerde etki ettiği kolonların, burulma bakımından daha kritik olduğu görülmüştür.
- Deneysel çalışmada çatlama sonrasında eleman davranışı tamamen değişmiştir. Çatlama noktasına kadar eksenel yükün burulmaya etkisi doğrusal olarak artış gösterirken, çatlama sonrasında elemanda eksenel yükün yanı sıra hasarların durumları, hasar meydana gelen bölgeler, kesitlerde meydana gelen çarpılma gibi nedenlerle betonarme davranışı karmaşıklaşmıştır.

- Deneylerde tüm numuneler için başlangıç rijitlikleri birbirine yakın değerdedir. Yalnızca aksenal yük bulunmayan SN-0 numunesinde başlangıç rijitliği ve burulma çatlama sonrası rijitlik değeri, diğer numunelere göre daha düşük seviyededir. Eleman üzerinde aksenal yükün bulunması elemanın burulma rijitliğini arttırmıştır. İlk çevrimlerde SN-3, SN-4 ve SN-5 numunelerinin başlangıç burulma rijitlikleri diğer numunelere göre daha fazladır. Ancak bu elemanlar daha düşük burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir.
- Tüm numunelerde çatlamanın oluşması ile 0,6-1 kNm/rad seviyesinde olan burulma rijitlikleri, çatlama sonrası 0-0,2 kNm/rad seviyesine düşmektedir. Burulma çatlama sonrası oluşması ile burulma rijitliği %90'a yakın oranda azalmıştır. Rijitliğin azalması ile elemanda gevrek ve ani kırılmalar meydana gelmiştir. Burulma rijitliği azalan elemanda aksenal yük seviyesinin artması ile boyuna donatılarda burkulmalar ve çekirdek betonunda büyük hasarlar gözlemlenmiştir.
- Tüm deneyler için enerji tüketim değerleri incelendiğinde aksenal yük bulunan elemanlar, aksenal yükün az olduğu veya bulunmadığı elemanlara göre daha fazla enerji tüketmiştir. SN-3 ve SN-4 numunelerinin kümülatif tüketilen enerji değerleri diğer numunelerden oldukça yüksektir. Bu numuneler diğerlerine göre daha fazla dönme etkisine maruz kalmıştır. Aksenal yükün %25-%30 mertebesine çıkması ile numunenin sünekliği azalmış, bu nedenle tüketilen enerji miktarı da azalmıştır. Deney boyunca SN-0 ve SN-1 numuneleri 7,00-8,00 kNm enerji tüketmiştir. Burulmanın deprem etkisinde meydana geleceği düşünüldüğünde, %15-20 aksenal yük seviyesinde bulunan elemanların deprem etkisinde daha fazla enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.
- Tüm numunelerde dönme süneklikleri birbirine yakın seviyede iken SN-1 numunesi dönme etkilerinde daha sünek davranış göstermiştir. SN-1 numunesinde meydana gelen çatlaklar incelendiğinde tüm kolon boyunca ve birbiri ile uyumlu çatlaklar oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle eleman burulma çatlama sonrasında daha sünek bir davranış sergilemiştir. Aksenal yük seviyesinin değişimi ile dönme sünekliği arasında bir bağlantı kurulamamıştır. Ancak kolonun dönmeye karşı sünek davranış göstermesinin, elemanda meydana gelen çatlakların dağılımına ve kesitin homojenliğine bağlı olduğu düşünülmektedir.

- Elemanda burulmanın etkisiyle çok düşük seviyede kalan boyuna uzama gözlemlenmiştir. Deney başlangıcında kolon üzerine uygulanan aksenal yük, elemanda meydana gelen uzama nedeniyle bir miktar artmış, elemanda burulma çatlama oluşması ile deney sonuna kadar azalmıştır. Eleman üzerindeki aksenal yük değeri ile aksenal yükün azalma hızı orantılıdır.
- Kolonlarda burulma etkileri deprem meydana geldiğinde oluşmaktadır. Depremi benzeştirmek amacıyla deneylerde çevrimsel burulmaya maruz bırakılmıştır. İtme ve çekme çevrimlerinde çatlama momenti, maksimum moment değerleri ve bu değerlerde meydana gelen dönme açıları birbirine yakın değerlerdedir. Deney düzeneğinin ve ölçümlerin bu bakımdan uygun olduğu görülmüştür.
- Numunelerde oluşan çatlaklar incelendiğinde çatlakların çoğunlukla kolon kenarının ortasında kayma gerilmelerinin en yüksek olduğu kısımdan başlayarak köşelere doğru devam etmesi ve kolonun diğer kenarına birleşmesi gözlemlenmiştir. Numunelerde çoğunlukla kolon boyunca çatlaklar görülmüştür
- İlk çatlaklar kolonun bir ya da iki kenarında oluşurken, burulma çatlama sonrasında elemanda dönme etkisiyle tüm kenarlarda devam edecek şekilde 45°'lik diyagonal çatlaklar meydana gelmiştir.
- Deneyler sonucunda ortaya çıkan hasar durumları incelendiğinde SN-1 ve SN-4 numunelerinde kolon alt bölgesinde hasar oluştuğu, diğer numunelerde ise kolon orta bölgesine yakın noktalarda plastik mafsallı oluşumu gözlemlenmiştir. Dairesel olmayan kesitlerde çarpılmanın da etkisi ile hasarın ani kırılma sonucunda ve bir bölgede yoğun bir şekilde meydana geldiği görülmüştür.
- Hasar oluşan bölgenin belirginleşmesi ile elemanın diğer kısımlarında çatlaklarda yeni bir gelişim gözlemlenmemiştir. Eleman hasar aldığı bölgeden kırılmaya devam etmiştir.
- Kolonun yüksekliklerinde meydana gelen dönme etkileri elemanda meydana gelen hasarın bölgesine bağlı değişmiştir. Orta bölgede plastik mafsallı oluşan elemanlarda alt kısımda dönme oluşmamış, hasar bölgesinin üzerindeki kısım dönme etkilerine maruz kalmıştır. Kolon alt kısmında hasar meydana geldiğinde ise tüm kolon boyunca dönme etkileri oluşmuştur.
- Kolona etki eden burulma nedeniyle, boyuna donatılarda dönme ve eğilme meydana gelmiştir. Özellikle kabuk betonun çatlama ile elemandaki boyuna donatılarda dönme etkileri belirginleşmiştir.

- Kabuk betonun çatlaması ile çekirdek betonunda da 45° açılı çatlaklar meydana gelmiştir. Elemanın dönmesi ile etriyelerin sıkışıp gevşemesi sonucunda çekirdek betonunda hasar artmaya devam etmiş ve burulma yalnızca hasar bölgesindeki enine ve boyuna donatılar ile taşınmaya başlamıştır. Ancak eksenel yükün arttığı SN-4, SN-5, SN-6 numunelerinde kabuk betonun ve çekirdek betonun çatlaması sonucunda boyuna donatılarda burkulma meydana gelmiştir.
- Burulmanın etkisi ile elemandaki kesme kuvvetleri artmıştır. Bu nedenle etriyelerde zorlanma meydana gelmiştir. Etriyenin sıkışıp gevşemesi sonucunda çekirdek betonu hasar görmüştür. Aynı zamanda etriyelerdeki 135° açı ile bükülen kollar burulma etkisiyle açılmaya başlamıştır.

Deneysel çalışmada, kolonda burulmanın artması ile taşıma gücünün azaldığı görülmektedir. Kolonda çarpılmanın da rastgele ve gevrek kırılma biçiminde oluşması nedeniyle davranış daha da karmaşıklaşmıştır. Eksenel yükün değişimi ile burulma etkisindeki kolonda, davranış daha karmaşık bir hal almaktadır. Burulma meydana gelen kolonlarda, eksenel yükün %10 ile %25 seviyesinde daha fazla dönme meydana gelirken, bu eksenel yük seviyesindeki kolonlarda daha düşük burulma momenti taşınmaktadır. Literatürde, Attarchian (2020)'in yaptığı incelemelerde deprem etkisindeki yapının orta katındaki kolonlarında burulma hasarına rastlanmıştır, Cengiz (2022)'in yaptığı çalışmada elde edilen bulgular da orta katlarda burulmanın daha kritik olduğunu göstermiştir. Ayrıca kolonda hasarın tüm kolon boyunca yayıldığı, plastik mafsalin kolon orta bölgesinde meydana geldiği birçok çalışmada görülmüştür. Çalışmadan elde edilen verilerin ve numunelerdeki hasar durumlarının da literatürde incelenen çalışmalarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, deprem etkisindeki düzensiz yapılarda, orta seviyelerde eksenel yük taşıyan orta katlardaki kolonların, dönme kapasitelerinin daha fazla olduğu gözlemlenmiş, burulma kapasitelerinin ise daha düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir.

5.2. Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen bilgiler ışığında ileride yapılacak çalışmalara aşağıdaki önerilerde bulunulabilir:

- Elemanda kesit boyutları, donatı düzeni ve beton sınıfı çalışma kapsamında değişken olarak ele alınmamıştır. Bu değişkenlerin burulma davranışına etkisi araştırılabilir.
- Deneylerde üretilen numuneler mümkün olduğunca birbiri ile benzer olmalı ve bölgesel kesit zayıflıkları bulunmamalıdır. Deney sisteminde gerçekleştirilen deneyler olabildiğince aynı şartlar altında gerçekleştirilmelidir.
- Deney düzeneğinde belirli bir hasar durumundan sonra eğilmeyi engelleyen profillerde yükleme tespit edilmiştir. Bu durumun önlenmesi amacıyla kolon üzerindeki kiriş iki yönde uzatılarak çift hidrolik silindir kullanılması ile burulma etkisinin oluşturulması önerilmektedir.
- Çalışmada eksenel yük kolon üzerinde sabit olarak etki ettirilememiştir. Kolonda hasar meydana gelse de eksenel yükün kolon üzerinde sabit olarak uygulandığı durumda kolonların burulma etkisindeki davranışı üzerine çalışma gerçekleştirilebilir.
- Yapılan çalışmada kolon üzerinde yalnızca eksenel yük ve burulma etkileri incelenmiştir. Bu yüklemelerin yanında kolon üzerinde eğilme etkisinin de oluşturulması ile kolon davranışı incelenebilir.

6. KAYNAKLAR

- Abdelkader, K., Toufik, Z. ve Mohamed, B.-j. J. A. i. M. E., 2015, Torsional stress in non-circular cross sections by the finite element method, 7 (5), 1687814015581979.
- ACI-318, 2008, ACI 318-08: Building code requirements for structural concrete, ACI Farmington Hills, MI, USA.
- ACI-374, 2005, Performance-Based Seismic Design of Concrete Buildings, American Concrete Institute, p.
- ASCE/SEI, 2017, Associated Criteria for Buildings and Other Structures, *American Society of Civil Engineers*, 06-15.
- 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*, 1-23.
- Belarbi, A., Prakash Shanmugam, S. ve You, Y.-M., 2009, Effect of spiral reinforcement on flexural-shear-torsional seismic behavior of reinforced concrete circular bridge columns, *Structural Engineering and Mechanics*, 33.
- Cao, X., Wu, L. ve Li, Z., 2019, Behaviour of steel-reinforced concrete columns under combined torsion based on ABAQUS FEA, *Engineering Structures*, 209, 109980.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N. İ., 1998, Betonarme Yapılar, Sema Matbaacılık, .
- Cengiz, S., Solak, A., Unal, A. ve Kamanli, M., 2022, Effect of eccentricity on the internal forces on the columns of a reinforced concrete building, *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, 21 (3), 5.
- Chalioris, C. E. ve Karayannis, C. G., 2013, Experimental investigation of RC beams with rectangular spiral reinforcement in torsion, *Engineering Structures*, 56, 286-297.
- 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, e1479.
- Chen, Z., Mo, L., Li, S., Liang, Y. ve Xu, D., 2021, Seismic behavior of steel reinforced concrete L-shaped columns under compression-bending-shear-torsion combined action, *Journal of Building Engineering*, 42, 102498.
- Chiu, H.-J., Fang, I.-K., Young, W.-T. ve Shiau, J.-K., 2007, Behavior of reinforced concrete beams with minimum torsional reinforcement, *Engineering Structures*, 29 (9), 2193-2205.
- Collins, M. P. ve Mitchell, D., 1980, Shear and torsion design of prestressed and non-prestressed concrete beams, *PCI journal*, 25 (5), 32-100.
- Deng, J., Ma, Z., 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.
- Engin, S., 2005, Çelik lif ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin burulma davranışı, *Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Erken, S., 2012, Betonarme yapıların taşıyıcı sistem seçiminde perde yerleşiminin davranışa etkisi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Ersoy, U. ve Ferguson, P. M. J. S. P., 1968, Concrete beams subjected to combined torsion and shear-experimental trends, 18, 441-460.
- Ersoy, U., 1975, Betonarmede burulma: davranış mukavemet şartnameler hesap için öneriler, Güven Kitabevi, p.
- Ersoy, U., 1986, Betonarme Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı, Ankara.
- Ersoy, U., 2001, Betonarme: temel ilkeler TS-500-2000 ve Türk deprem yönetmeliğine (1998) göre hesap, Evrim Yayınevi, p.

- Ersoy, U., Özcebe, G. ve Canbay, E., 2019, Betonarme: Davranış ve Hesap İlkeleri.
- Eurocode-2, 2004, Eurocode 2: Design of concrete structures—, *Standard, British, Part 1*, 1, 230.
- Eurocode-8, 2005, Eurocode 8, Design of Structures for Earthquake Resistance: Assessment and retrofitting of buildings, British Standards Institution, European Committee for Standardization, British Standards Institution. Standards Policy, Strategy Committee, p.
- 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.
- 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. University of Illinois at Urbana*.
- Hsu, H.-L. ve Wang, C.-L., 2000, Flexural-torsional behaviour of steel reinforced concrete members subjected to repeated loading, 29 (5), 667-682.
- Hsu, T. T., 1968, Torsion of structural concrete-behavior of reinforced concrete rectangular members, 18, 261-306.
- Hsu, T. T. ve Kemp, E., 1969, Background and practical application of tentative design criteria for torsion, *Journal Proceedings*, 12-23.
- İnan, M., 2001, Cisimlerin mukavemeti, İTÜ Vakfı, p.
- JSCE, J. S. o. C. E., 2010, JSCE Guidelines for Concrete No. 15: Standard Specifications for Concrete Structures—2007 “Design”.
- Kaltakçı, M. Y., 2010, Çözümlü Örneklerle Mukavemet, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi*, 354-356, p.
- Kamanlı, M., 1993, Burulmaya Maruz Dikdörtgen Kesitli Yapı Elemanlarında Kayma Gerilmesi Dağılımının Sonlu Elemanlar Metodu ile Araştırılması, *Selçuk Üniversitesi*, Konya.
- Kaplan, S. A., 2004, Betonarme Yapı Elemanları, *İstanbul*, Bilbeyki Yayınları, p.
- Karlsson, I., Elfgren, L. ve Losburg, A., 1974, Long-Time Behavior of Reinforced Concrete Beams Subjected to Pure Torsion, *Journal Proceedings*, 280-283.
- Kayan, İ., 1992, Cisimlerin Mukavemeti, *İstanbul*, İTÜ, p.
- Kruzelecki, J. ve Ortwein, R., 2012, Optimal design of clamped columns for stability under combined axial compression and torsion, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 45.
- Kurt, C., 2010, Çerçevesiz ve perdeli çerçevesiz binalarda A1 türü düzensizliklerin araştırılması.
- Li, Q. ve Belarbi, A., 2011, Seismic Behavior of RC Columns with Interlocking Spirals under Combined Loadings Including Torsion, *Procedia Engineering*, 14, 1281-1291.
- Li, Q. ve Belarbi, A., 2013, Damage assessment of square RC bridge columns subjected to torsion combined with axial compression, flexure, and shear, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17.
- Mullapudi, R. ve Ayoub, A. S., 2013, Analysis of Reinforced Concrete Columns Subjected to Combined Axial, Flexure, Shear and Torsional Loads, *Journal of Structural Engineering*, 139.
- Narayanan, R. ve Kareem-Palanjian, A. S., 1986, Torsion in beams reinforced with bars and fibers, *Journal of Structural Engineering*, 112 (1), 53-66.

- 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.
- Nie, J.-g., Wang, Y. H. ve Fan, J.-s., 2013, Experimental research on concrete filled steel tube columns under combined compression-bending-torsion cyclic load, *Thin-Walled Structures*, 67, 1-14.
- Onsongo, W. M., 1978, Diagonal compression field theory for reinforced concrete beams subjected to combined torsion, flexure and axial load.
- Öncü, M. E., 2008, Betonarme yapıların deprem performanslarının değerlendirilmesi/Seismic performance evaluation of reinforced concrete structures.
- Özkal, F. M., 2017, Kesme Açıklığı Küçük Olan Betonarme Kirişlerin Etriye Düzeni ve Kenetlenme Yönünden İncelenmesi.
- Öztekin, E., 2007, Farklı şekilde donatılmış yüksek performanslı betonarme kirişlerin burulma momenti etkisindeki davranışlarının deneysel ve teorik olarak incelenmesi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- 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.
- Peng, X., 2012, Study of torsional behavior of reinforced concrete walls.
- Prakash Shanmugam, 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 - ENG STRUCT*, 32, 46-59.
- Prakash Shanmugam, S., Li, Q. ve Belarbi, A., 2012, Behavior of Circular and Square Reinforced Concrete Bridge Columns under Combined Loading Including Torsion, *ACI Structural Journal*, 109, 317-327.
- Ren, Q.-X., Han, L.-H., Hou, C., Tao, Z. ve Li, S., 2017, Concrete-encased CFST columns under combined compression and torsion: Experimental investigation, *Journal of Constructional Steel Research*, 138, 729-741.
- Solak, A., Cengiz, S., Ünal, A. ve Kamanlı, M., 2022, Eksenel Yük ve Burulma Etkisi Altındaki Kolonlar için Bir Yükleme Düzeneği Önerisi. 8. Yapı Mekaniği Laboratuvarları Çalıştayı. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir.
- Soley, Ö., 2010, Fretli kolonların basit burulma etkisi altında davranışının deneysel olarak incelenmesi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Tang, C.-W., 2006, Using radial basis function neural networks to model torsional strength of reinforced concrete beams, *Computers and Concrete*, 3.
- TBDY, 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Tezcan, S. S. ve Alhan, C., 2001, Parametric analysis of irregular structures under seismic loading according to the new Turkish Earthquake Code, *Engineering Structures*, 23 (6), 600-609.
- THBB, 2020, İzmir Depremi İnceleme Raporu, Türkiye Hazır Beton Birliği.
- 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, 425-452.
- TS500, 2000, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, p.
- Türkay, A., 2019, Betonarme Perdelerde Burulma Davranışının Analitik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, *Erciyes Üniversitesi, Türkiye*.
- Ünal, A., 2016, Sabit Dikdörtgen Kesitli Kirişlerin Farklı Mesnet Koşullarında Kesme Kapasitesinin Araştırılması, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Ünal, G., 2018, Geri dönüşümlü agregadan üretilmiş tam ölçekli kolonların yangın etkisi altındaki deprem performansı, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği Bilim Dalı*.
- Wafa, F., Hasnat, A. ve Tarabolsi, O. F., 1992, Prestressed fiber reinforced concrete beams subjected to torsion, *Structural Journal*, 89 (3), 272-283.
- Wang, Y.-H., Guo, Y.-F., Liu, J.-P. ve Zhou, X.-H., 2017, Experimental Study on Torsion Behavior of Concrete Filled Steel Tube Columns subjected to Eccentric Compression, *Journal of Constructional Steel Research*, 129, 119-128.
- 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.
- Wang, Y.-H., Wang, Y.-Y., Hou, C., Deng, R., Lan, Y.-S., Luo, W. ve Li, P., 2020, Torsional capacity of concrete-filled steel tube columns circumferentially confined by CFRP, *Journal of Constructional Steel Research*, 175, 106320.
- Wang, Y.-H., Wang, Y.-Y., Zhou, X.-H., Deng, R., Lan, Y.-S., Luo, W., Li, P., Yang, Q.-S. ve Ke, K., 2021, Coupled ultimate capacity of CFRP confined concrete-filled steel tube columns under compression-bending-torsion load, *Structures*, 31, 558-575.
- Xu, D., Yang, Y. ve Chen, Z., 2020, Experimental Study and Damage Model on the Seismic Behavior of Reinforced Concrete L-Shaped Columns under Combined Torsion, *Applied Sciences*, 10, 7008.
- 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.
- Zhang, Y., 2002, Torsion in high-strength concrete rectangular beams, University of Nevada, Reno, p.
- Zhou, J., Hirose, M., Konda, T. ve Shimizu, Y., 2000, Effect of the torsional moment on the shear strength of reinforced concrete columns due to eccentric jointing of beam to column, *The 12th world conference of earthquake engineering*.