



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



BETONARME KİRİŞLERDE, DONATI TİP ve
YERLEŞİMLERİNİN BURULMA
DAVRANIŞINA ETKİLERİNİN DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ

Oğuz Kağan KESKİN

YÜKSEK LİSANS

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Oğuz Kağan KESKİN tarafından hazırlanan “Betonarme Kirişlerde, Donatı Tip ve Yerleşimlerinin Burulma Davranışına Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması 15/05/2025 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 Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Mehmet KAMANLI
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Fatih Süleyman BALIK (Online)
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından 241004006 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Oğuz Kağan KESKİN

Tarih:15.05.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BETONARME KİRİŞLERDE, DONATI TİP ve YERLEŞİMLERİNİN BURULMA DAVRANIŞINA ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Oğuz Kağan KESKİN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet KAMANLI

2025, 134 Sayfa

Jüri

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

Günümüzde betonarme sistemler, yapı sektöründe en yaygın kullanılan taşıyıcı sistemler arasında yer almakta olup, yapı güvenliği açısından bu sistemlerdeki temel elemanların davranışlarının ayrıntılı şekilde incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Kirişler, betonarme yapılarda yükleri döşemelerden kolonlara aktaran kritik taşıyıcı elemanlar olarak, eğilme, kesme ve burulma gibi çeşitli iç kuvvetlere maruz kalmaktadır. Özellikle burulma etkisi, çoğu zaman ikincil bir etki olarak değerlendirilmesine rağmen, düzensiz geometriye sahip yapılarda, kenar kirişlerde ve konsol elemanlarda belirleyici bir iç kuvvet olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, geçmiş depremler sonrası yapılan hasar analizleri, burulma etkisinin yapısal davranış üzerindeki kritik rolünü ve mevcut yapı stokunda donatı düzenlemelerine dair yetersizlikleri ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, 2000 yılı öncesinde yaygın olarak kullanılan nervürsüz (düz) donatıların, günümüzde tercih edilen nervürlü donatılara kıyasla betonarme kirişlerin burulma davranışı üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Farklı boyuna donatı oranları (2φ12 ve 3φ12) ile çeşitli etriye aralıkları (etriyesiz, 5 cm, 10 cm ve 20 cm) kullanılarak toplam 16 adet kiriş numunesi hazırlanmış ve özel olarak kurulan deney düzeneğinde burulma testine tabi tutulmuştur. Deneysel veriler, dönme kapasitesi, burulma momenti, enerji tüketimi ve rijitlik parametreleri açısından değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, nervürsüz donatı kullanılan kirişlerin, nervürlü donatılı kirişlere kıyasla burulma dayanımı ve süneklik açısından belirgin zafiyetler içerdiğini ortaya koymuş; ayrıca boyuna donatı adeti ve etriye aralıklarının burulma davranışı üzerindeki etkileri de açık biçimde gösterilmiştir. Bu çalışma, mevcut yapı stokunun güvenlik açısından değerlendirilmesi ve yeni betonarme tasarımlarında etkin donatı düzenlemelerinin belirlenmesi açısından literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Betonarme kiriş, burulma, etriye aralığı, deneysel çalışma, nervürlü – nervürsüz donatı

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF REINFORCEMENT TYPES AND PLACEMENTS ON TORSIONAL BEHAVIOR IN REINFORCED CONCRETE BEAMS

Oğuz Kağan KESKİN

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering

Advisor: Prof. Dr. Mehmet KAMANLI

2025, 134

Jury

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

Reinforced concrete systems are among the most widely used structural systems in the construction sector today, and a detailed investigation of the behavior of their fundamental components is of great importance in terms of structural safety. Beams, as critical load-bearing elements in reinforced concrete structures, transfer loads from slabs to columns and are subjected to various internal forces such as bending, shear, and torsion. Although the torsional effect is often considered a secondary action, it becomes a dominant internal force in structures with irregular geometries, edge beams, and cantilever elements. In this context, damage assessments conducted after past earthquakes have revealed the critical role of torsion in structural behavior and the inadequacies in reinforcement detailing within the existing building stock.

In this study, the effect of non-ribbed reinforcement bars, which were commonly used before the year 2000, on the torsional behavior of reinforced concrete beams was experimentally investigated in comparison with ribbed bars currently preferred in practice. A total of 16 beam specimens were prepared using different longitudinal reinforcement ratios ($2\phi 12$ and $3\phi 12$) and various stirrup spacings (none, 5 cm, 10 cm, and 20 cm), and were subjected to torsion tests using a specially designed experimental setup. The experimental data were evaluated in terms of rotational capacity, torsional moment, energy dissipation, and stiffness parameters.

The results revealed that beams with non-ribbed reinforcement exhibited significant weaknesses in terms of torsional strength and ductility compared to those with ribbed reinforcement; moreover, the influence of longitudinal reinforcement amount and stirrup spacing on torsional behavior was clearly demonstrated. This study aims to contribute to the literature by supporting the evaluation of the existing building stock in terms of safety and by guiding the determination of effective reinforcement detailing in new reinforced concrete designs.

Keywords: Ribbed and non-ribbed bars, experimental study, reinforced concrete beam, stirrup spacing, torsion

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve deneyimleriyle bana daima yol gösteren, sağladığı destekle doğru adımlar atmamı sağlayan değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Mehmet KAMANLI 'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca, bilgi birikimini benden esirgemeyen, tüm deneylerde yanımda olan, deneysel verilerin toplanması ve sonuçların yorumlanmasında katkıda bulunan Sayın Doç. Dr. Alptuğ ÜNAL 'a, deney sonuçlarının yorumlanmasında katkıda bulunan Arş. Gör. Abdulkadir SOLAK 'a ve deney verilerinin işlenmesinde katkıda bulunan Öğr. Gör. Salih CENGİZ 'e teşekkürlerimi sunarım.

Deney sürecinde sağladığı katkılardan dolayı Sayın Yüksel ÇİFTÇİ 'ye, deney numunelerinin üretimine destek olan Korkmaz Beton Grup 'a, deney malzemelerinin testlerinde yardımcı olan Büyük Selçuklu Yapı Laboratuvarı Ltd. Şti.'ye ve Analiz Müşavirlik Yapı Zemin Lab. Müh. İnş. Taah. Ltd. Şti.'ye teşekkürlerimi sunarım. Deney numunelerinin hazırlanması ve deneylerin yapılması sürecinde destek olan Sayın Mehmet Emin YİĞİT 'e teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte her zaman yanımda olup bana moral ve motivasyon desteği veren Sayın Hatice Burcu ÇİFTÇİ 'ye şükranlarımı sunarım. Tüm deneylerde emeği geçen arkadaşlarıma ve meslektaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca manevi desteğini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan sevgili annem Güzide KESKİN 'e, babam Kenan KESKİN 'e ve ablam Bilgehan ÇİLOĞLU 'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Oğuz Kağan KESKİN
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
1. GİRİŞ	1
1.1. Burulma Momenti.....	2
1.1.1. Denge ve uygunluk burulması	3
1.1.2. Burulma momenti yaklaşımları	4
1.2. Çalışmanın Amacı ve Hedefi	9
1.3. Çalışmanın Önemi	10
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	21
3.1. Deney Numuneleri.....	21
3.1.1. Deney numunelerinin boyutları	21
3.1.2. Deney numunelerinin donatı detayları ve özellikleri.....	22
3.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler	27
3.2.1. Donatı özellikleri	27
3.2.2. Beton özellikleri.....	29
3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması	30
3.4. Deney Düzeneğinin Hazırlanması ve Ölçüm Tekniği	34
3.4.1. Deney düzeneğinin hazırlanması	35
3.4.2. Ölçüm tekniği	38
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....	41
4.1. Deney Sonuçları.....	41
4.1.1. Deney 1 (BK-D-0-A)	41
4.1.2. Deney 2 (BK-D-0-B)	45
4.1.3. Deney 3 (BK-N-0-A)	48
4.1.4. Deney 4 (BK-N-0-B)	51
4.1.5. Deney 5 (BK-D-20-A)	54
4.1.6. Deney 6 (BK-D-20-B)	57
4.1.7. Deney 7 (BK-N-20-A)	61
4.1.8. Deney 8 (BK-N-20-B)	65
4.1.9. Deney 9 (BK-D-10-A)	69
4.1.10. Deney 10 (BK-D-10-B)	73
4.1.11. Deney 11 (BK-N-10-A)	77
4.1.12. Deney 12 (BK-N-10-B)	81

4.1.13. Deney 13 (BK-D-5-A)	85
4.1.14. Deney 14 (BK-D-5-B)	89
4.1.15. Deney 15 (BK-N-5-A)	93
4.1.16. Deney 16 (BK-N-5-B)	97
4.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	101
4.2.1. Etriye aralığının burulma davranışına etkisi	102
4.2.2. Donatı tipinin burulma davranışına etkisi	107
4.2.3. Boyuna donatı adedinin burulma davranışına etkisi	115
4.2.3. Tüm verilerin karşılaştırılması	124
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	128
5.1. Sonuçlar	128
5.2. Öneriler	131
KAYNAKLAR	132



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

b : Dikdörtgen enkesitin kısa kenar uzunluğu
C25 : 28 gün suda bekletilmiş silindir basınç dayanımı 25 MPa olan beton
cm : Santimetre
d: Kiriş etkin derinliği
 f_c' : Ortalama silindir basınç dayanımı
 f_{cu} : Küp basınç dayanımı
 f_{ck} : Betonun tek eksenli basınç dayanımı
 f_{ctk} : Betonun tek eksenli çekme dayanımı
 f_{yk} : Donatının akma dayanımı
h : Dikdörtgen enkesitin uzun kenar uzunluğu
Lk : Dönmenin hesaplanabilmesi için yerleştirilen LVDT'lerin arasındaki mesafe
Lu : Birim uzamanın hesaplanabilmesi için yerleştirilen LVDT'lerin arasındaki mesafe
mm : Milimetre
MPa : Mega Pascal (N/mm²)
N : Newton
R : Çatlama sonrası burulma rijitliği
S420 : donatı akma dayanımı 420 MPa olan donatı
T : Burulma momenti
 T_{max} : Maksimum burulma momenti
 T_u : Göçme (kopma) noktasında burulma momenti
 T_{cr} : Çatlamaya neden olan burulma momenti
 T_y : Akmaya neden olan burulma momenti
 x_i : Enine donatıda kısa kolun uzunluğu
 y_i : Enine donatıda uzun kolun uzunluğu
 τ_T : Burulmadan oluşan kayma gerilmeleri
 τ_{max} : Maksimum kayma gerilmesi
 τ_{tcr} : Çatlamada kayma gerilmesi
 τ_i : Burulmadan dolayı oluşan kayma gerilmesi
 θ_{rad} : Toplam dönme miktarının radyan cinsinden gösterimi
 ϕ : Donatı çapı, mm
 θ_{cr} : Çatlama momentinde meydana gelen dönme
 θ_y : Akma noktası momentinde meydana gelen dönme
 θ_{max} : Maksimum burulma momentinde meydana gelen dönme
 θ_u : Göçme (kopma) noktası momentinde meydana gelen dönme
 σ_{ct} : Asal çekme gerilmeleri
% : Yüzde

Kısaltmalar

BK-D-0-A : Nervürsüz, etriyesiz, boyuna donatı adeti 2 ϕ 12 olan kiriş
BK-D-0-B : Nervürsüz, etriyesiz, boyuna donatı adeti 3 ϕ 12 olan kiriş
BK-N-0-A : Nervürlü, etriyesiz, boyuna donatı adeti 2 ϕ 12 olan kiriş
BK-N-0-B : Nervürlü, etriyesiz, boyuna donatı adeti 3 ϕ 12 olan kiriş
BK-D-20-A : Nervürsüz, 6 ϕ 20 cm etriyeli, boyuna donatı adeti 2 ϕ 12 olan kiriş
BK-D-20-B : Nervürsüz, 6 ϕ 20 cm etriyeli, boyuna donatı adeti 3 ϕ 12 olan kiriş

BK-N-20-A : Nervürlü, 6φ20 cm etriyeli, boyuna donatı adeti 2φ12 olan kiriş
BK-N-20-B : Nervürlü, 6φ20 cm etriyeli, boyuna donatı adeti 3φ12 olan kiriş
BK-D-10-A : Nervürsüz, 6φ10 cm etriyeli, boyuna donatı adeti 2φ12 olan kiriş
BK-D-10-B : Nervürsüz, 6φ10 cm etriyeli, boyuna donatı adeti 3φ12 olan kiriş
BK-N-10-A : Nervürlü, 6φ10 cm etriyeli, boyuna donatı adeti 2φ12 olan kiriş
BK-N-10-B : Nervürlü, 6φ10 cm etriyeli, boyuna donatı adeti 3φ12 olan kiriş
BK-D-5-A : Nervürsüz, 6φ5 cm etriyeli, boyuna donatı adeti 2φ12 olan kiriş
BK-D-5-B : Nervürsüz, 6φ5 cm etriyeli, boyuna donatı adeti 3φ12 olan kiriş
BK-N-5-A : Nervürlü, 6φ5 cm etriyeli, boyuna donatı adeti 2φ12 olan kiriş
BK-N-5-B : Nervürlü, 6φ5 cm etriyeli, boyuna donatı adeti 3φ12 olan kiriş
LVDT : Potansiyometrik deplasman ölçer
TBDY : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TS500 : Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları



1. GİRİŞ

Günümüzde en yaygın kullanılan taşıyıcı sistemlerden biri betonarme sistemlerdir. Betonarme sistemlerde, yapı elemanlarının güvenli ve verimli bir şekilde tasarlanması; bu süreçte de tüm mühendislik analizleri ile hesaplarının eksiksiz olarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, özellikle yapı güvenliği açısından kiriş gibi temel taşıyıcı elemanların farklı yükleme türleri altındaki davranışlarının ayrıntılı şekilde araştırılması büyük önem taşımaktadır.

Betonarme yapılarda kirişler, yükleri döşemelerden alarak kolonlara aktaran temel taşıyıcı elemanlardır. Yapının genel taşıyıcı sistemine katkıları dikkate alındığında, bu elemanların maruz kalacağı eğilme, kesme ve burulma gibi farklı iç kuvvetler altında nasıl davrandıklarının belirlenmesi hayati önem taşımaktadır. Burulma etkisi, çoğu zaman ikincil bir etki olarak kabul edilse de özellikle düzensiz yapı geometrilerinde, kenar kirişlerde, konsollar ve balkon kirişlerinde doğrudan etkili bir kuvvet olarak ön plana çıkmaktadır.

Depremler sonrası hasar gören yapıların incelenmesi, birçok yapıda burulma etkilerinin kritik düzeyde olduğunu ve bu etkinin taşıyıcı sistem davranışı üzerinde önemli rol oynadığını ortaya koymuştur. Ayrıca, hasar gören ya da yıkılan yapılarda kullanılan donatıların cinsi, miktarı, yerleşimi, projeye ve yönetmeliklere uygunluğu ile beton dayanımı gibi parametrelerde ciddi yetersizlikler tespit edilmiştir. Yapılardaki birçok taşıyıcı sistem elemanı burulma etkisi ile karşı karşıya kalmakta; burulma çatlakları ise, eğilme ve kesme çatlaklarına kıyasla yapı elemanının rijitliğinde daha büyük değişimlere neden olabilmektedir. Bu nedenle, burulma etkisinin yapının genel davranışı üzerindeki etkisinin göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

Literatürdeki çalışmalarda, kirişlerin eğilme ve kesme yükleri altındaki davranışlarına yönelik yoğunlaşma dikkat çekmektedir. Buna karşın burulma davranışı çoğu zaman yeterince incelenmemiştir. Oysaki betonarme elemanların monolitik döküm özelliği nedeniyle, birçok taşıyıcı eleman burulma momentine de maruz kalmaktadır (Ersoy ve Özcebe, 2016). Burulma momenti, yalnız başına etkili olabildiği gibi, diğer iç kuvvetlerle birlikte oluşarak karma yükleme durumlarına neden olabilmektedir. Bu durum, burulmanın yapısal davranış üzerindeki etkisinin, özellikle süneklik ve enerji tüketimi gibi performans parametreleri açısından göz ardı edilemeyeceğini göstermektedir.

Betonarme deney numunelerinde burulma çatlakları oluştuğunda, numune boyunda ve birim uzamasında gözle görülür artışlar meydana gelmektedir. Bu durum, boyuna donatının burulma etkisi altındaki davranış üzerinde önemli bir role sahip olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, aderansı düşük olan nervürsüz (düz donatı) ile üretilen taşıyıcı elemanların, mevcut yapı stokunda yapısal açıdan zafiyet oluşturduğu ve ilerleyen dönemlerde de risk teşkil edeceği öngörülmektedir. Ayrıca bu donatı sorununa paralel olarak mevcut yapılarda gözlemlenen düşük beton dayanımı, yetersiz taşıyıcı kesit boyutları ve deprem düzensizlikleri de yapısal bütünlük açısından ciddi tehditler oluşturmaktadır.

1.1. Burulma Momenti

Bir çubuğun kesit düzleminde yer alan kuvvet çiftinin etkisiyle oluşan ve yalnızca burulma momentinin etkili olduğu durum, "basit burulma hali" olarak tanımlanır. Ancak, yapı elemanları çoğunlukla sadece burulma momentine maruz kalmaz; aynı zamanda eğilme momenti ve kesme kuvveti gibi diğer iç kuvvetler de etkili olur. Burulma momentinin tek başına etkili olduğu durumlar oldukça nadirdir. Bununla birlikte, betonarme yapılarda elemanların büyük bir kısmı, yapı sisteminin geometrisi veya yüklerin simetrik olmayan dağılımı nedeniyle belirli düzeyde burulma momentine maruz kalmaktadır. Yine de burulma momentinin büyüklüğü çoğu zaman eğilme ve kesme etkilerine kıyasla daha düşük seviyelerde kalmaktadır.

Pratikte burulma hesabı özellikle kenar kirişleri, merdiven ve balkon kirişleri gibi yapı elemanlarında önem arz etmektedir. Ayrıca ızgara sistemler, düzleminde eğri köprüler, köşe kolonlar ve balkon kirişleri gibi bölgelerde burulma etkisi kaçınılmaz hale gelmektedir. Burulma momenti genel olarak, bir yapı elemanında yalnızca bir kesit etkisinin kuvvet çifti ile meydana geldiği durum olarak tanımlanmakla birlikte, gerçek yapı sistemlerinde bu tür tekil etkilerin yalnız başına gözlenmesi oldukça nadirdir. Bu nedenle, betonarme elemanların davranışını doğru şekilde değerlendirebilmek için, öncelikle basit burulma etkisinin kesit üzerindeki davranışının iyi anlaşılması gerekmektedir (Kayan, 1992).

Betonarme taşıyıcı sistemlerde burulma momenti genellikle rijitlik merkezi ile kütle merkezi arasındaki dış merkezlikten ya da yapıya etki eden yüklerin simetrik olmayan dağılımından kaynaklanmaktadır. Yapı elemanlarının önemli bir kısmı bu etkiden doğrudan ya da dolaylı olarak etkilenmektedir (Ersoy, 1975). Burulma etkisiyle

oluşan çatlaklar, eğilme veya kesme etkileriyle meydana gelen çatlaklara kıyasla elemanın rijitliğinde daha fazla kayba neden olmaktadır. Burulma momentine maruz kalan betonarme elemanlarda oluşan çatlaklar genellikle diyagonal kesme çatlakları biçiminde olup, yaklaşık 45° 'lik açıyla eleman boyunca ilerlemektedir (Şekil 1.1).



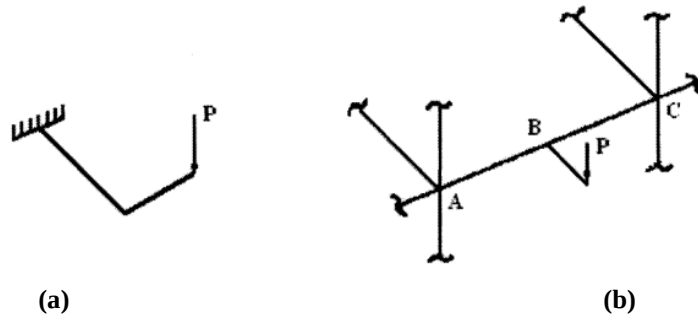
Şekil 1.1. Burulmada kesme çatlakları (Ersoy ve diğ., 2019)

1.1.1. Denge ve uygunluk burulması

Betonarme yapı elemanları, eğilme ve kesme kuvvetlerinin yanı sıra burulma momentinin etkisine de maruz kalmaktadır (Tuna, 1992). Yapıların monolitik bir bütünlük göstermesi nedeniyle, burulma etkisi genellikle taşıyıcı sistemin geometrik özelliklerinden veya yüklerin simetrik olmayan bir şekilde uygulanmasından kaynaklanmaktadır (Berktaş, 1995).

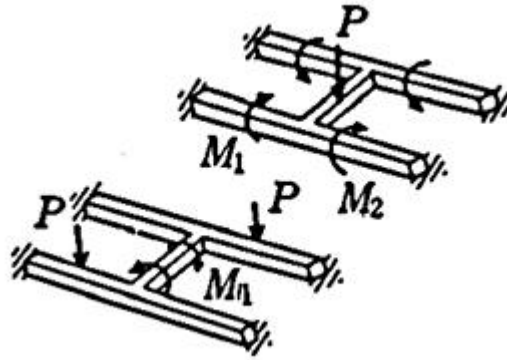
Yapı sistemlerinde meydana gelen burulma etkisi iki ana başlık altında incelenebilir:

- **Denge Burulması:** Statik olarak belirli burulma etkisi olarak da adlandırılabilen bu tür burulma, dış kuvvetlerin etkisiyle oluşan burulma momentiyi meydana gelir ve denge denklemleri yardımıyla hesaplanabilir. Şekil 1.2'de gösterilen elemanlarda oluşan burulma momenti, sistemin rijitlik özelliklerinden bağımsız olarak yalnızca denge denklemleriyle belirlenebilir. Eğer bu tür burulma momenti taşıyıcı elemanlar tarafından karşılanamazsa, sistemde denge sağlanamaz.



Şekil 1.2. (a) İzostatik sistemde denge burulması, (b) Hiperstatik sistemlerde denge burulması (Ersoy ve Özcebe, 2001)

- **Uygunluk Burulması:** Bu tür burulma momenti, statik açıdan belirsiz olup yalnızca denge denklemleriyle belirlenemez (Şekil 1.3). Burulma rijitliği, sistemin diğer elemanlarının rijitliği ile kıyaslandığında önemli bir etkiye sahiptir. Bu tür burulma momentinin göz ardı edilmesi, taşıyıcı sistemde çatlakların oluşmasına ve yüklerin yeniden dağılımıyla dengenin sağlanmasına yol açabilir (Celep ve Kumbasar, 1998).



Şekil 1.3. Uygunluk burulması (JSCE, 2010)

Burulma etkisinin taşıyıcı sistem üzerindeki bu farklı türleri, yapı elemanlarının tasarımında dikkate alınmalı ve özellikle rijitlik merkezi ile kütle merkezi arasındaki dış merkezlikten kaynaklanan etkiler doğru bir şekilde analiz edilmelidir. Aksi takdirde, betonarme elemanlarda diyagonal kesme çatlakları oluşabilir ve yapı sisteminin rijitliği önemli ölçüde azalabilir.

1.1.2. Burulma momenti yaklaşımları

1.1.2.1. Elastik burulma

Burulma etkisi altındaki betonarme elemanlarda, kesitte oluşan statikçe belirsiz gerilme dağılımı, şekil değiştirmeler dikkate alınmadan çözülemez. Elastisite teorisine göre, dairesel kesitli elemanların şekil değiştirmesi, deneysel ve gözlemsel verilere dayanarak yaklaşık olarak belirlenebilir. Ancak, dikdörtgen kesitlerde çarpılma etkisi nedeniyle bu belirleme net olarak yapılamaz ve bu nedenle elastisite teorisi doğrudan kullanılamaz (Kayan, 1992).

Elastik burulma yaklaşımı, kesitte burulmanın oluşabilmesi için elemanda yalnızca kesit düzlemlerinde yer alan kuvvet çiftlerinin etki etmesini öngörür. Ancak,

pratikte burulma momenti genellikle kesme kuvveti, eğilme momenti ve normal kuvvetle birlikte ortaya çıkar; sadece burulmanın etkili olduğu durumlar oldukça nadirdir.

Statikçe belirsiz olan bu gerilme yayılımı problemi, elemanın yük altındaki şekil değiştirmesi dikkate alınmadan çözülemez. Kesin çözümler, elastisite teorisinde belirtilen varsayımlar ve deneysel veriler ışığında yaklaşık olarak elde edilebilir. Dairesel veya ince kenarlı kapalı kesitli elemanlar için kesin ya da yaklaşık çözümler bulunabilirken, diğer kesit türleri için analitik çözüm üretmek oldukça zordur (Kayan, 1992).

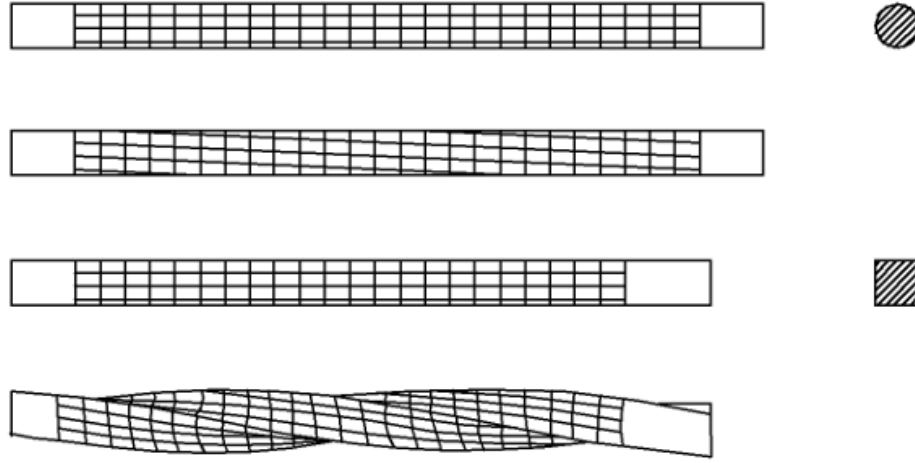
1.1.2.2. Plastik burulma

Plastisite teorisine göre burulma hesabında, kayma gerilmelerinin kesitin her noktasında sabit olduğu ve tüm kesitlerin plastik hale geldiği varsayılır. Hesaplamaların daha pratik hale gelmesi için membran analogisine benzer şekilde kum tümseği analogisi kullanılır.

Bu analogi, yatay konumda tutulan bir kesit üzerine dökülen kohezyonsuz kumun oluşturduğu şeklin, plastik teorideki gerilme fonksiyonuna benzetilmesine dayanır. Eğer kum tümseğinin eğimi kayma gerilmelerine eşit kabul edilirse, tümseğin hacmi, kesitin taşıyabileceği burulma momentinin yarısını verir. Bu yaklaşım, burulma hesaplarını basitleştirmek amacıyla sıkça tercih edilmektedir.

1.1.2.3. Elastisitede dairesele kesitler olmayan çubukların burulması

Burulma momentine ilişkin bu yaklaşımda, burulmaya uğrayan çubuklarda kesitler, burulmadan önceki düzlem hallerini koruyamazlar (Şekil 1.4). Burulma etkisi altında, çubuklar çaprazlaşarak şekil değiştirir. Bu durum, kesitlerin burulma şekil değiştirmesinde dönme hareketi yapmalarını engeller (Öztekin, 2007). Dairesel olmayan kesitli çubukların burulma esnasındaki şekil değiştirmeleri, Coulomb burulmasında öne sürülen varsayımlardan birincisini geçersiz kılar. Bu tür çubuklarda düzlem olan kesitler, burulma sonrası düzlem kalmaz ve çarpılır. Bu çarpılma, ikinci varsayımın da geçersiz olmasına neden olur; yani, kesitler burulma şekil değiştirmesinde bir katı cisim dönme hareketi yapmazlar (Kayan, 1992).

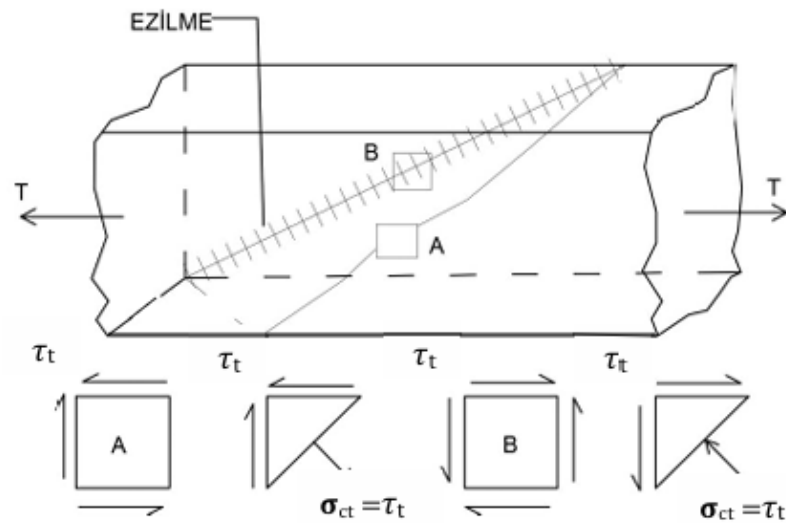


Şekil 1.4. Dairesel ve dikdörtgen kesitlerde kesit çarpılması (Abdelkader ve diğ., 2015)

1.1.2.4. Basit burulma

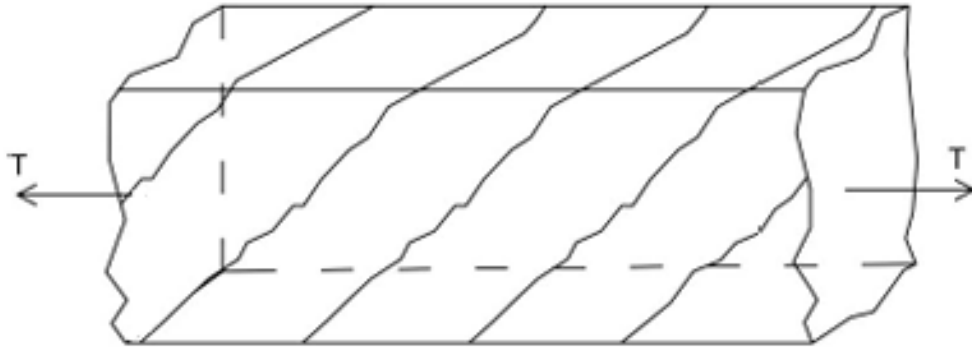
Burulma, genellikle eğilme ve kesme etkileriyle birlikte ortaya çıkar ve pratikte tek başına görülmesi nadirdir. Bu yüzden, saf burulmanın detaylı bir şekilde incelenmesi gereksiz gibi düşünülebilir. Ancak, tıpkı kolonlardaki aksel yük gibi, saf burulma da sınır durumlarından biri olduğundan, bu etkideki taşıma kapasitesinin ve yapısal davranışın bilinmesi önemlidir.

Donatısız, dikdörtgen kesitli beton bir kiriş, yalnızca burulma etkisi altında test edildiğinde, ilk çatlağın oluşumuyla birlikte ani ve gevrek bir kırılma sergiler. Şekil 1.5'te donatısız dikdörtgen beton kirişin üç yüzeyinde ezilme kaynaklı çatlakların meydana geldiği gözlemlenmektedir.



Şekil 1.5. Basit burulma altında donatısız kirişin kırılması (Ersoy, 1975)

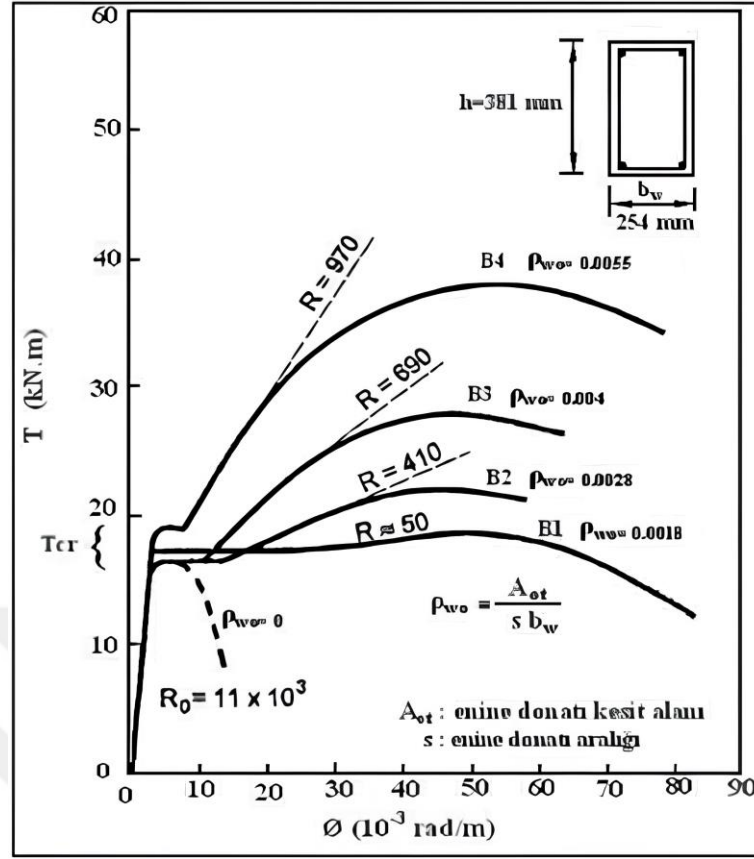
Etriye ve boyuna donatının birlikte kullanıldığı durumlarda, kirişin davranışı önemli ölçüde değişmektedir. Bu koşullarda, kiriş ilk çatlakların oluşmasıyla kırılmak yerine, çatlaklar daha kontrollü bir şekilde yayılmaktadır. Şekil 1.6'da gösterildiği gibi, kirişin kırılma konumuna ulaşmadan önce asal çekme gerilmelerine dik yönde çok sayıda çatlak meydana gelmektedir. Etriye ve boyuna donatının varlığı, kirişin burulmadaki taşıma kapasitesini de belirgin şekilde artırmaktadır. Donatının bu şekilde kullanılması, kirişin kırılmasını geciktirerek yapısal dayanımını güçlendirir ve daha sünek bir davranış sergilemesini sağlar.



Şekil 1.6. Basit Burulma Altındaki Donatılı Bir Kirişte Gözlenen Çatlaklar (Celep ve Kumbasar, 1998)

Basit burulma, pratikte oldukça nadir karşılaşılan ve daha çok akademik çalışmalar kapsamında ele alınan bir konudur. Ancak, farklı yüklemeler altındaki yapı elemanlarının davranışlarını anlayabilmek için, bu elemanların saf burulma etkisi altındaki tepkilerinin bilinmesi gerekmektedir (Ersoy, 1975).

Burulmaya maruz kalan bir kirişte eğik çekme çatlaklarının oluşumu kritik bir durumdur. Çünkü bu çatlaklar, burulma rijitliği ve kırılma davranışını önemli ölçüde etkiler. Çatlamanın yanı sıra, boyuna ve enine donatının kesitin taşıma kapasitesine katkısı da büyük önem taşır. Yapılan deneysel çalışmalar, kayma donatısı bulunmayan dikdörtgen kesitli kirişlerin taşıma kapasitesinin, kayma donatılı kirişlerin çatlama momentine yakın olduğunu göstermektedir (Ersoy, 1975).



Şekil 1.7. Basit burulma altındaki betonarme kirişlerde burulma momenti-birim dönme açısı ilişkisi (Ersroy ve diğ., 2019)

Şekil 1.7’de gösterilen burulma momenti ile birim dönme açısı arasındaki ilişki incelendiğinde, burulma çatlamasının meydana geldiği T_{cr} noktasına kadar tüm numunelerin doğrusal bir davranış sergilediği görülmektedir. Eğrinin bu bölümü tüm deney numuneleri için ortak bir özellik taşıdığından, burulma çatlaması gerçekleşene kadar burulma rijitliğinin donatının varlığından bağımsız olduğu sonucuna varılabilir. R olarak ifade edilen burulma çatlaması sonrası eğim, burulma donatısına bağlı olarak değişmektedir (Ersroy, 1975; İnan, 2001; Ersroy ve diğ., 2019).

Burulma rijitliğinde büyük değişimlere yol açan burulma çatlamasının hangi değerde meydana geleceğinin doğru hesaplanması, yapı elemanlarının burulma davranışının anlaşılması açısından kritik bir öneme sahiptir. Ersroy ve Özcebe (2019), ilk çatlağın oluştuğu burulma momenti T_{cr} değerini belirlemek amacıyla plastisite teorisine dayalı denklemleri kullanmış ve bu denklemleri kum tümseği analojisi yöntemiyle aşağıdaki şekilde türetmişlerdir (Denklem 1.1):

$$T_{cr} = \frac{1}{2} \sum x_i^2 \left(y_i - \frac{x_i}{3} \right) \tau_i \quad (1.1)$$

Bu denklemde x_i ve y_i dikdörtgen kesitin kısa ve uzun kenarını ifade etmektedir. T_{cr} için verilen yukarıdaki denklemde bulunan betonun kayma gerilmesi τ_i basit burulma halinde betonun çekme dayanımına karşılık gelmektedir. Literatürde, basit burulma etkisine maruz kalan elemanlar üzerine yapılan araştırmalar, betonun tek eksenli çekme dayanımı olan $T_{cr} = 0.35\sqrt{f_{ck}}$ değerinin burulma açısından bir alt sınır oluşturduğunu göstermektedir. Bu sınır temel alınarak $T_{cr} = 0.35\sqrt{f_{ck}}$ yerine f_{ctk} ifadesi kullanıldığında, betonarme elemanın basit burulma altındaki çatlamasını belirleyen Denklem 1.2'den elde edilmektedir (Öztekin, 2007).

$$T_{cr} = \frac{1}{2} \sum x_i^2 (y_i - \frac{x_i}{3}) f_{ctk} \quad (1.2)$$

1.2. Çalışmanın Amacı ve Hedefi

Bu çalışmanın temel amacı, 2000 yılı öncesinde kullanımı yaygın olan nervürsüz (düz) donatıların, günümüzde yaygın şekilde kullanılan nervürlü donatılara kıyasla betonarme kirişlerin burulma davranışı üzerindeki etkisini deneysel olarak ortaya koymaktır. Bu kapsamda, farklı boyuna donatı oranları ve etriye aralıklarında nervürlü ve nervürsüz donatılar kullanılarak hazırlanan kirişlerin burulma etkisi altındaki davranışları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Bu doğrultuda, toplam 16 adet kiriş numunesi hazırlanmıştır. Her biri $2\phi 12$ ve $3\phi 12$ boyuna donatı kullanılarak, etriyesiz ve 5 cm, 10 cm, 20 cm etriye ($\phi 6$) aralıkları bırakılarak tasarlanmış ve özel olarak kurulan burulma deney düzeneğinde test edilmiştir. Testler sonucunda elde edilen veriler, dönme kapasitesi, burulma momenti, enerji tüketimi ve rijitlik parametreleri açısından değerlendirilmiş ve yapısal davranış üzerindeki etkileri ayrıntılı şekilde incelenmiştir.

Çalışmanın ana hedefi, nervürsüz donatı ile üretilen kirişlerin, nervürlü donatı kullanılan eşdeğer kirişlere kıyasla burulma dayanımı açısından ne ölçüde fark gösterdiğini tespit etmektir. Farklı boyuna donatı miktarları ve farklı etriye aralıklarında elde edilen burulma davranışları karşılaştırılarak, mevcut yapı stokunda yer alan nervürsüz donatılı kirişlerin yapısal performansı bilimsel olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, boyuna donatı adetinin ve etriye aralıklarının burulma kapasitesine ve sünekliğe etkisi de ayrı ayrı incelenerek bu parametrelerin etkileri net biçimde ortaya konmuştur. Bu çalışma hem mevcut yapı stokunun değerlendirilmesinde hem de yeni yapılacak

betonarme tasarımlarında optimum donatı düzenlemelerinin belirlenmesi açısından önemli katkılar sağlamayı hedeflemektedir.

1.3. Çalışmanın Önemi

Betonarme taşıyıcı sistemlerde donatı türü ile yerleşimi, yapı dayanımı ve davranışının belirlenmesinde temel unsurlardan biridir. Özellikle nervürsüz donatı kullanılan kirişlerin, nervürlü donatılara kıyasla aderans açısından zayıf kalması hem taşıma gücünü hem de süneklik kapasitesini olumsuz etkilemektedir. Bu eksiklik, özellikle deprem gibi dinamik etkiler altında yapıların güvenliğini doğrudan tehdit edebilecek bir durum yaratmaktadır.

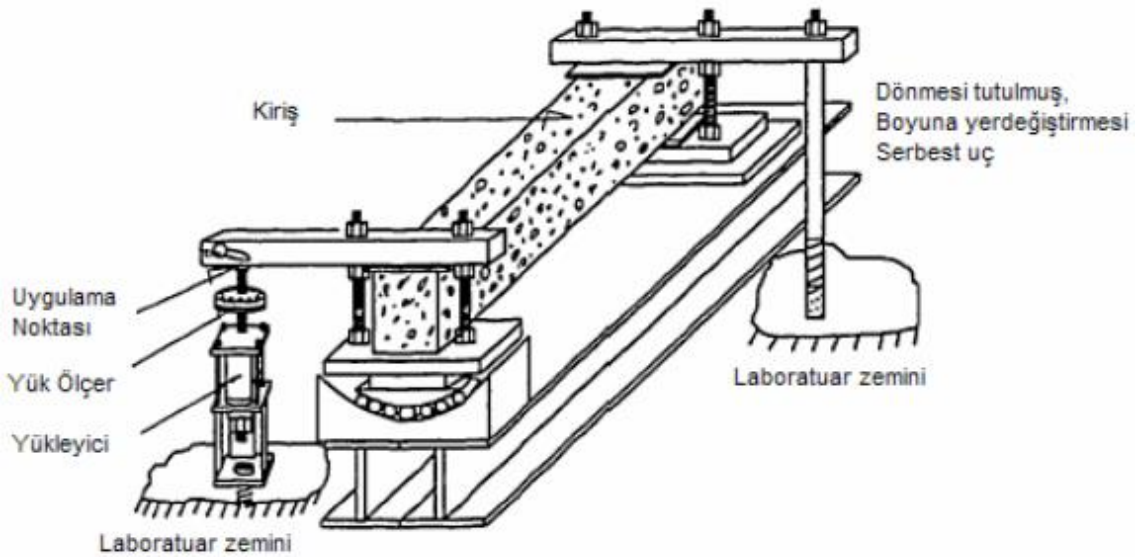
Mevcut literatürde, nervürsüz donatı kullanılarak üretilen kirişlerin yapısal performansına dair çalışmalar sınırlı düzeyde kalmış; bu durum da özellikle eski yapı stokunun değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi aşamalarında mühendislik kararlarının yeterli veriyle desteklenememesine neden olmuştur. Bu bağlamda, nervürsüz donatı kullanılan kirişlerin taşıma kapasitesi, deformasyon karakteristikleri ve kırılma davranışlarının deneysel yöntemlerle incelenmesi büyük bir gereklilik haline gelmiştir.

Bu tez çalışmasında, özellikle nervürlü ve nervürsüz donatı tipleri ile farklı boyuna donatı adetleri ve etriye aralıklarının kirişlerin burulma davranışına etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, her iki donatı tipinin performans karakteristikleri belirlenmiş olup, boyuna donatı sayısı ve etriye sıklığının burulma dayanımı üzerindeki etkileri net bir şekilde ortaya konmuştur. Bu bulgular, söz konusu donatı düzenlemelerine sahip mevcut yapıların değerlendirilmesinde ve güçlendirme yöntemlerinin seçiminde referans kaynağı oluşturacağı düşünülmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kamanlı (1993), tezinde dikdörtgen kesitli yapı elemanlarının burulma etkisi altında kayma gerilmesi dağılımını incelemiş ve bunu hem deneysel çalışmalarla hem de sonlu elemanlar metodu kullanarak gerçekleştirmiştir. Kesitlerdeki kayma gerilmesinin tespiti için yarı ters metodu uygulanmış ve bu sayede denge ile uygunluk bağıntıları elde edilmiştir. Elde edilen bu bağıntılar, diferansiyel denklemlerle altı farklı modelin çözümünde kullanılmıştır. Çelik ve beton elemanlar arasındaki kayma gerilmesinin karşılaştırıldığı çalışmada, beton elemanlarda kayma gerilmesinin %32 oranında fark gösterdiği ve donatılarda ise sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan gerilmenin %8,75 farkla ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bu farkın betonun heterojen yapısından kaynaklandığı düşünülmüştür.

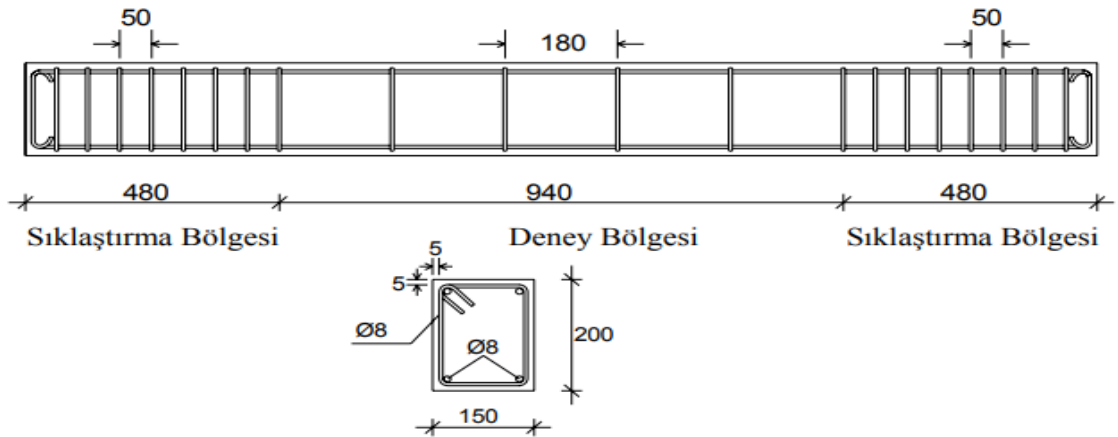
Koutchoukali ve Belarbi (1997) ise, beş birebir ölçekli kirişi basit burulmaya tabi tutarak beton dayanımını temel parametre olarak kullanmışlardır. Bu çalışmada, normal ve yüksek dayanımlı betonlar kullanılarak yapılan betonarme kirişlerde aynı donatı düzeni uygulanmıştır. Yazarlar, deney düzeneği (Şekil 2.1) ve kullanılan parametreler hakkında detaylı bilgiler verdikten sonra, burulma deneylerine tabi tuttukları kirişlerin çatlama momenti, dönme açısı, çatlama ve nihai burulma momenti gibi sonuçları grafiklerle sunmuşlardır. Yapılan analizler sonucunda, beton dayanımının artmasının kirişlerin davranışını sünekten gevreğe doğru kaydıracağı ancak nihai burulma kapasitesinin beton dayanımından bağımsız olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.1. Basit burulma deneylerini gerçekleştirdikleri düzenek (Koutchoukali ve Belarbi, 1997)

Engin (2005), tezinde betonarme kirişlerin burulma davranışını incelemiştir. Kirişin boyuna donatı çapındaki artışın burulma kapasitesini artırdığı belirlenmiştir. Beton dayanımındaki artışın burulma kapasitesini yükselttiği ancak dönme kapasitesini %66 oranında azalttığı gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda, elemanın enerji yutma kapasitesinin azaldığı bulunmuştur. Ayrıca, tüm elemanlarda maksimum burulma, benzer dönme oranlarında gerçekleşmiştir. Çalışmada, farklı lif türlerinin eklenmesinin burulma rijitliğini artırdığı da gözlemlenmiştir.

Öztürk (2007), çalışmasında Lif Takviyeli Polimerler (FRP) kullanarak betonarme kirişlerin burulma güçlendirilmesini araştırmıştır. Bu amaçla, 12 normal dayanımlı ve 14 yüksek dayanımlı betonla toplamda 26 betonarme kiriş hazırlanmıştır. Numunelerin kesit boyutları, beton basınç dayanımı ve donatı oranı gibi parametreler sabit tutulmuştur (Şekil 2.2). Tüm numunelerde etriye ve boyuna donatı olarak 8 mm çapında nervürlü donatı kullanılmış ve güçlendirme için cam lifi (GFRP), karbon lifi (CFRP-N) ve yüksek elastisite modüllü karbon lifi (CFRP-H) kullanılmıştır. GFRP ve CFRP-N ile güçlendirilen numunelerde, enine ve boyuna yapıştırma uygulanan normal ve yüksek dayanımlı kirişlerin çatlama momenti ve burulma momenti kapasitelerinde, sargısız kirişlere göre önemli artışlar gözlemlenmiştir. CFRP-H ile güçlendirilen kirişlerde ise FRP şeritlerinin erken kopması nedeniyle burulma kapasitesinde beklenen artış sağlanamamıştır. Ayrıca, GFRP ve CFRP-N ile güçlendirilen kirişlerde elastik uzama ve çatlak genişliğindeki artışla birlikte, taşınan burulma momentinin arttığı tespit edilmiştir. CFRP-H ile güçlendirilen kirişlerde ise bu artış gözlenmemiştir.



Şekil 2.2. Kiriş kesitleri (Öztürk, 2007)

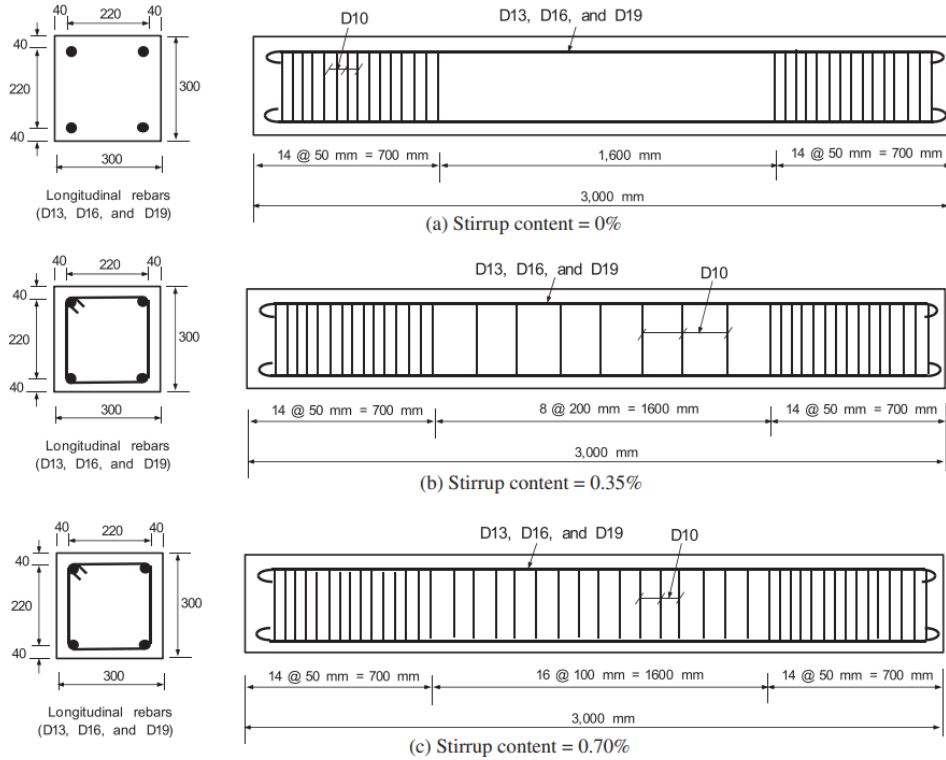
Öztekin (2007), çalışmasında farklı enkesit ve donatı düzenlerine sahip yüksek performanslı betonarme kirişlerin burulma etkisindeki davranışlarını incelemeyi amaçlamıştır. Bu amaçla, enkesit boyutları 150 mm x 250 mm ve 150 mm x 300 mm olan ve 1800 mm uzunluğunda iki farklı deney numune serisi (T1 ve T2) kullanılmıştır. Her bir seride, biri donatısız olmak üzere 13 farklı donatı düzeni uygulanmıştır. Kullanılan deney düzeneği Şekil 2.3'te gösterilmiştir. T2 serisi, enkesit yüksekliği daha büyük olan kirişlerin, maksimum burulma momentine daha küçük dönme açısı ile ulaştığı gözlemlenmiştir. Ancak, donatısız kirişler arasında yapılan karşılaştırmada, dönme açıları açısından T2 serisi kirişlerin daha büyük olduğunu ve bu durumun burulma donatısının enkesit boyutlarına bağlı olarak seçilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Enkesit yüksekliği daha küçük olan ve enine donatı sıklaştırması yapılan kirişler, etriye sıklaştırması yapılmamış ve yalnızca gövde donatısı kullanılan kirişlerden daha büyük burulma momenti taşımıştır. Bu durum, küçük enkesitli betonarme kirişlerde etriye sıklaştırmasının burulma momenti taşıma kapasitesine katkısının, gövde donatısının katkısından daha fazla olduğunu göstermektedir. Öte yandan, enkesit yüksekliği büyük olan kirişlerde, gövde donatısının burulma momenti taşıma kapasitesine olan katkısının daha belirgin olduğu görülmüştür. Enine donatı sıklaştırılmasının, çatlamaya kadar burulma rijitliğini azalttığı ve bu durumun kirişin burulma momenti altında daha sünek davranmasına yol açtığı tespit edilmiştir. Çatlamadan sonra ise burulma rijitliklerinde artış gözlemlenmiştir. Eşit enine donatı aralığına sahip betonarme kirişlerde, gövde donatısının kullanımı hem çatlama öncesi hem de sonrasında burulma rijitliklerini artırmıştır.



Şekil 2.3. Deney düzeneği (Öztekin, 2007)

Berto ve diğ. (2009), çalışmalarında korozyon nedeniyle pas payı ve donatının mekanik özelliklerindeki değişimlerin yapısal performans üzerindeki etkisini ele almışlardır. Ayrıca, artımsal itme analizi kullanarak, korozyonun plastik mafsall oluşumunu nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Bu analitik çalışma, korozyona maruz kalmış betonarme elemanların burulma davranışı konusundaki bilgi eksikliğini giderme açısından önemli bir katkı sağlamaktadır.

Yang ve diğ. (2013), gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, 13 adet tam ölçekli betonarme kirişi burulma yükleri altında test etmişlerdir. Bu kirişlerin her biri 300 mm yükseklik, 300 mm genişlik ve 3000 mm uzunluğundadır. Deneylerde, ultra yüksek performanslı beton kullanılmış ve üç farklı donatı düzeni uygulanmıştır (Şekil 2.4). Kullanılan parametreler arasında çelik lif oranı, enine donatı ve boyuna donatı oranları yer almaktadır. Yang ve diğ. (2013), çalışma sonuçlarına göre çelik lif oranının artışıyla burulma moment değerlerinin de arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, çelik liflerin çatlak büyümesini sınırladığı, ilk çatlak oluşumundan sonra liflerin bu çatlakları kontrol altında tuttuğu tespit edilmiştir. Boyuna ve sargı donatılarının farklı oranlarda kullanılmasıyla basınç diyagonal çatlak açısının değiştiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, yüksek beton basınç dayanımına sahip betonarme kirişler için burulma momentinin tahmini amacıyla yeni bir model geliştirilmiştir.



Şekil 2.4. Kiriş kesitleri (Yang ve diğ., 2013)

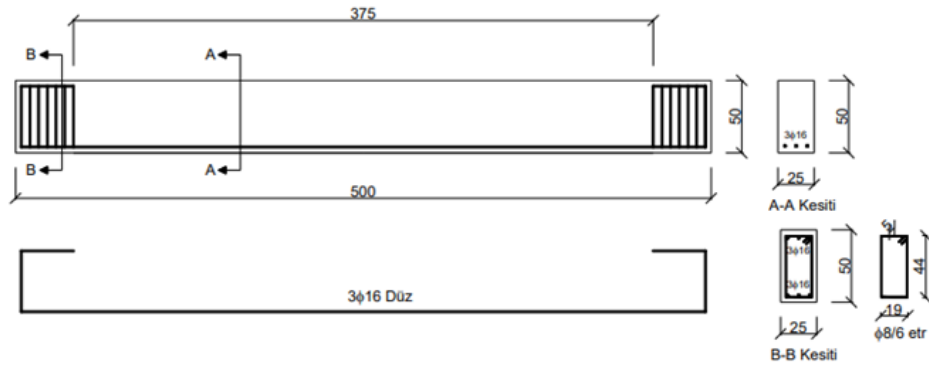
Bayrak (2015), betonarme kiriş elemanlarında etriye oranı, beton tipi ve beton sınıfının burulma davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Test programında, 250x300x1500 mm boyutlarında 20 betonarme kiriş kullanılmıştır. Çalışmada, ana parametreler olarak etriye oranı, beton tipi ve beton sınıfı seçilmiştir. Test numuneleri, normal ve kendiliğinden yerleşen beton tiplerinin yanı sıra, C20 ve C40 beton sınıflarını içerecek şekilde sekiz gruba ayrılmıştır. Ayrıca, etriye aralığı olarak 80 mm ve 100 mm değerleri belirlenmiştir. Test numunelerinde, boyuna donatı olarak 16 mm çapında, etriye olarak ise 8 mm çapında donatılar kullanılmıştır. Kullanılan deney düzeneğine ait parçalar Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) tipinin, normal betona göre daha yüksek burulma momenti kapasitesine sahip olduğu deneysel olarak gözlemlenmiştir. KYB serilerinin, normal beton serilerine göre yaklaşık %40 daha fazla burulma momenti kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, etriye aralığının azalmasının burulma momenti kapasitesini artırdığı gözlemlenmiştir. 80 mm etriye aralığına sahip kiriş numunelerinin, 100 mm etriye aralığına sahip kirişlere kıyasla yaklaşık %15 daha yüksek burulma momenti kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Test numunelerinin burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişki detaylı bir şekilde incelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen burulma momenti değerleri, Amerikan Standardı (ACI), Avrupa Standardı (Eurocode-2) ve Türk Standardı (TS500-2000) ile teorik olarak hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlarının, TS500'e en yakın sonuçları verdiği gözlemlenmiştir.



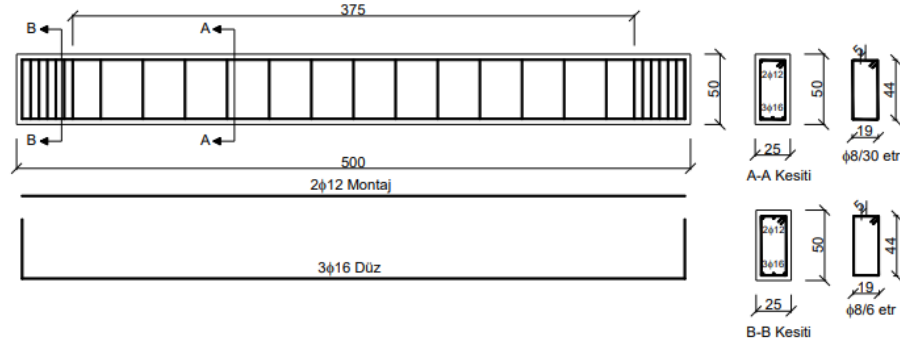
Şekil 2.5. Deney düzeneği kelepçeler ve profil (Bayrak, 2015)

Rashidi ve Takhtfiroozeh (2016), çalışmalarında toplamda dört betonarme kiriş numunesi kullanmışlardır. İlk numune donatısız, ikinci numune sadece boyuna donatıyla, üçüncü numune sadece etriyeyle ve dördüncü numune ise etriye ve boyuna donatı kullanılarak oluşturulmuştur. Numune boyutları 600 mm uzunluk, 100 mm genişlik ve 100 mm yükseklik olarak belirlenmiştir. Enine ve boyuna donatının birlikte kullanıldığı kiriş numunesinin, donatısız kiriş numunesine göre burulma dayanımının %95 ve sünekliğinin %50 oranında arttığı tespit edilmiştir. Burulma dayanımında enine donatının, boyuna donatılara kıyasla daha belirgin bir etkisi olduğu gözlemlenmiş ve maksimum performans için bu iki donatının birlikte kullanımının önemine vurgu yapılmıştır.

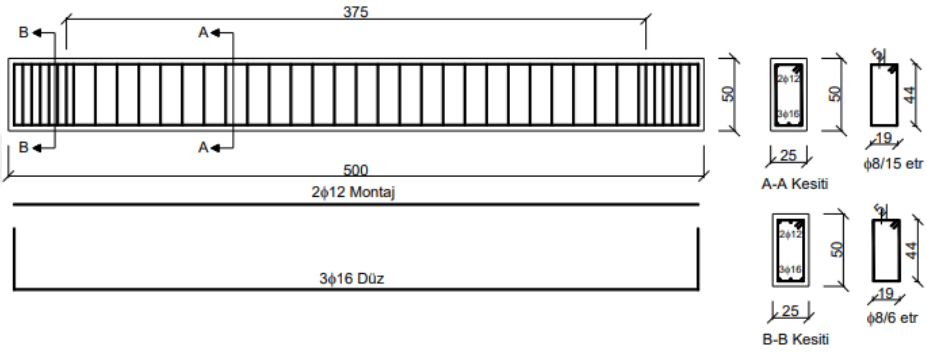
Ünal (2016), yaptığı çalışmada basit mesnet ve ankastre mesnet tiplerinin betonarme kirişlerin kesme dayanımına etkisini araştırmıştır. Kiriş kesme dayanımını incelediği bu çalışmada, mesnet koşulları, a/d oranı ve etriye aralığı ana parametreler olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada, basit mesnetli ve ankastre mesnetli betonarme kirişlerde a/d oranı ile etriye aralığının kiriş kesme davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında 1/1 ölçekli 16 betonarme kiriş, 4 noktalı eğilme düzeneğinde test edilmiştir. Bu numunelerden 4 tanesi basit mesnetli, 12 tanesi ise ankastre mesnetli olarak kullanılmıştır. Numunelerde a/d oranları 1.0, 2.0 ve 3.0 olarak seçilmiş, enine donatı adeti ise bir grup etriyesiz ve üç grup farklı etriye aralıklarına sahip ($\phi 8/7.5$, $\phi 8/15$, $\phi 8/30$) şekilde test edilmiştir (Şekil 2.6). Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar, mesnet koşullarının kiriş davranışını önemli ölçüde etkilediğini, ayrıca a/d oranları ve etriye aralıklarının da kiriş davranışında belirgin bir rol oynadığını göstermiştir. Ayrıca, deneysel olarak elde edilen yük taşıma kapasitelerinin, teorik hesaplamalarla yakın değerler verdiği gözlemlenmiştir.



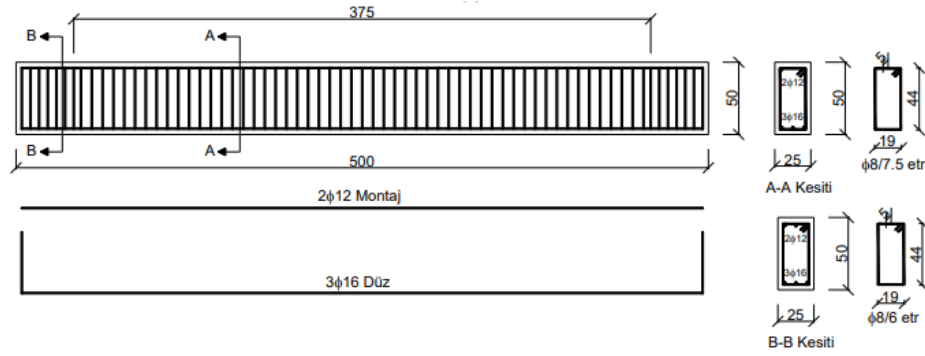
(a)



(b)



(c)

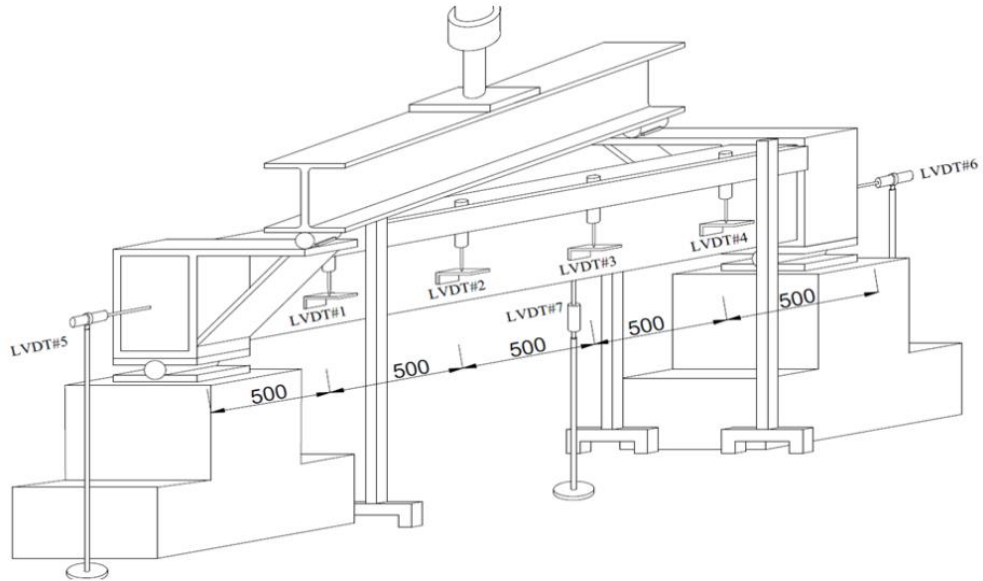
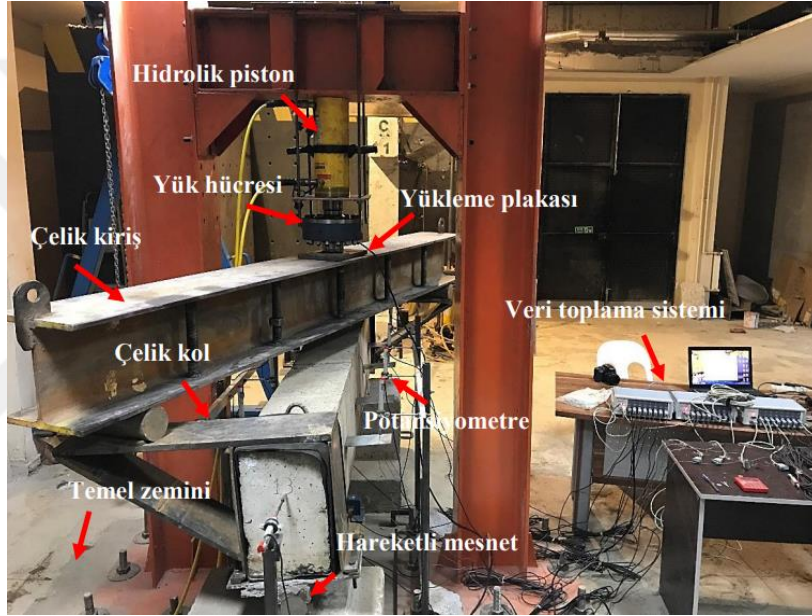


(d)

Şekil 2.6. Deney elemanlarına ait donatı şemaları a) Etriyesiz b) $\phi 8/30$ c) $\phi 8/15$ d) $\phi 8/7.5$ (Ünal, 2016)

Turan (2019), çalışmasında paslanmış betonarme kirişlerin basit burulma etkisi altındaki davranışlarını incelemiştir. Korozyon, betonarme yapıların performansını olumsuz yönde etkileyerek, servis ömürlerini kısaltmakta ve ekonomik anlamda zararlara yol açmaktadır; bu süreç ilerledikçe, yapılar için yıkım gibi ciddi sonuçlara yol açabilir. Çalışma kapsamında, C25 beton sınıfına ait 6 betonarme kiriş, hızlandırılmış korozyon yöntemi ile farklı oranlarda paslandırılmıştır. Deneyler, tüm numunelere aynı ölçüm ve

deney düzeneği uygulanarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.7). Burulma yükü, 60 ton kapasiteli çift yönlü (basınç-çekme) hidrolik pompa kullanılarak sağlanmış ve yük, 100 ton kapasiteli yük hücresiyle kirişin üzerine aktarılmış, böylece burulma momenti oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlar, betonarme kirişlerin burulma momenti kapasitesinin ve süneklik oranlarının, boyuna donatı ve etriye korozyon oranlarının artışıyla azaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca, etriyelerin ilk kütlesi nedeniyle, etriyelerin mekanik özelliklerinin boyuna donatılara göre daha fazla etkilendiği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, korozyonun paslanmış betonarme kirişlerin süneklik oranları üzerindeki etkisinin, burulma momenti kapasitelerine kıyasla daha büyük önem taşıdığını göstermektedir.



Şekil 2.7. Kullanılan deney düzeneği (Turan, 2019)

Cengiz (2019), KYB ile normal beton (NB) kullanılarak üretilen betonarme kirişlerin kesme ve eğilme etkileri altındaki davranışları hasar mekaniği açısından değerlendirilmiştir. Etriye aralığı (Etriyesiz, $\phi 8/20$, $\phi 8/10$, $\phi 8/5$), beton türü (KYB ve NB) ve beton dayanımı (C30 ve C60) değişkenleri dikkate alınarak hazırlanan toplam 16 adet 1/2 ölçekli kiriş numunesi, dört noktalı eğilme deneyi ile test edilmiştir. Deney sonuçları doğrultusunda yük-deplasman eğrileri, rijitlik ve enerji tüketimi analiz edilmiştir. KYB ile imal edilen kirişlerin, normal beton ile üretilenlere kıyasla daha yüksek enerji tüketim kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Her iki beton türü mekanik açıdan benzer performans sergilemekle birlikte, beton dayanımı ve etriye aralığı değişimi kiriş davranışını doğrudan etkilemektedir. Özellikle 5 cm etriye aralığına sahip kirişlerde ani basınç kırılmalarının meydana gelmesi, enerji tüketimini olumsuz yönde etkilemiştir. Elde edilen bulgular, KYB'nin yapısal uygulamalarda normal betona alternatif olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Üstün (2020), kirişlerin kesme kapasitesini artırmaya yönelik yeni bir yaklaşım geliştirmek amacıyla yaptığı deneysel çalışmada, kesme açıklığına farklı açılarla yerleştirilen etriyelerin kirişlerin kesme kapasitesine etkilerini incelemiştir. Bu amaçla, dört noktalı eğilme deneyi ile farklı etriye düzenlerinin kesme kapasitesine etkileri belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, etriyelerin 45° açısıyla yerleştirildiği modelin en iyi performansı sergilediğini göstermektedir. Bu modelde, etriyelerin 90° düzenlendiği klasik etriye modeline kıyasla %11,72 oranında dayanım artışı gözlemlenmiştir. Ayrıca, etriyelerin 30° ve 60° açılarıyla yerleştirildiği modellerde de sırasıyla %7,94 ve %4,94 oranında dayanım artışı sağlanmıştır. Maksimum dayanım artışının yanı sıra, 45° modelinde diğer kiriş modellerine göre daha düşük deplasman değerleri elde edilmiştir. 30° , 60° , ve 90° açıyla yerleştirilen etriye modellerinde, 45° modeline göre sırasıyla %50,76, %35,25 ve %62,65 oranında daha fazla deplasman gözlemlenmiştir. Bu kıyaslama, her modeldeki maksimum deplasmanların ortalamasına dayanmaktadır. Çalışma ayrıca, eğik etriye kullanımının kesme çatlakları da dahil olmak üzere kirişteki çatlakları sınırladığını tespit etmiştir.

Beyaz (2021), çalışmasında etriye yerine aynı işlevleri görebilecek çelik tel kullanımının alternatif olup olamayacağını deneysel olarak incelemiştir. Bu amaçla, 200x320 mm enkesitinde ve 1800 mm uzunluğunda aynı özelliklere sahip 3 adet deney kiriş numunesi üretilmiştir. Şahit deney kiriş numunesi olarak $\phi 8$ çaplı etriye donatısı kullanılmıştır. Diğer iki deney numunesinde, enine donatı olarak sırasıyla $\phi 4$ ve $\phi 6$ çaplı çelik donatılar tercih edilmiştir. Enine donatı çapının azalmasıyla birlikte, enine donatı

aralıkları da küçültülmüştür. Bu düzenleme sonucunda, enine donatı çapı azaldıkça birim mesafede kullanılan etriye sayısının arttığı gözlemlenmiştir. Üretilen 3 adet deney kiriş numunesi, dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuş ve çelik telin etriye yerine kullanılmasının süneklilik ve yük taşıma kapasitesine etkileri araştırılmıştır. Etriye oranı sabit kaldığı sürece, etriye çapı küçüldükçe etriye sayısının artmasıyla kirişlerin daha sünek davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, kiriş yüzeyine temas eden toplam etriye çapının arttıkça süneklik artışının sağlandığı belirlenmiştir. Çalışma, numunelerde oluşan çatlağı daha fazla etriyenin karşılaması durumunda, kirişlerin kesme kırılmasına karşı daha iyi performans gösterdiği sonucuna varmıştır.

Solak (2023), farklı seviyelerde eksenel yüke maruz bırakılan yedi adet kolon numunesi hazırlanarak, bu numuneler üzerinde tersinir-tekrarlanır burulma yüklemesi uygulanmıştır. Çalışmada, kolonlara burulma etkisinin etkin biçimde aktarılabilmesi amacıyla özel bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Her bir numuneye ait burulma ve eksenel yük etkisindeki davranışlar detaylı biçimde analiz edilmiş; özellikle burulma etkisinin oluşumu, kolon üzerindeki etkileri ve hasar biçimleri değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, burulma etkisinin artmasıyla kolonların taşıma kapasitelerinde azalma gözlenmiş, çarpılma ve gevrek kırılma biçimlerinin kolon davranışını daha karmaşık hale getirdiği belirlenmiştir. Ayrıca, eksenel yük seviyesinin %10 ila %25 arasında artması, kolonlarda dönme kapasitesinin yükselmesine karşı burulma momenti taşıma kapasitesinde düşüşe yol açmıştır. Bu bağlamda, deprem etkisi altındaki düzensiz yapıların orta katlarında bulunan ve orta düzeyde eksenel yük taşıyan kolonların, daha yüksek dönme kapasitesine sahip olduğu ancak burulma kapasitelerinin sınırlı kaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Betonarme kirişler, döşemelerden gelen yükleri kolonlara aktaran ve eğilme ile kesme kuvvetlerine karşı çalışan taşıyıcı elemanlardır. TBDY 2018 ve TS 500 kapsamında, deprem etkisi altındaki kirişlerde minimum genişlik 25 cm, yükseklik ise açıklığın 1/12 - 1/10'u olacak şekilde belirlenmelidir. Boyuna donatı oranı en az %0,4 ve en fazla %2,5 olup, kesme kuvvetine karşı yeterli enine donatı kullanımı gereklidir. Etriye aralıkları $d/2$ (d: etkin derinlik) veya 20 cm'yi aşmamalıdır. Burulma etkisi özellikle asimetrik yükleme veya konsol elemanlarda önemli hale geldiğinden, bu tür durumlarda kapalı etriyeler ve yeterli boyuna donatıyla taşıma kapasitesinin artırılması sağlanmalıdır (TBDY, 2018 ve TS500, 2000).

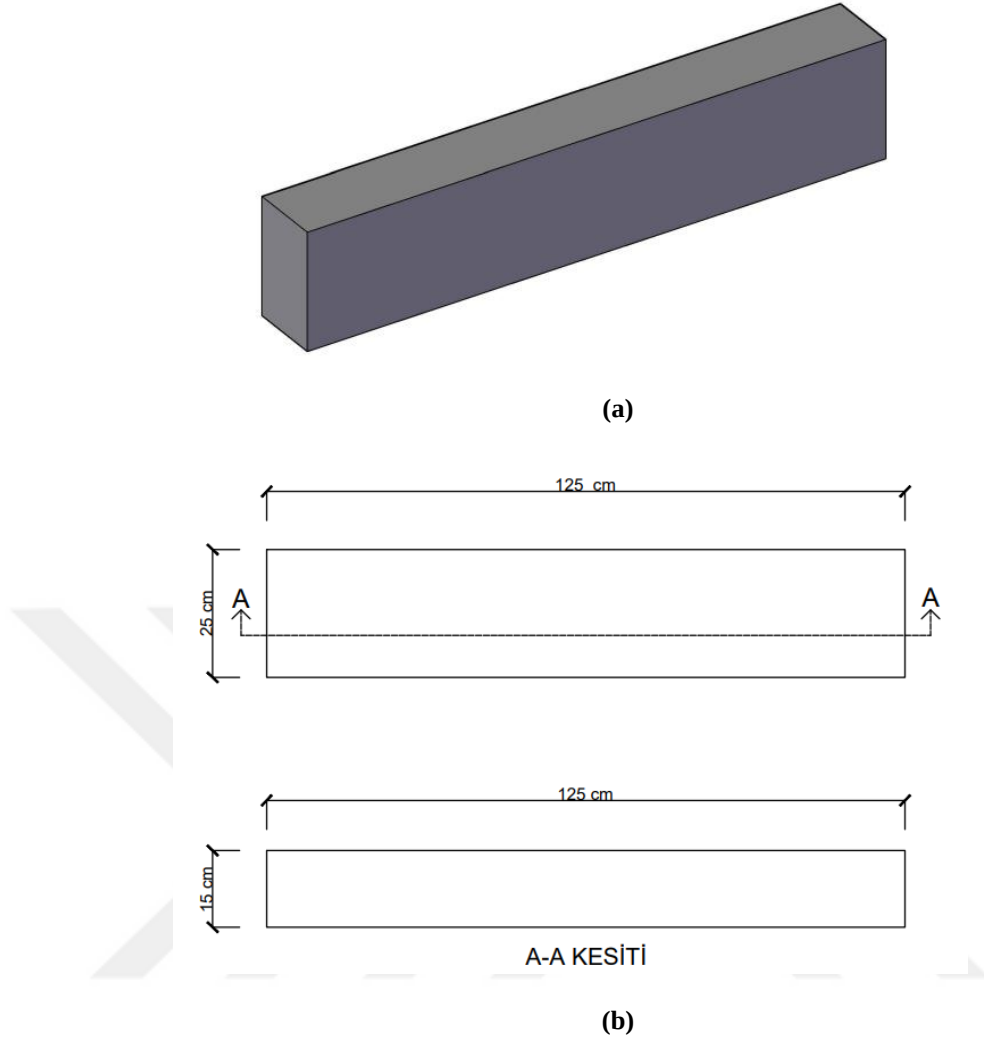
Burulma yüklemesinin betonarme kiriş davranışına etkisinin incelendiği bu deneysel çalışma kapsamında, nervürlü ve nervürsüz donatı ile üretilen kirişlerin burulma davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda ilk değişkenler nervürlü ve nervürsüz donatı kullanımı olmuştur. Ardından nervürlü ve nervürsüz donatı için iki farklı boyuna donatı adeti uygulanmıştır. Daha sonra iki farklı şekilde uygulanmış olan boyuna donatılar için dört farklı etriye aralığı bırakılarak toplamda 16 farklı numune çeşidi elde edilmiştir.

3.1. Deney Numuneleri

Deney için hazırlanan numunelerin boyut ve donatı şartları gerekli yönetmelik ve şartnamelere uyularak üretilmiştir. Numunelerin kesit boyutları ve boyuna donatı miktarları için TBDY-2018 kriterleri dikkatte alınmıştır. Hazır beton firmasından sipariş edilen betonun hazırlanışında ve betonun dökümüm sırasında da gerekli standart ve yönetmeliklere uyulmuştur fakat tercih edilen beton dayanımının seçiminde mevcut yönetmelikler temel alınmamıştır.

3.1.1. Deney numunelerinin boyutları

Deneye tabi tutulan kiriş numunelerinin kesit boyutları tüm numuneler için sabit tutulmuştur. TBDY-2018'e göre kiriş gövde genişliği en az 25 cm olmalıdır. Bu çalışmada 30x50 cm kesitli tam boyutlu kirişin $\frac{1}{2}$ ölçeğinde çalışılmıştır. Kirişlerin boyutları 15x25x125 cm olarak tasarlanmıştır (Şekil 3.1).



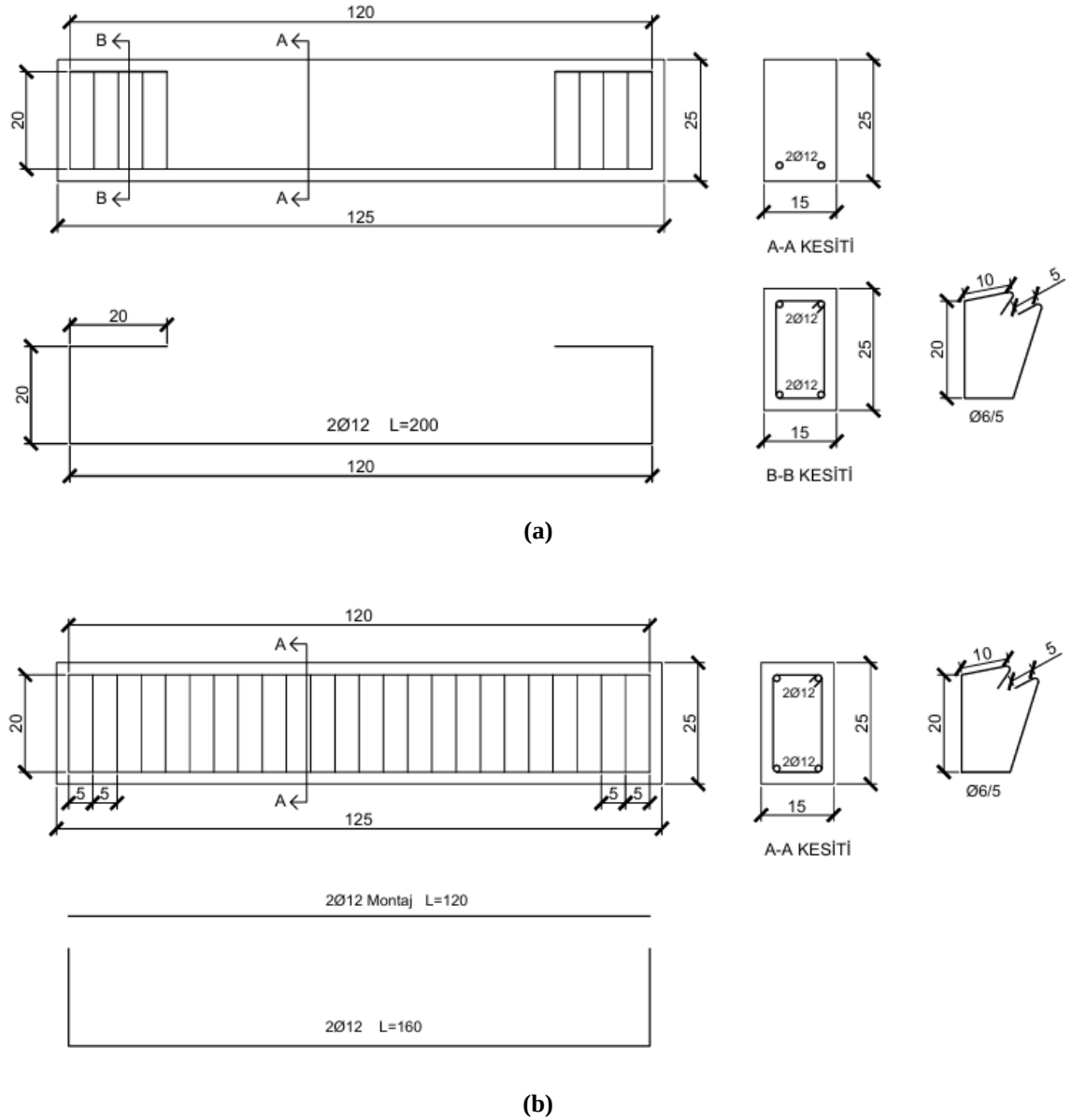
Şekil 3.1. (a) Deney numunelerin 3 boyutlu görünümü, (b) Deney numunelerinin kesit bilgileri

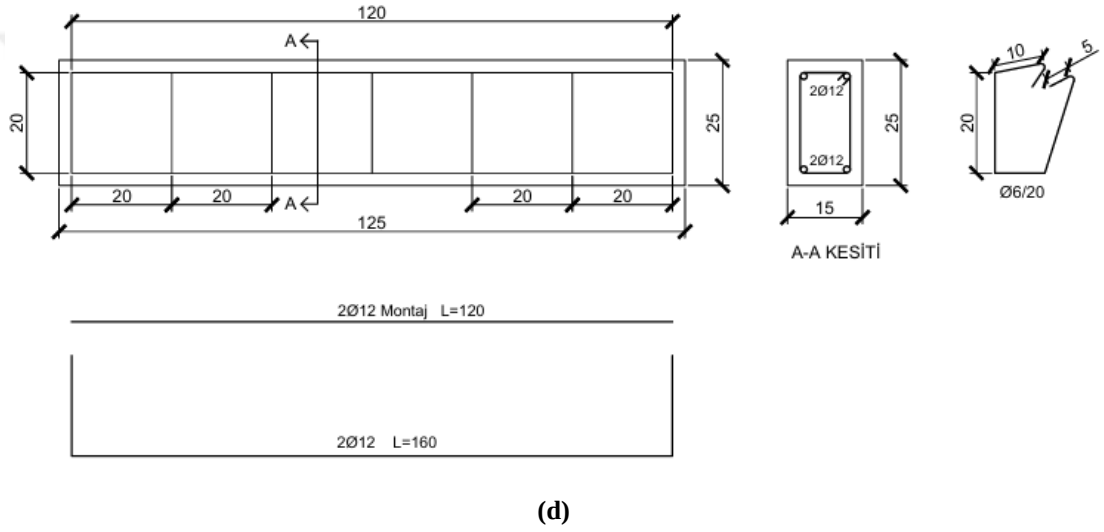
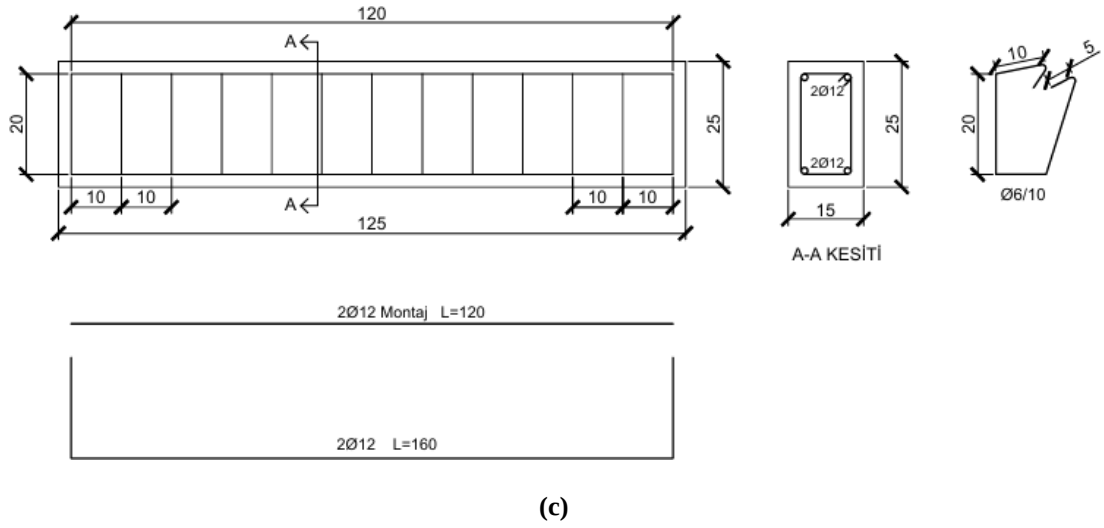
3.1.2. Deney numunelerinin donatı detayları ve özellikleri

Deneyisel çalışmada, numunelerde boyuna donatı olarak 2 ϕ 12 ve 3 ϕ 12 nervürlü ve nervürsüz donatılar kullanılmıştır. Basınç donatısı olarak da benzer şekilde, 2 ϕ 12 nervürlü ve nervürsüz donatılar tercih edilmiştir. Etriye olarak, çapı ϕ 6 mm olan nervürlü ve nervürsüz inşaat demiri kullanılmıştır. Etriyeler, kiriş boyunca sıklaştırma yapılmaksızın yerleştirilmiştir. Etriyelerin yerleştirilmediği 4 adet kiriş numunesi dışında, geri kalan 12 adet kiriş numunesinde etriye, her bir numune için dörder adet olacak şekilde, ϕ 6/5 cm, ϕ 6/10 cm ve ϕ 6/20 cm aralıklarla yerleştirilmiştir. Etriye kullanılmayan kiriş numunelerinin, deney esnasında mesnet bölgelerinde beklenmedik bir hasarın oluşmasının önlenmesi amacıyla 20 cm'lik mesnet bölgelerinde ϕ 6/5 cm çapında enine donatı kullanılmıştır.

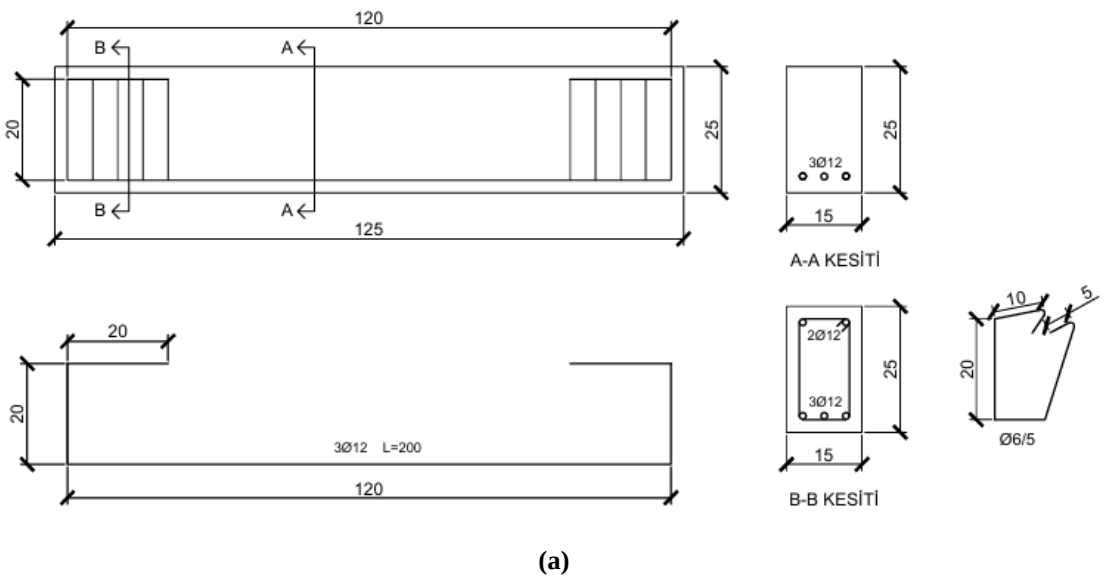
Kiriş numunelerinin pas payı olarak 2,5 cm seçilmiştir. Çalışmada beton dayanımı olarak C25 beton sınıfı tercih edilmiştir. Toplamda 16 adet numune üretilmiş ve bu numuneler farklı donatı tipleri, donatı adetleri ve etriye aralıklarına göre hazırlanmıştır. Numuneler, aynı kesit ve boyutlara sahip olacak şekilde üretilerek parametrelerin karşılaştırma olanağı artırılmıştır.

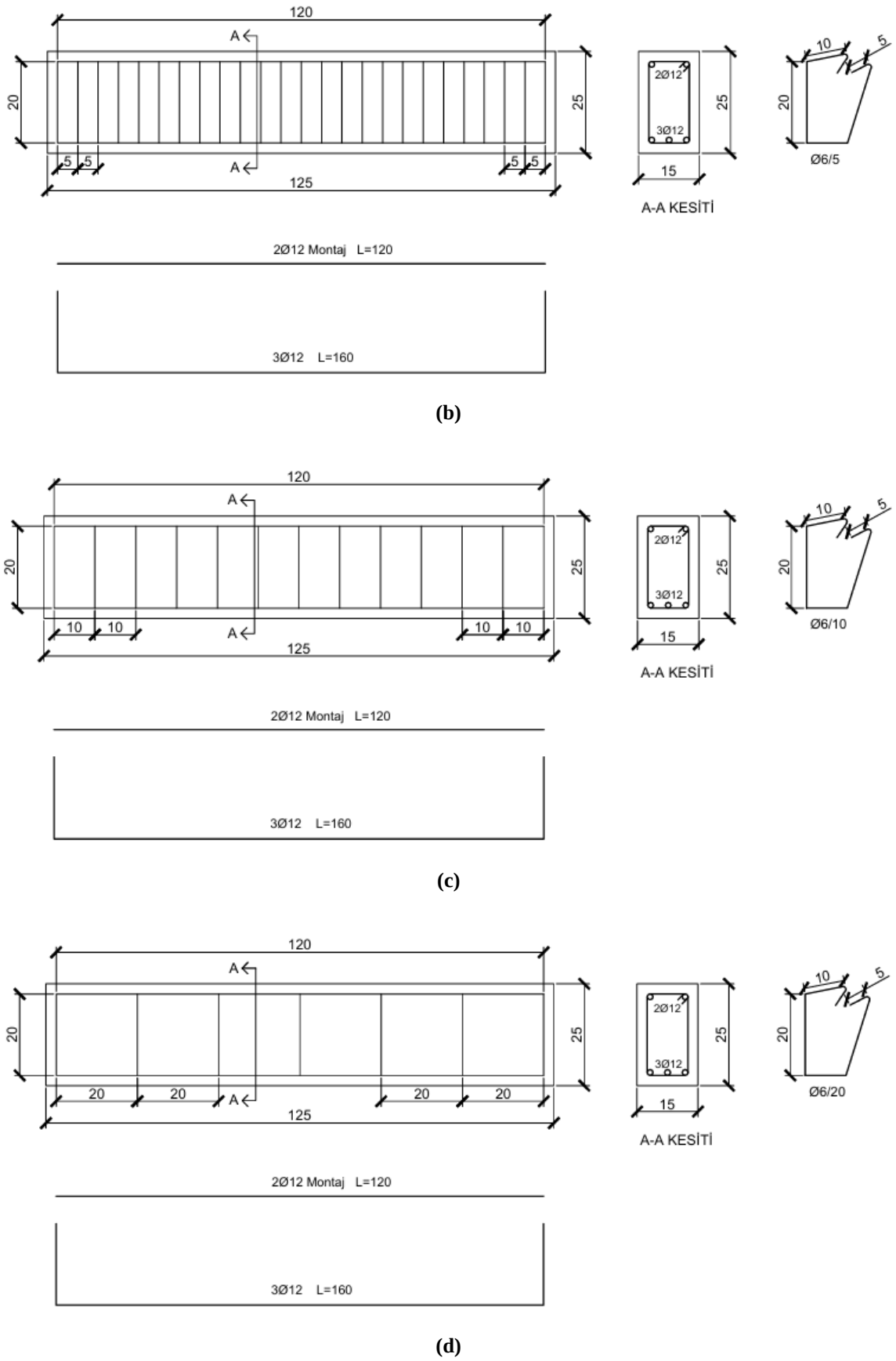
Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te, donatı tipi değişkenine bağlı olarak hazırlanan numunelerde kullanılan boyuna ve enine donatıların detaylı yerleşim planları verilmiştir. Bu çizimlerde, nervürlü ve nervürsüz donatıların dağılımı, çapları, adetleri ve etriye aralıkları açıkça gösterilerek, her bir parametrenin deneysel sonuçlar üzerindeki etkisinin daha doğru şekilde analiz edilmesine olanak sağlanmıştır.





Şekil 3.2. Nervürlü ve nervürsüz donatı tipi kullanılan ve boyuna donatı adeti 2Ø12 olan numunelere ait donatı şeması, (a) Etriyesiz, (b) 5 cm etriye aralığı, (c) 10 cm etriye aralığı ve (d) 20 cm etriye aralığı (Ölçüler cm cinsindendir.)





Şekil 3.3. Nervürlü ve nervürsüz donatı tipi kullanılan ve boyuna donatı adeti 3Ø12 olan numunelere ait donatı şeması, (a) Etriyesiz, (b) 5 cm etriye aralığı, (c) 10 cm etriye aralığı ve (d) 20 cm etriye aralığı (Ölçüler cm cinsindendir.)

Çizelge 3.1’de deney numunelerinin isimlendirmeleri ve özellikleri belirtilmiştir. Adlandırmada kullanılan ilk iki harf “BK” betonarme kiriş anlamına gelmektedir. Ardında Gelen “D” harfi “Düz (nervüzsüz)” donatıyı, “N” harfi ise “Nervürlü” donatıyı temsil etmektedir. “D” ve “N” harflerinden sonra gelen 0, 5, 10 ve 20 sayıları da bırakılacak olan etriye aralıklarını göstermektedir. En sonda “A” harfi boyuna donatı adeti “2 ϕ 12”yi ve “B” harfi boyuna donatı adeti “3 ϕ 12”yi ifade etmektedir.

Çizelge 3.1. Deney numunelerinin isimleri ve özellikleri.

Numune	Donatı Tipi	Kesit (mm)	Boyuna Donatı	Basınç Donatısı	Enine Donatı (cm)	Beton Sınıfı
BK-D-0-A	Düz (Nervüzsüz)	150x250	2 ϕ 12	-	-	C25
BK-D-0-B	Düz (Nervüzsüz)		3 ϕ 12	-	-	
BK-N-0-A	Nervürlü		2 ϕ 12	-	-	
BK-N-0-B	Nervürlü		3 ϕ 12	-	-	
BK-D-5-A	Düz (Nervüzsüz)		2 ϕ 12	2 ϕ 12	ϕ 6/5	
BK-D-5-B	Düz (Nervüzsüz)		3 ϕ 12	2 ϕ 12	ϕ 6/5	
BK-N-5-A	Nervürlü		2 ϕ 12	2 ϕ 12	ϕ 6/5	
BK-N-5-B	Nervürlü		3 ϕ 12	2 ϕ 12	ϕ 6/5	
BK-D-10-A	Düz (Nervüzsüz)		2 ϕ 12	2 ϕ 12	ϕ 6/10	
BK-D-10-B	Düz (Nervüzsüz)		3 ϕ 12	2 ϕ 12	ϕ 6/10	
BK-N-10-A	Nervürlü		2 ϕ 12	2 ϕ 12	ϕ 6/10	
BK-N-10-B	Nervürlü		3 ϕ 12	2 ϕ 12	ϕ 6/10	
BK-D-20-A	Düz (Nervüzsüz)		2 ϕ 12	2 ϕ 12	ϕ 6/20	
BK-D-20-B	Düz (Nervüzsüz)		3 ϕ 12	2 ϕ 12	ϕ 6/20	
BK-N-20-A	Nervürlü		2 ϕ 12	2 ϕ 12	ϕ 6/20	
BK-N-20-B	Nervürlü		3 ϕ 12	2 ϕ 12	ϕ 6/20	

3.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler

3.2.1. Donatı özellikleri

Çalışmada 2 tip donatı cinsi ve 2 tip donatı çapı kullanılmıştır. Nervürlü ve nervürsüz donatılar $\phi 12$ ve $\phi 6$ mm çaplarında olmak üzere temin edilmiş ve kullanmak üzere işleme alınmıştır. Nervürlü ve nervürsüz donatılar ise S420 sınıfındadır. Kullanılan donatı türlerine bağlı olarak elde edilen mekanik özellikler;

S420 için $f_{yk}=420$ MPa, $f_{yd}=365$ MPa'dır.

Her iki donatı cinsine ait iki farklı donatı çapı için üçer tane olmak üzere toplamda 12 adet donatı 1 metre boyunda kesilerek Analiz Müşavirlik Yapı Zemin Lab. Müh. İnş. Taah. Ltd. Şti.'de bulunan çelik çekme deney düzeneği üzerinde test edilmiş (Şekil 3.4) ve kullanılan donatıların cinsine ve çaplarına göre mekanik özellikleri belirlenmiştir (Çizelge 3.2, Çizelge 3.3, Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5).



Şekil 3.4. Çelik çekme deney düzeneği

Çizelge 3.2. $\phi 12$ nervürlü donatıları için elde edilen mekanik özellikler

Elemanın Mekanik Özelliği	Numune - 1	Numune - 2	Numune - 3	Ortalama
Akma Dayanımı - Re (MPa)	396,47	407,68	419,23	407,79
Çekme Dayanımı - Rm (MPa)	497,56	519,06	492,30	502,97
Rm/Re	1,25	1,27	1,17	1,23
Uzama (%)	20,80	21,02	20,68	20,83
Elastisite Modülü (MPa)	211800	218400	207300	212500

Çizelge 3.3. $\phi 6$ nervürlü donatıları için elde edilen mekanik özellikler

Elemanın Mekanik Özelliği	Numune - 1	Numune - 2	Numune - 3	Ortalama
Akma Dayanımı - Re (MPa)	405,36	400,45	388,45	398,09
Çekme Dayanımı - Rm (MPa)	458,93	464,29	472,15	465,12
Rm/Re	1,13	1,16	1,22	1,17
Uzama (%)	20,87	21,44	23,12	21,77
Elastisite Modülü (MPa)	208750	204300	211100	208717

Çizelge 3.4. $\phi 12$ nervürsüz donatıları için elde edilen mekanik özellikler

Elemanın Mekanik Özelliği	Numune - 1	Numune - 2	Numune - 3	Ortalama
Akma Dayanımı - Re (MPa)	392,65	389,49	372,61	398,09
Çekme Dayanımı - Rm (MPa)	465,24	463,16	449,35	465,12
Rm/Re	1,18	1,19	1,20	1,19
Uzama (%)	35,04	35,45	39,32	36,60
Elastisite Modülü (MPa)	218100	216400	206650	213716

Çizelge 3.5. $\phi 6$ nervürsüz donatıları için elde edilen mekanik özellikler

Elemanın Mekanik Özelliği	Numune - 1	Numune - 2	Numune - 3	Ortalama
Akma Dayanımı - Re (MPa)	271,43	264,53	276,75	270,90
Çekme Dayanımı - Rm (MPa)	334,64	308,34	332,76	325,24
Rm/Re	1,23	1,16	1,20	1,20
Uzama (%)	45,26	49,82	46,42	31,53
Elastisite Modülü (MPa)	192800	189400	191600	191267

3.2.2. Beton özellikleri

Deneylerde kullanılacak kiriş numunelerinin üretiminde C25 beton sınıfı tercih edilmiştir. Betonun üretimi, hazırlanması ve dökümü süreçlerinde sektörde faaliyet gösteren Korkmaz Beton A.Ş. ile iş birliği yapılmış; tüm uygulamalar bu kapsamda, standartlara uygun şekilde gerçekleştirilmiştir.

Kullanılacak beton karışımı, katkı malzemesi içermeyen C25 sınıfı beton olarak belirlenmiştir. Bu karışımda kullanılan çimento, su, agrega ve diğer bileşenlerin oranları, hedeflenen basınç dayanımına ulaşmak ve homojen bir beton elde edebilmek amacıyla teknik gereklilikler doğrultusunda özenle ayarlanmıştır. Karışımın hazırlanmasında kullanılan malzemelerin miktarları ve özellikleri, Şantiye ve laboratuvar uygulamalarında yaygın kabul görmüş esaslara göre düzenlenmiş olup, ilgili bilgiler Çizelge 3.6’da gösterilmiştir. Numune boyutlarında $\frac{1}{2}$ elemanların ölçekli üretilmesi nedeniyle karışımda 16 mm’den büyük agregalar kullanılmamıştır.

Çizelge 3.6. Betonarme Kirişlerin Betonlarına Ait Malzeme Karışım Oranları

Malzemeler	Formül Miktarı (kg/m ³)
Portland Çimento (CEM 42.5)	320
Su	180
0-4 Agrega	1130
8-16 Agrega	750
Toplam	2380

Beton döküm işlemi, Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne bağlı Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmiştir. Döküm esnasında, betonun karakteristik basınç dayanımının tespit edilebilmesi amacıyla TS EN 12390-1 (2021) standardı esas alınarak, 15×15×15 cm boyutlarında toplam 5 adet küp numune hazırlanmıştır. Her bir kalıp, üç eşit katman hâlinde doldurulmuş; her katman için 25’er kez şişleme ve tokmaklama işlemi uygulanarak homojen sıkışma ve boşluksuz bir beton elde edilmesi sağlanmıştır.

Hazırlanan numuneler, dökümden 24 saat sonra kalıplarından çıkarılmış ve ardından 28 gün sürecek standart kür işlemine tabi tutulmak üzere kür havuzuna yerleştirilmiştir. Kür süresi sonunda, numuneler havuzdan alınarak, C25 sınıfı betonun nihai basınç dayanımının belirlenebilmesi amacıyla basınç testine tabi tutulmuştur. Bu testler, cihaz kalibrasyonları doğrulanmış ve deney ortamı TS EN 12390-3 (2019) standardı ile uyumlu olan Büyük Selçuklu Yapı Laboratuvarı A.Ş. bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Basınç testine tabi tutulan küp numunelerin deney sonuçları ve özellikleri Çizelge 3.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7. Deney numunelerine ait özellikler

Numune No	Yük (kN)	Kesit Alanı (mm ²)	Küp Dayanımı (MPa)	Ortalama Küp Dayanımı (MPa)	Silindir Dayanımı (MPa)	Ortalama Eşdeğer Silindir Dayanımı (MPa)
1	786,45	22.500	34,953	34,882	28,320	28,386
2	777,07		34,536		27,946	
3	792,76		35,233		28,571	
4	805,37		35,794		29,075	
5	762,63		33,894		27,371	

Ortalama küp dayanımı 34,882 MPa olarak tespit edilmiştir. Çizelge 3.7’de elde edilen küp dayanımları Denklem 3.1 kullanılarak silindir basınç dayanımı değerleri bulunmuştur (Kaplan, 2004):

$$f'_c = \left[0,76 + 0,2 \times \log_{10} \left(\frac{f_{cu}}{19,6} \right) \right] \times f_{cu} \quad (3.1)$$

Ortalama silindir basınç dayanımları 28,386 MPa olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre istenilen dayanımda betonun temin edildiği sonucuna ulaşılmıştır.

3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney numuneleri, Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne ait Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı’nda üretilmiştir. Numunelerin üretimine geçilmeden önce, kullanılacak tüm malzemeler temin edilmiş ve eksik olan ekipmanlar tamamlanmıştır.

Üretim sürecinin ilk aşamasında, deneyde kullanılacak donatılar belirlenmiş ve temin edilmiştir. Donatılar, daha önce hazırlanan yerleşim planlarına uygun olarak kesilmiş ve gerekli bükme işlemleri yapılmıştır. Bu işlemler sırasında, her donatının ölçüleri ve şekilleri dikkatlice kontrol edilmiştir. Donatıların şekillendirilmesinin ardından, parçalar birleştirilerek montaj aşamasına geçilmiştir. Bu süreçte, numunelerin doğru bir şekilde birleşmesi sağlanmış ve her aşama titizlikle kontrol edilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Deney numunelerine ait donatı kafesleri

Beton dökümüne geçilmeden önce, kalıplar gerekli ölçülere göre kesilmiş ve birleştirilerek hazır hale getirilmiştir. Deney düzeneğinin doğru çalışıp çalışmadığını test edebilmek amacıyla, iki adet fazladan test numunesi üretilmesine karar verilmiştir. Bu nedenle, toplamda 18 adet numunenin elde edilebileceği şekilde kalıp hazırlıkları yapılmıştır.

Hazırlanan kalıpların çevresi, beton dökümü sırasında ve sonrasında herhangi bir esneme veya açılma meydana gelmesini önlemek amacıyla 5x10 cm ölçülerinde tahtalarla kuşatılarak sabitlenmiştir. Kalıplar uygun kalıp yağı ile yağlanmış ve önceden birleştirilen donatı kafesleri dikkatlice kalıpların içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.6). Donatıların yerleştirilmesi sırasında, betonun donatı ile yeterli aderansı sağlayabilmesi ve pas payının korunabilmesi amacıyla, her numune için 2,5 cm'lik plastik pas payı aparatlar kullanılmıştır. Tüm bu işlemlerin tamamlanmasının ardından, numuneler beton dökümüne hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.6. Donatı kafeslerinin kalıplara yerleştirilmesi

Beton dökümüne ilişkin tüm hazırlıkların tamamlanmasının ardından, beton temini için ilgili beton firmasına sipariş verilmiştir. Bu kapsamda, katkısız C25 beton sınıfında 1 m³ hazır beton talep edilmiştir. Sipariş edilen beton, transmikser aracılığıyla laboratuvara getirilmiş ve ilgili standartlara uygun olarak döküm işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Sipariş edilen betonun transmikser ile laboratuvara getirilmesi

Beton döküm işlemleri, TS 500 (2000) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8’de bu çalışmaya ait beton döküm süreci sonrası kalıplar görsel olarak sunulmuştur. Tüm numuneler için katkısız hazır beton kullanılmış olup, döküm işlemi aynı gün içerisinde, kesintisiz olarak tamamlanmıştır. Betonun kalıplar içerisine düzgün bir şekilde yerleşmesini ve sıkılaşmasını sağlamak amacıyla, belirli aralıklarla vibratör uygulaması yapılmıştır. Aynı zamanda, beton basınç dayanım testlerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla, deneysel prosedürlere uygun olarak 5 adet küp numune alınmıştır.



Şekil 3.8. Beton döküm işlemi sonrası deney numuneleri

Beton dökümünden yaklaşık 12 saat sonra, betonun prizini almaya başlamasıyla birlikte numuneler üzerine düzenli olarak su püskürtülerek kürleme işlemine başlanmıştır. Uygulanan nemli kür işlemi, betonun dayanım gelişiminin sağlıklı bir şekilde tamamlanabilmesi amacıyla toplam 28 gün boyunca sürdürülmüştür (Şekil 3.9). Betonun erken yaş dayanımını olumsuz etkilememesi ve kalıpların sökümü sırasında yapısal bütünlüğün korunabilmesi için numuneler, dökümden 4 gün sonra kalıplardan dikkatli bir şekilde çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler, doğrudan güneş ışığından ve ani sıcaklık değişimlerinden korunacak şekilde laboratuvar ortamında istiflenmiş ve bu koşullar altında kür sürecine devam edilmiştir (Şekil 3.10).



Şekil 3.9. Deney numunelerin ve küp numunelerin kür işlemi



Şekil 3.10. Deney numunelerin laboratuvar içinde istiflenmesi

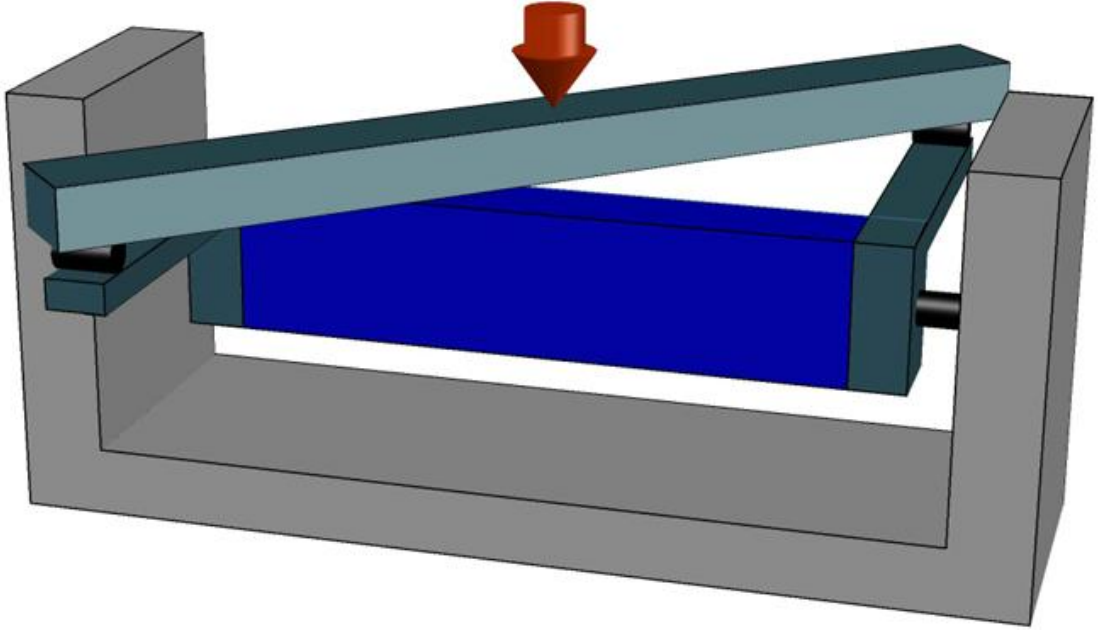
3.4. Deney Düzenekinin Hazırlanması ve Ölçüm Tekniği

Deneyisel çalışmalar kapsamında hazırlanan toplam 18 numuneden 2 adedi, deney düzeneğinin kurulumu ve ön testlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Tezin ana konusu doğrultusunda üretilen 16 adet betonarme kiriş numunesi ise, deney düzeneğinde uygulanacak yükleme prosedürlerine uygun şekilde test edilmiştir.

Deneylerde, yükleme işlemi hidrolik silindir aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve çapraz konumda yerleştirilen yük dağıtıcı çelik kirişe yük uygulanmıştır. Bu çelik kirişin her iki ucunda yer alan ve betonarme numunelere bağlantı sağlayan çelik kuvvet kolları aracılığıyla numunelere burulma momenti uygulanması sağlanmıştır. Deney esnasında uygulanan yük seviyelerinin izlenmesi amacıyla yük hücrelerinden faydalanılmış, kiriş elemanlarındaki yer değiştirmeleri belirlemek için ise potansiyometrik cetveller kullanılmıştır.

Elde edilen yük ve deplasman verileri, veri toplama sistemi aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılmış ve deney süresince tüm ölçümler kayıt altına alınmıştır. Bu süreçte, tüm ölçüm cihazlarının kalibrasyonlarının uygunluğu da test öncesinde kontrol edilmiştir.

Deney düzeneğinin kurulmasından önce literatür taraması yapılarak farklı deney düzenekleri incelenmiş, yapılan karşılaştırmalar neticesinde çalışmanın kapsamına en uygun olan sistem belirlenmiş ve Şekil 3.11’de gösterilen şematik düzeneğe karar verilmiştir.



Şekil 3.11. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

3.4.1. Deney düzeneğinin hazırlanması

Deneyisel çalışma kapsamında kullanılan deney düzeneği, Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı’nda yer alan mevcut çelik çerçeve üzerine sabitlenmiştir. Deney düzeneğinin tasarımı doğrultusunda, numunelerin her iki uçtan sabitlenerek burulma etkisine maruz bırakılabilmesi amacıyla “U” formunda bir çelik çerçeve oluşturulmuştur (Şekil 3.12). Bu çelik çerçeve, deney numunelerinin burulma hareketini gerçekleştirebilmesine olanak tanıyacak şekilde planlanmıştır.



Şekil 3.12. “U” formunda oluşturulan çelik çerçevenin görünümü

Çerçevenin dikey elemanlarına, numunelerin dönme serbestliğini sağlamak amacıyla uygun çapta delikler açılmıştır. Bu yapısal düzenleme, numunelerin deney sırasında herhangi bir kısıtlama olmaksızın dönmesini mümkün kılarak burulma testlerinin daha doğru ve güvenilir bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlamıştır.

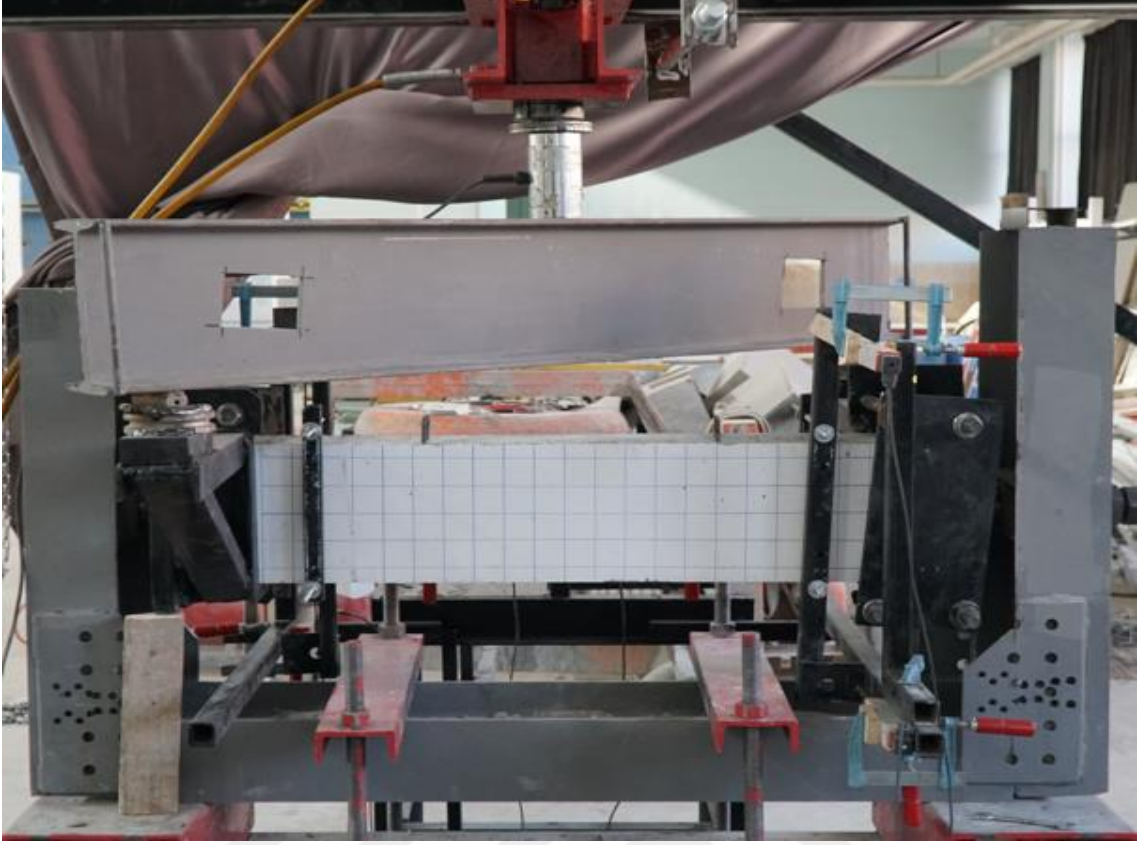
Deney numunelerinin her iki uçtan sarılarak sabitlenebilmesi amacıyla özel çelik kafes yapıları tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu çelik kafes yapıları, numunelerin güvenli bir şekilde kavranmasını sağlarken, aynı zamanda deney esnasında numunelerde oluşabilecek hareketleri minimize etmeye yönelik tasarlanmıştır. Ayrıca, burulma momentinin etkin bir şekilde uygulanabilmesi için, kafes sistemlerine kuvvet kolları entegre edilmiştir. Bu kuvvet kolları, gelen yükü eşit şekilde numune üzerine iletilmesini sağlayarak burulma momentinin oluşumunu sağlamıştır.

Kafeslerin arka yüzeyleri, deney düzeneğini oluşturan "U" şeklindeki çelik çerçeve ile birleştirilmiş ve bu birleşim, numunenin dengeli bir şekilde dönmesini sağlamak için gerekli olan yapısal bütünlüğü güçlendirmiştir. Çelik kafes ve “U” şeklindeki çelik çerçevenin birleşim kısımları gres yağı ile yağlanmıştır. Bu sayede oluşturulan sabit “U” şeklinde çelik çerçeveye entegre edilen çelik kafesler ve çelik kafeslere yerleştirilmiş olan deney numunelerinin yük altında sorunsuz dönmesi sağlanmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. “U” formunda oluşturulan çelik çerçeye entegre edilen elemanların gösterimi

Kuvvet kolları üzerine çapraz şekilde yerleştirilmek üzere çelik bir yük dağıtıcı kiriş temin edilmiştir. Bu yük dağıtıcı kirişin tam orta noktasına, yük uygulamasının kontrollü bir şekilde gerçekleştirilebilmesi amacıyla çelik silindir ile birlikte bir yük hücresi (Load Cell) yerleştirilmiştir. Bu sistem aracılığıyla uygulanan kuvvet, kuvvet kolları yardımıyla betonarme kiriş numunelerine aktarılmış ve burulma momenti oluşturulmuştur. Deney düzeneğine ait genel görünüm Şekil 3.14’te yer almaktadır.



Şekil 3.14. Deney düzeneğinin genel görünümü

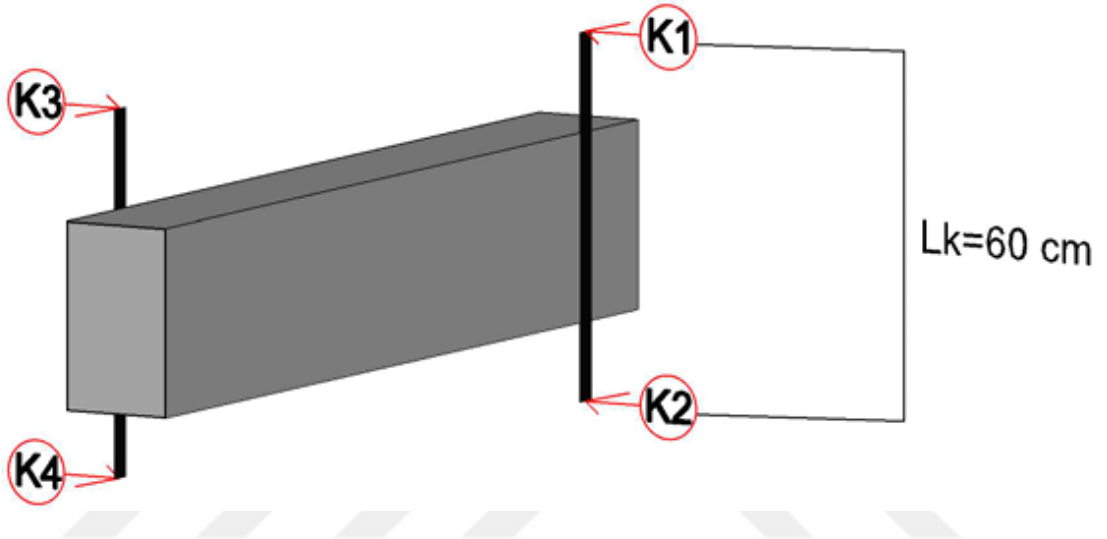
3.4.2. Ölçüm tekniği

Deneylerde uygulanan yüklerin doğru şekilde ölçülmesi için 300 kN kapasitesine sahip bir yük hücresi ve hidrolik silindir kullanılmıştır. Bu sistem, kirişin üst kısmına, kirişin uzunlamasına doğrultuda yerleştirilmiş ve yük aktarımı sağlanmıştır. Yük hücresinden ve potansiyometrik cetvellerden alınan veriler, kablolar aracılığıyla veri toplama sistemine iletilmiştir. Veri toplama sistemi, elde edilen verileri bir aygıt geçidi üzerinden bilgisayar ortamına aktarmıştır. Bilgisayar ortamında kullanılan deney yazılımı ile deneyler kontrol edilmiş ve kaydedilen veriler düzenli olarak depolanmıştır. Ardından, veriler bir hesaplama programına aktarılmış ve çeşitli hesaplamalar ve grafikler oluşturulmuştur.

Kirişlerin burulma davranışlarının detaylı şekilde analiz edilebilmesi için, yük etkisi altında meydana gelen dönme ve uzama miktarlarının hassas biçimde ölçülmesi gereklidir. Öncelikle tüm deneylerde yükleme protokolü olarak 0,5 rad/s yükleme hızı uygulanmıştır. Deneylerde toplam altı adet potansiyometrik deplasman ölçer (LVDT) kullanılmıştır. 200 mm deplasman kapasitesine sahip olan bu LVDT'lerden dört tanesi

numunelerin uç kısımlarının yan yüzeylerine, numuneye dik şekilde yerleştirilmiş olup, moment-dönme ilişkisi, rijitlik azalımı ve enerji sönümlleme kapasitesi grafiklerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Diğer iki adet LVDT ise numunelerin arka yüzeyinde, birbirine karşılıklı ve numuneye paralel olarak konumlandırılarak, deney süresi boyunca numunelerde meydana gelen birim uzamaların belirlenmesini sağlamıştır.

LVDT'lerin deney düzeneği üzerindeki yerleşim detayları Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da sunulmuştur.

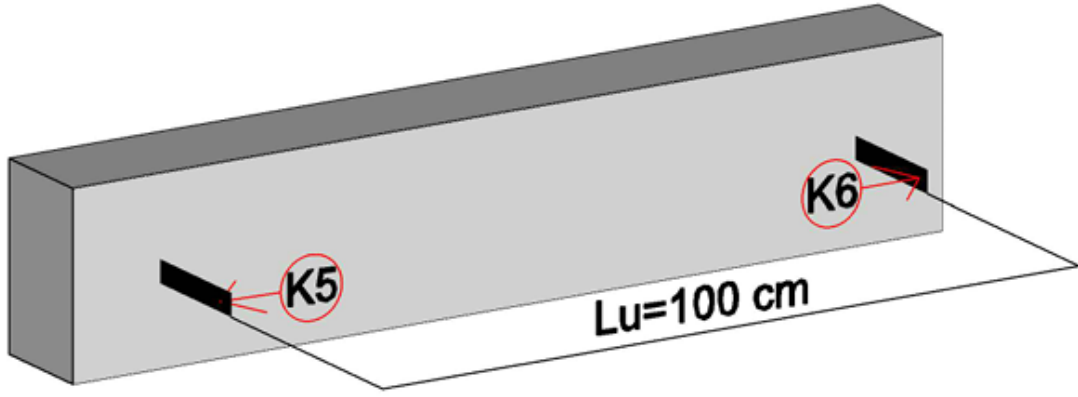


Şekil 3.15. Deney numunelerinin dönme açısını tespit etmek için yerleştirilen LVDT'lerin şematik gösterimi

Şekil 3.15'teki LDVT yerleşimlerine göre okunan değerler sayesinde numunelerin dönme açısı elde edilmektedir. Denklem 3.2'de sunulan ilgili bağlantıdan numunelerin dönme açıları elde edilmiştir.

$$\theta_{rad} = \frac{(K2-K1)+(K3-K4)}{60} \quad (3.2)$$

Denklemden gösterilen K2 ve K3 pozitif yönde, K1 ve K4 ise negatif yönde değer verdiği için sağ ve sol dönmeler kendi içlerinde çıkartılmıştır. Yani mutlak değer halinde hepsinin toplamı elde edilmiştir.



Şekil 3.16. Deney numunelerinin birim uzamalarını tespit etmek için yerleştirilen LVDT'lerin şematik gösterimi

Şekil 3.16'daki LDVT yerleşimlerine göre okunan değerler sayesinde numunelerin birim boy uzamaları elde edilmiştir. Denklem 3.3'te sunulan ilgili bağlantıdan numunelerin birim boy uzamaları elde edilmiştir.

$$\Delta L = (K5 + K6) \quad (3.3)$$

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

Burulma etkisi altındaki deney numunelerinin davranışlarını incelemek amacıyla, her bir numune için elde edilen deney sonuçları ve davranış özellikleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, parametrelerine göre ayrılıp ardından karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Deneylerde, monolitik yükleme altında test edilen kiriş numunelerinin kesit boyutları ve beton dayanımları sabit tutulmuş, ancak donatı türü, boyuna donatı adeti ve etriye aralıkları gibi parametreler değiştirilmiştir. Deneylerde maksimum kapasitenin %15 azaldığı noktayı tespit edebilmek amacıyla, tüm numuneler 0,3 radyan dönme açısına ulaşılan kadar yüklemeye devam etmiştir. Yükleme süresi boyunca ölçülen yük ve deplasman verileri kullanılarak moment-dönme ilişkileri hesaplanmıştır. Ayrıca, test öncesinde numunelere 5x5 cm boyutlarında bir karelaj uygulanarak, oluşan çatlakların yönü ve açısı daha net bir şekilde gözlemlenmiştir.

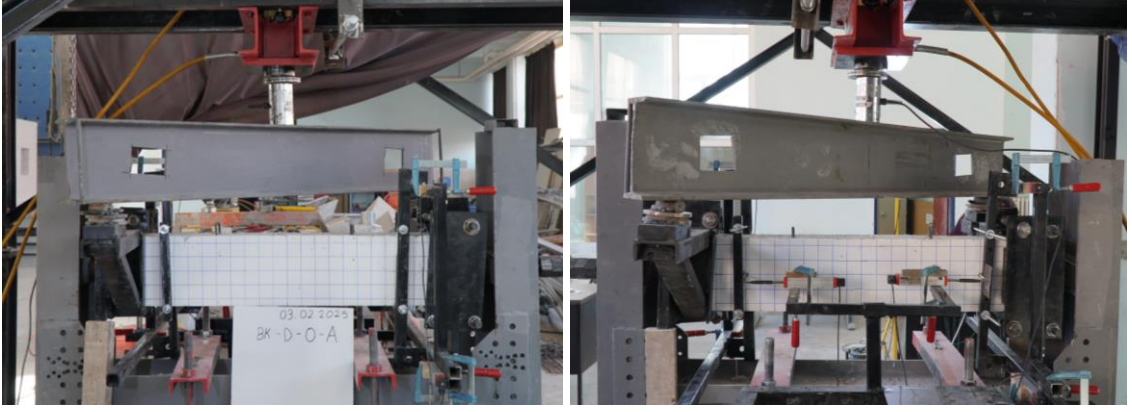
Deney sonuçlarının yorumlanabilmesi ve numunelerin davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi için elde edilen veriler grafikler aracılığıyla sunulmuştur. Sonuçların daha açık bir şekilde anlaşılması amacıyla, deneylerden elde edilen grafikler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Her bir numune için aşağıdaki grafikler:

- Moment-Dönme Grafiği
- Burulma Rijitliği Grafiği
- Toplam Enerji Grafiği,
elde edilmiştir.

4.1. Deney Sonuçları

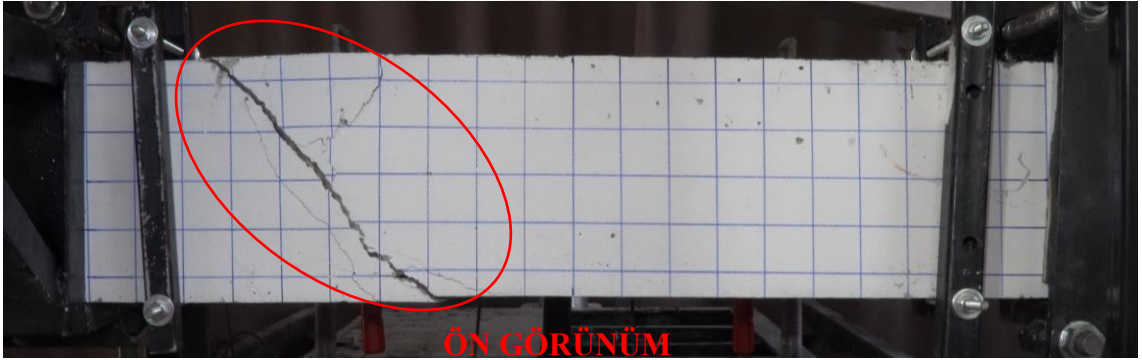
4.1.1. Deney 1 (BK-D-0-A)

Çalışma kapsamında BK-D-0-A numunesinde etriyelerin bulunmadığı (mesnet bölgeleri hariç), boyuna donatı adetinin 2 ϕ 12 olduğu ve donatı cinsinin nervürlü donatı olduğu durumlar çerçevesinde testi yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney düzeneği deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.1).



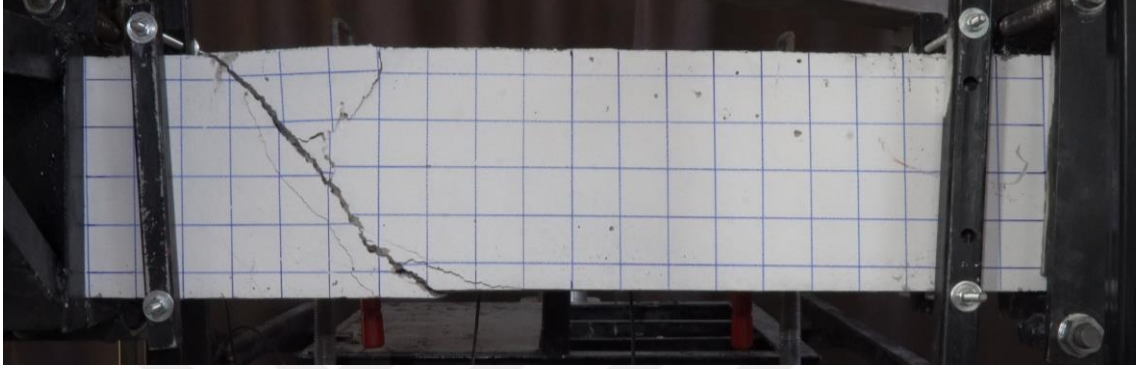
Şekil 4.1. BK-D-0-A numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney elemanında ilk çatlak $2,61 \times 10^{-3}$ radyan değerinde meydana gelmiştir ve bu dönme değerinde burulma momenti taşıma kapasitesi ise 14,25 kNm olarak kaydedilmiştir. Çatlaktan sonra yeni bir çatlak meydana gelmemiştir ve yükleme süresince aynı çatlak genişlemeye devam etmiştir. İlk çatlak oluşum değerinin aynı zamanda maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine eşit olduğu tespit edilmiştir. Hasar kirişin sol-orta bölgesi arasında yaklaşık 45° 'lik bir açı ile meydana gelmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. BK-D-0-A numunesi ilk çatlak ve maksimum burulma momenti değerlerinde ön ve arka yüzey için hasar durumu

Numunenin moment-dönme eğrisinde belirgin bir azalma oluşturduğu ve bu azalmanın genellikle %15 kapasite kaybına ulaştığında göçme kabul edildiği nokta belirlenmiştir (Eurocode 8, 2004; Ünal, 2016). Bu noktada numunede $8,13 \times 10^{-3}$ radyan dönme meydana gelmiştir. Göçme durumunda burulma momenti taşıma kapasitesi değerinin 12,09 kNm olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.3'te göçme noktasına ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.3. BK-D-0-A numunesi göçme noktası hasar durumu

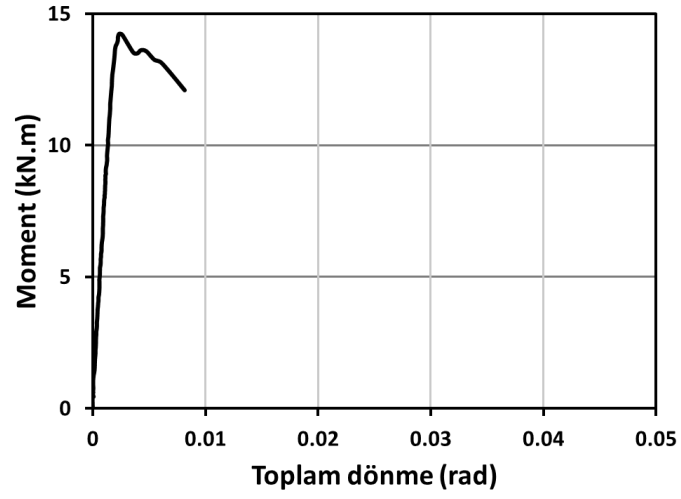
Deney elemanının deney süresince birim uzama miktarı 0,82 mm olarak ölçülmüştür.

Deneyler sırasında, yük hücresi ve potansiyometrik cetveller aracılığıyla elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak, elemanın burulma davranışı incelenmiştir. Bu verilerden, burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler, burulma rijitliğini açıklayan grafikler ve toplam enerji değişimini ortaya koyan grafikler her deney için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

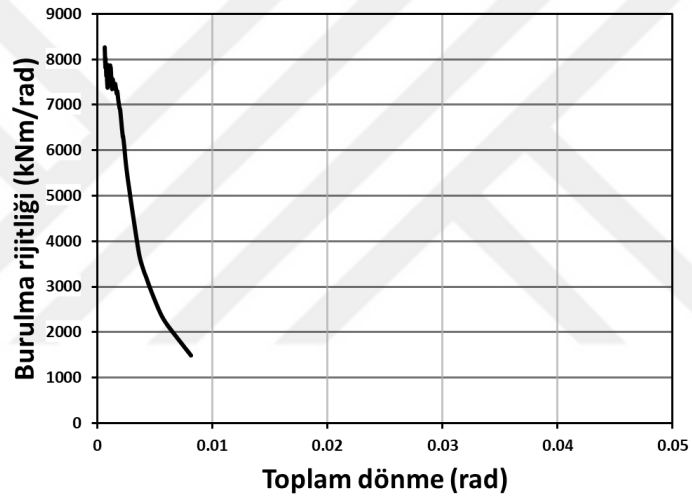
Moment ve toplam dönme arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.4'te yer almaktadır.

Deneylerde okunan maksimum burulma momenti, elemanın dönmesiyle bölünerek burulma rijitliği hesaplanmış ve Şekil 4.5'te bu değerler sunulmuştur.

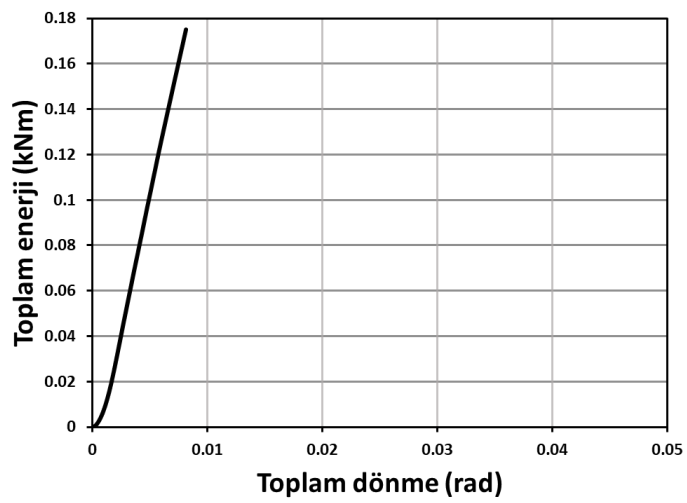
Toplam dönme eğrisinin altındaki alan, tüketilen enerji miktarını belirlemek amacıyla hesaplanmış ve buna dayalı olarak toplam enerji grafiği Şekil 4.6'da sunulmuştur.



Şekil 4.4. BK-D-0-A numunesinin burulma momenti-toplam dönme grafiği



Şekil 4.5. BK-D-0-A numunesinin toplam enerji-toplam dönme grafiği



Şekil 4.6. BK-D-0-A numunesinin burulma rijitliği-toplam dönme grafiği

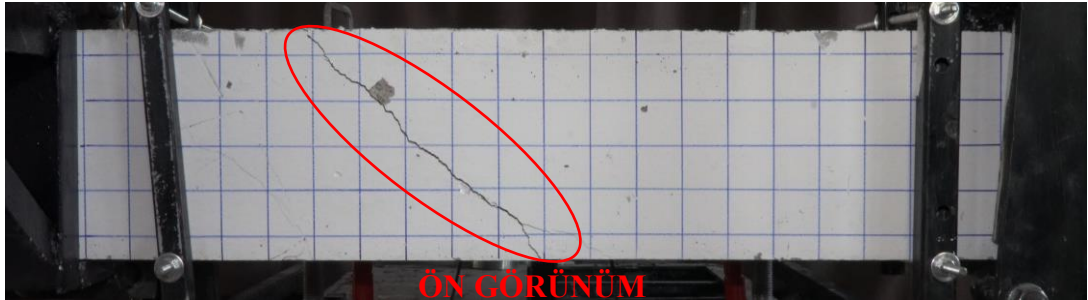
4.1.2. Deney 2 (BK-D-0-B)

Çalışma kapsamında BK-D-0-B numunesinde etriyelerin bulunmadığı (mesnet bölgeleri hariç), boyuna donatı adetinin 3 ϕ 12 olduğu ve donatı cinsinin nervürlü donatı olduğu durumlar çerçevesinde testi yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney düzeneği deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.7).



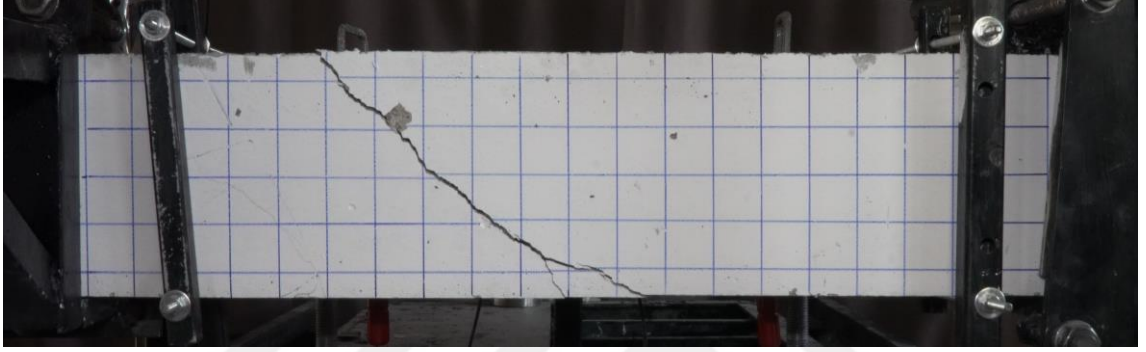
Şekil 4.7. BK-D-0-B numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney elemanına ait ilk çatlak $2,73 \times 10^{-3}$ radyan değerinde meydana gelmiştir ve bu dönme değerinde burulma momenti taşıma kapasitesi ise 13,60 kNm olarak kaydedilmiştir. İlk çatlak oluşum değerinin aynı zamanda maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine eşit olduğu tespit edilmiştir. Hasar, kirişin ön yüzünde sol-orta bölge arasında yaklaşık 45° 'lik açıyla oluşmuştur (Şekil 4.8). Arka yüzeyde ise benzer eğimli bir çatlak ile yatay bir çatlak gözlenmiştir.



Şekil 4.8. BK-D-0-B numunesi ilk çatlak ve maksimum burulma momenti değerlerinde ön ve arka yüzey için hasar durumu

Numunenin moment-dönme eğrisinde belirgin bir azalma oluşturduğu ve bu azalmanın genellikle %15 kapasite kaybına ulaştığında göçme kabul edildiği nokta belirlenmiştir (Eurocode 8, 2004; Ünal, 2016). Bu noktada numunede $8,44 \times 10^{-3}$ radyan dönme meydana gelmiştir. Göçme durumunda burulma momenti taşıma kapasitesi değerinin 11,56 kNm olduğu tespit edilmiştir. Göçme noktasına ait deney elemanının hasar durumu incelendiğinde ilk çatlak değerinde oluşan çatlağın belirginliklerinin arttığı ve kabuk betonda atmaların olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.9'da göçme noktasına ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.9. BK-D-0-B numunesi göçme noktası değerinde hasar durumu

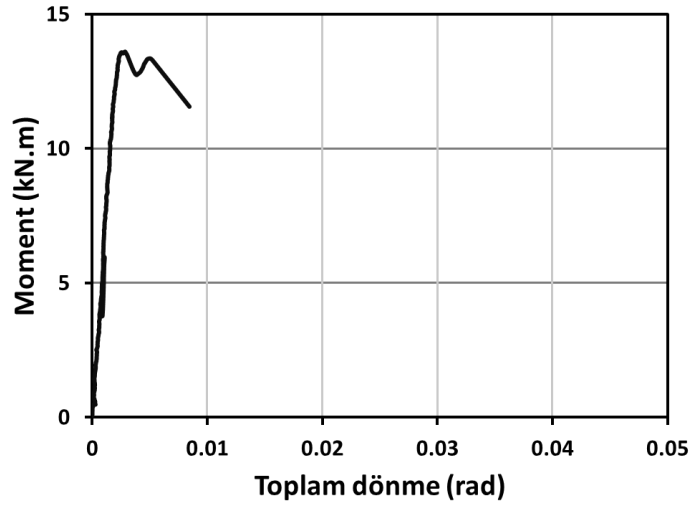
Deney elemanının deney süresince birim uzama miktarı 0,17 mm olarak ölçülmüştür.

Deneyler sırasında, yük hücresi ve potansiyometrik cetveller aracılığıyla elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak, elemanın burulma davranışı incelenmiştir. Bu verilerden, burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler, burulma rijitliğini açıklayan grafikler ve toplam enerji değişimini ortaya koyan grafikler her deney için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

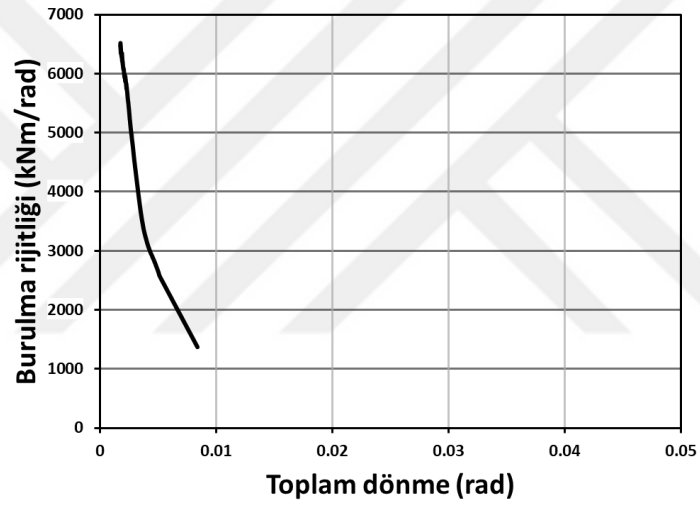
Moment ve toplam dönme arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.10'da yer almaktadır.

Deneylerde okunan maksimum burulma momenti, elemanın dönmesiyle bölünerek burulma rijitliği hesaplanmış ve Şekil 4.11'de bu değerler sunulmuştur.

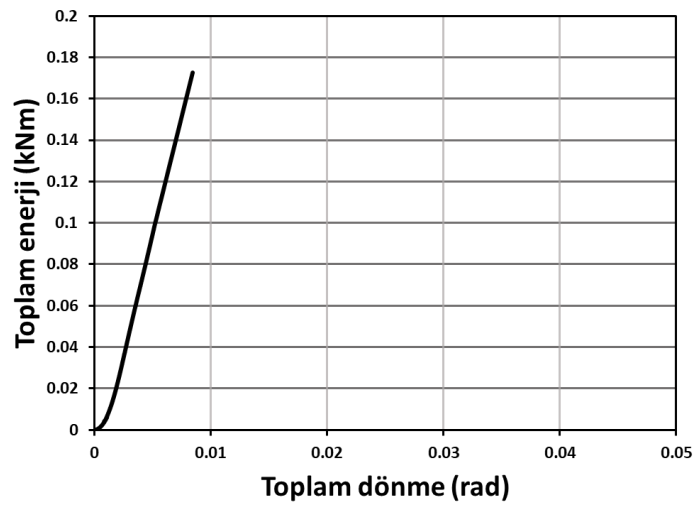
Toplam dönme eğrisinin altındaki alan, tüketilen enerji miktarını belirlemek amacıyla hesaplanmış ve buna dayalı olarak toplam enerji grafiği Şekil 4.12'de sunulmuştur.



Şekil 4.10. BK-D-0-B numunesinin burulma momenti-toplam dönme grafiği



Şekil 4.11. BK-D-0-B numunesinin burulma rijitliği-toplam dönme grafiği



Şekil 4.12. BK-D-0-B numunesinin toplam enerji-toplam dönme grafiği

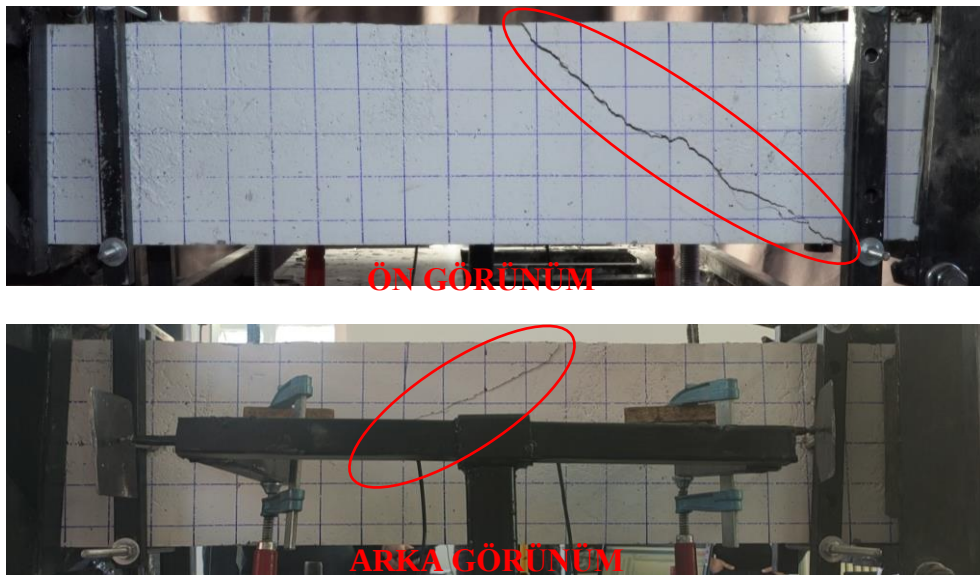
4.1.3. Deney 3 (BK-N-0-A)

Çalışma kapsamında BK-N-0-A numunesinde etriyelerin bulunmadığı (mesnet bölgeleri hariç), boyuna donatı adetinin $2\phi 12$ olduğu ve donatı cinsinin nervürlü donatı olduğu durumlar çerçevesinde testi yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney düzeneği deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.13).



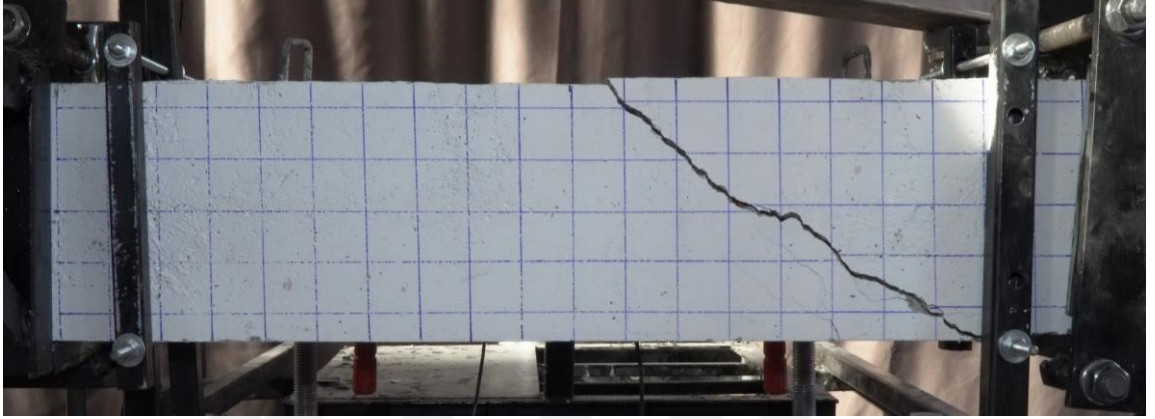
Şekil 4.13. BK-N-0-A numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney elemanına ait ilk çatlak $3,54 \times 10^{-3}$ radyan değerinde meydana gelmiştir ve bu dönme değerinde burulma momenti taşıma kapasitesi ise 14,64 kNm olarak kaydedilmiştir. Çatlaktan sonra ana çatlak etrafında 2 adet kılcal çatlak meydana gelmemiştir ve yükleme süresince ana çatlak üzerinde genişlemeye devam etmiştir. İlk çatlak oluşum değerinin aynı zamanda maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine eşit olduğu tespit edilmiştir. Hasar kirişin orta-sağ bölgesi arasında yaklaşık 45° ’lik bir açı ile meydana gelmiştir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. BK-N-0-A numunesi ilk çatlak ve maksimum burulma momenti değerlerinde ön ve arka yüzey için hasar durumu

Numunenin moment-dönme eğrisinde belirgin bir azalma oluşturduğu ve bu azalmanın genellikle %15 kapasite kaybına ulaştığında göçme kabul edildiği nokta belirlenmiştir (Eurocode 8, 2004; Ünal, 2016). Bu noktada numunede $8,43 \times 10^{-3}$ radyan dönme meydana gelmiştir. Göçme durumunda burulma momenti taşıma kapasitesi değerinin 12,44 kNm olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.15'te göçme noktasına ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.15. BK-N-0-A numunesi göçme noktası değerinde hasar durumu

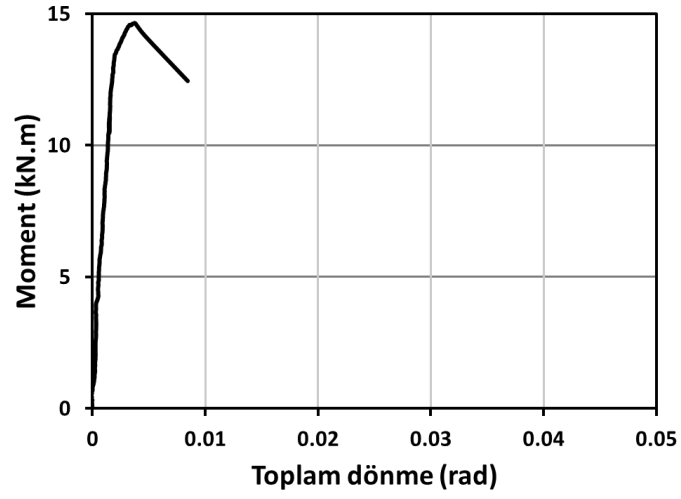
Deney elemanının deney süresince birim uzama miktarı 3,90 mm olarak ölçülmüştür.

Deneyler sırasında, yük hücresi ve potansiyometrik cetveller aracılığıyla elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak, elemanın burulma davranışı incelenmiştir. Bu verilerden, burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler, burulma rijitliğini açıklayan grafikler ve toplam enerji değişimini ortaya koyan grafikler her deney için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

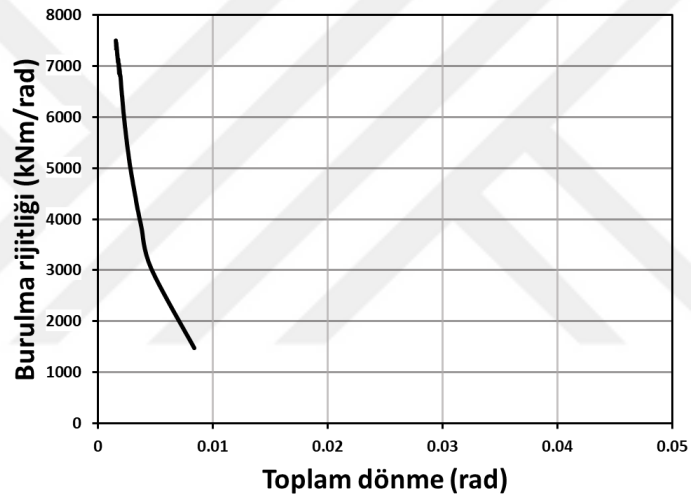
Moment ve toplam dönme arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.16'da yer almaktadır.

Deneylerde okunan maksimum burulma momenti, elemanın dönmesiyle bölünerek burulma rijitliği hesaplanmış ve Şekil 4.17'de bu değerler sunulmuştur.

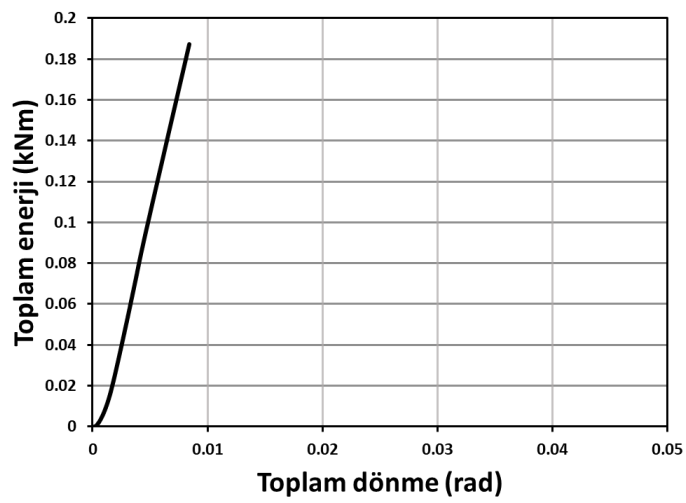
Toplam dönme eğrisinin altındaki alan, tüketilen enerji miktarını belirlemek amacıyla hesaplanmış ve buna dayalı olarak toplam enerji grafiği Şekil 4.18'de sunulmuştur.



Şekil 4.16. BK-N-0-A numunesinin burulma momenti-toplam dönme grafiği



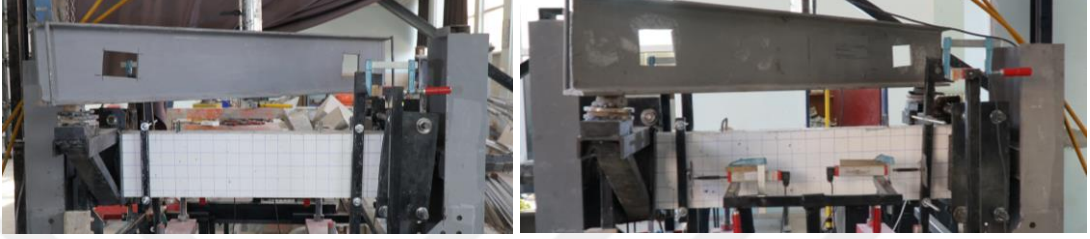
Şekil 4.17. BK-N-0-A numunesinin burulma rijitliği-toplam dönme grafiği



Şekil 4.18. BK-N-0-A numunesinin toplam enerji-toplam dönme grafiği

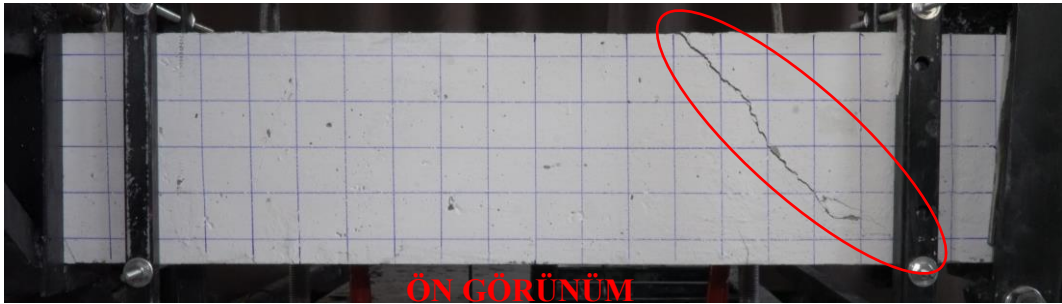
4.1.4. Deney 4 (BK-N-0-B)

Çalışma kapsamında BK-N-0-B numunesinde etriyelerin bulunmadığı (mesnet bölgeleri hariç), boyuna donatı adetinin 3 ϕ 12 olduğu ve donatı cinsinin nervürlü donatı olduğu durumlar çerçevesinde testi yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney düzeneği deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.19).



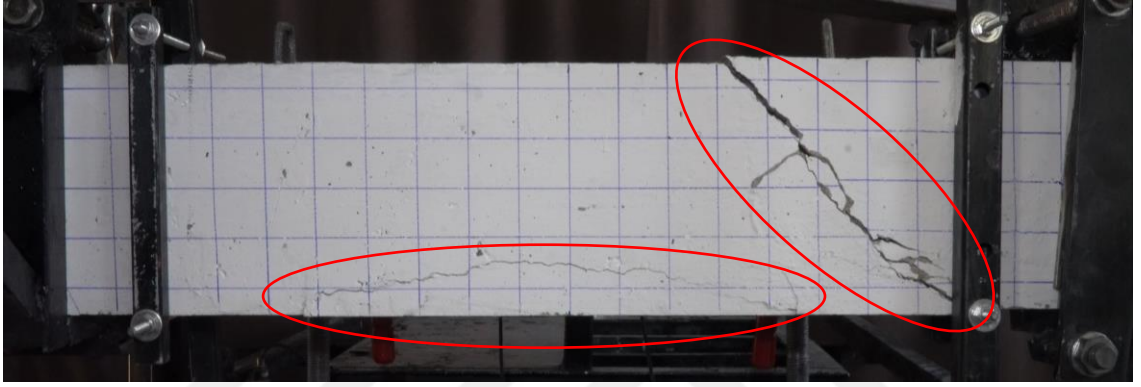
Şekil 4.19. BK-N-0-B numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney elemanına ait ilk çatlak $3,59 \times 10^{-3}$ radyan değerinde meydana gelmiştir ve bu dönme değerinde burulma momenti taşıma kapasitesi ise 15,43 kNm olarak kaydedilmiştir. Numune bu çatlak üzerinden genişleyerek hasar almaya devam etmiştir. İlk çatlak oluşum değerinin aynı zamanda maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine eşit olduğu tespit edilmiştir. Hasar kirişin ön ve arka yüzünde yaklaşık 45°'lik bir açı ile meydana gelmiştir (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. BK-N-0-B numunesi ilk çatlak ve maksimum burulma momenti değerlerinde ön ve arka yüzey için hasar durumu

Numunenin moment-dönme eğrisinde belirgin bir azalma oluşturduğu ve bu azalmanın genellikle %15 kapasite kaybına ulaştığında göçme kabul edildiği nokta belirlenmiştir (Eurocode 8, 2004; Ünal, 2016). Bu noktada numunede $7,03 \times 10^{-3}$ radyan dönme meydana gelmiştir. Göçme durumunda burulma momenti taşıma kapasitesi değerinin 13,11 kNm olduğu tespit edilmiştir. Göçme noktasına ait deney elemanının hasar durumu incelendiğinde çatlakların belirginliklerinin arttığı ve kabuk betonda atmaların oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kirişin orta bölgesinde yatay çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Şekil 4.21’de göçme noktasına ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.21 BK-N-0-B numunesi göçme noktası değerinde hasar durumu

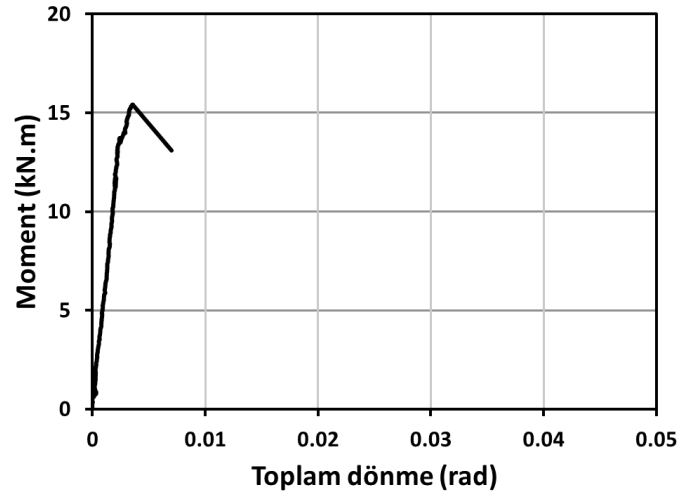
Deney elemanının deney süresince birim uzama miktarı 0,37 mm olarak ölçülmüştür.

Deneyler sırasında, yük hücresi ve potansiyometrik cetveller aracılığıyla elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak, elemanın burulma davranışı incelenmiştir. Bu verilerden, burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler, burulma rijitliğini açıklayan grafikler ve toplam enerji değişimini ortaya koyan grafikler her deney için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

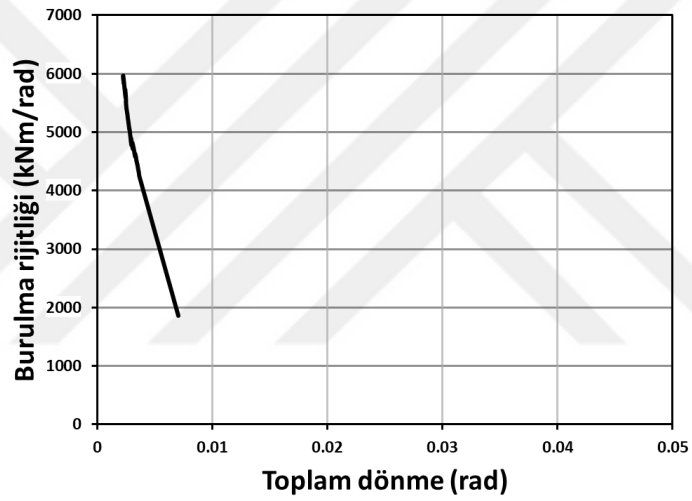
Moment ve toplam dönme arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.22’de yer almaktadır.

Deneylerde okunan maksimum burulma momenti, elemanın dönmesiyle bölünerek burulma rijitliği hesaplanmış ve Şekil 4.23’te bu değerler sunulmuştur.

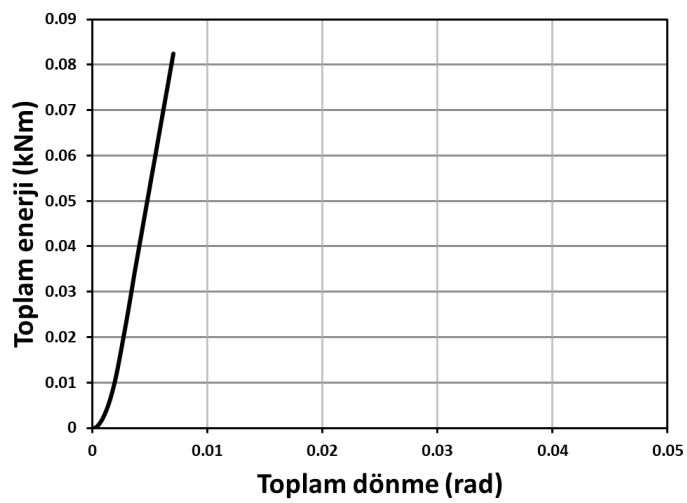
Toplam dönme eğrisinin altındaki alan, tüketilen enerji miktarını belirlemek amacıyla hesaplanmış ve buna dayalı olarak toplam enerji grafiği Şekil 4.24’te sunulmuştur.



Şekil 4.22. BK-N-0-B numunesinin burulma momenti-toplam dönme grafiği



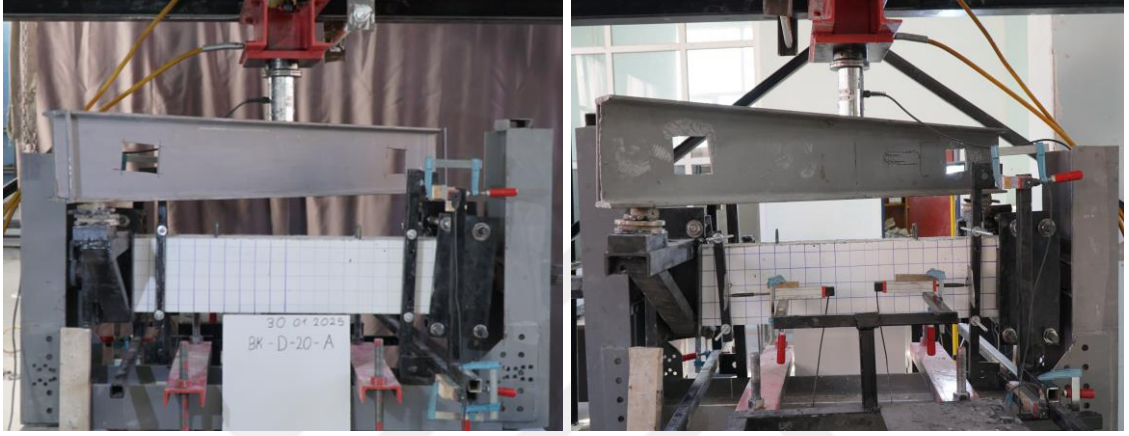
Şekil 4.23. BK-N-0-B numunesinin burulma rijitliği-toplam dönme grafiği



Şekil 4.24. BK-N-0-B numunesinin toplam enerji-toplam dönme grafiği

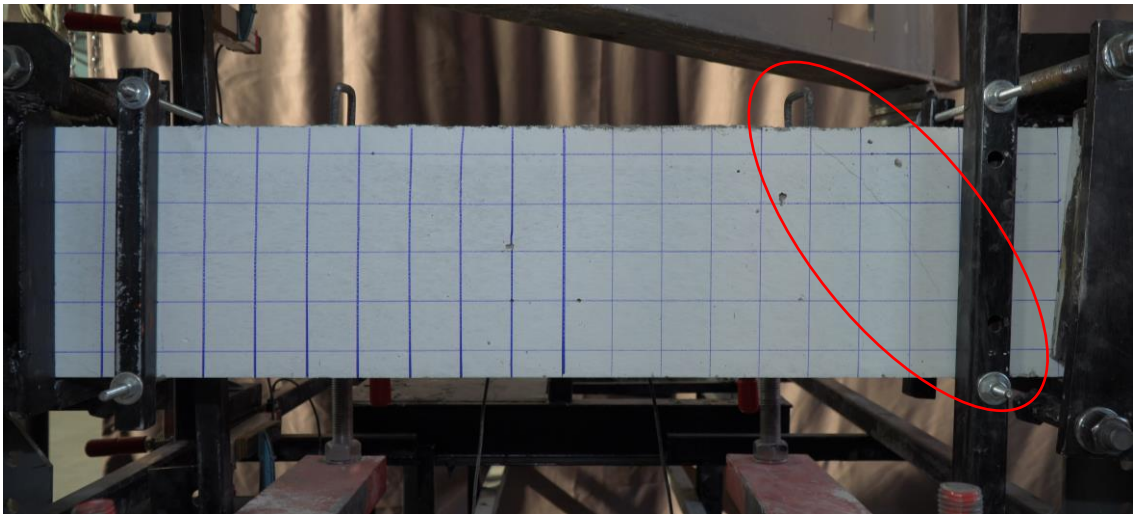
4.1.5. Deney 5 (BK-D-20-A)

Çalışma kapsamında BK-D-20-A numunesinde etriye aralığının 20 cm olduğu, boyuna donatı adetinin 2 ϕ 12 olduğu ve donatı cinsinin nervürlü donatı olduğu durumlar çerçevesinde testi yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney düzeneği deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.25).



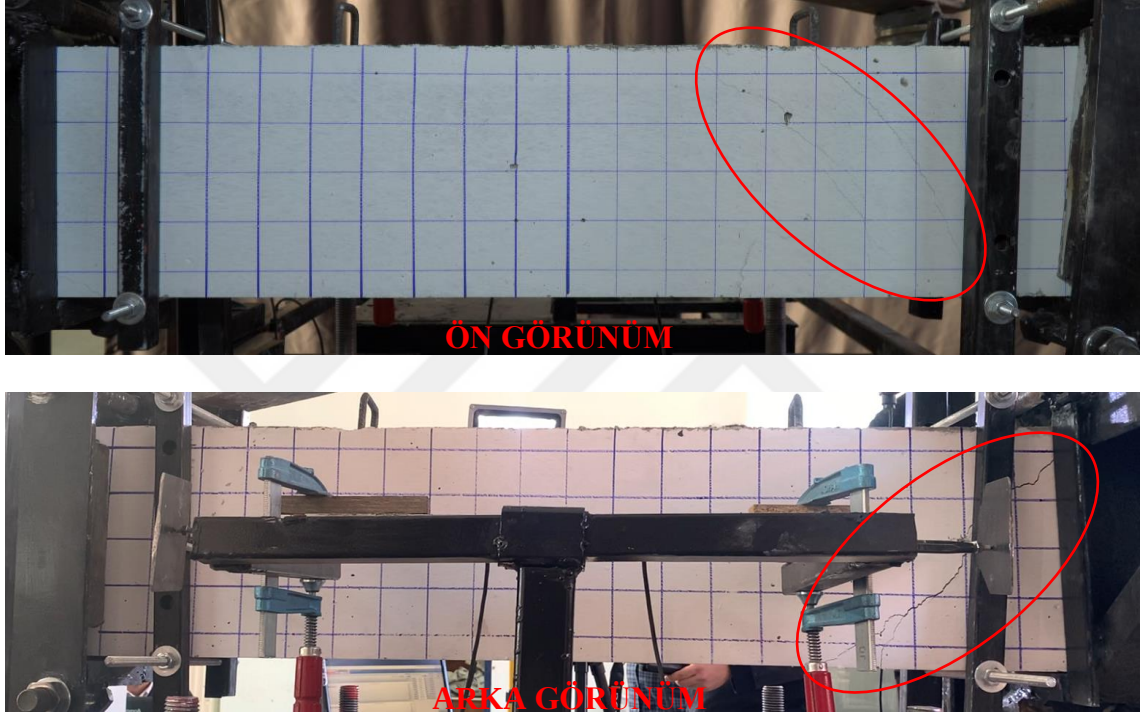
Şekil 4.25. BK-D-20-A numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney elemanında oluşan ilk çatlak $2,32 \times 10^{-3}$ radyan değerinde meydana gelmiştir ve bu dönme değerinde burulma momenti taşıma kapasitesi ise 12,12 kNm olarak kaydedilmiştir. Yüklemin devam etmesi ile yeni çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar kirişin orta-sağ bölgesi arasında yoğunlaşmıştır ve yaklaşık 45°'lik bir açı ile meydana gelmiştir (Şekil 4.26).



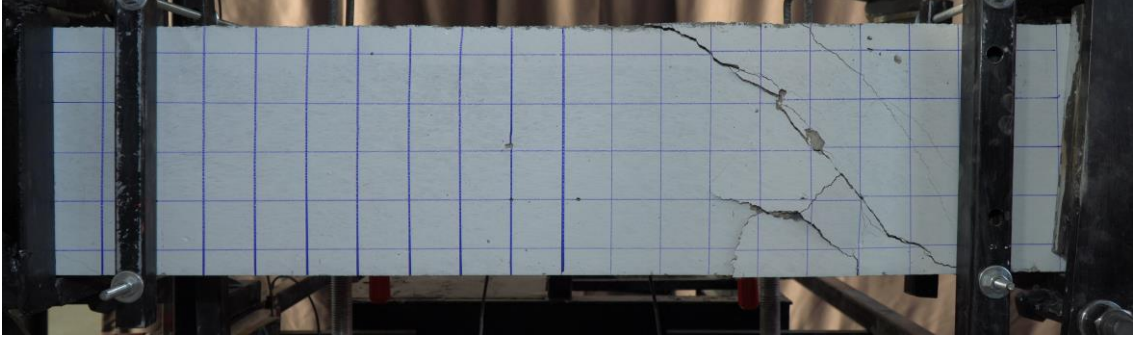
Şekil 4.26. BK-D-20-A numunesi ilk çatlak hasar durumu

Deney elemanı 12,29 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değeri için dönme $7,39 \times 10^{-3}$ radyan olarak kaydedilmiştir. Maksimum moment değerindeki çatlaklar incelendiğinde, ilk çatlakla paralel olarak oluşan yeni bir çatlak oluştuğu ve hasarın bu yeni oluşan çatlak üzerinden geliştiği gözlemlenmiştir. Deney elemanının arka yüzünde oluşan çatlakların ön yüzünde oluşan çatlaklara göre daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.27’de maksimum moment noktasına ait ön ve yüzeyine ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.27. BK-D-20-A numunesi maksimum moment hasar durumu

Numunenin moment-dönme eğrisinde belirgin bir azalma oluşturduğu ve bu azalmanın genellikle %15 kapasite kaybına ulaştığında göçme kabul edildiği nokta belirlenmiştir (Eurocode 8, 2004; Ünal, 2016). Bu noktada numunede $63,62 \times 10^{-3}$ radyan dönme meydana gelmiştir. Göçme durumunda burulma momenti taşıma kapasitesi değerinin 10.44 kNm olduğu tespit edilmiştir. Göçme noktasına ait deney elemanının hasar durumu incelendiğinde çatlakların belirginliklerinin arttığı ve kabuk betonda atmaların oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.28’de göçme noktasına ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.28. BK-D-20-A numunesi göçme noktası değerinde hasar durumu

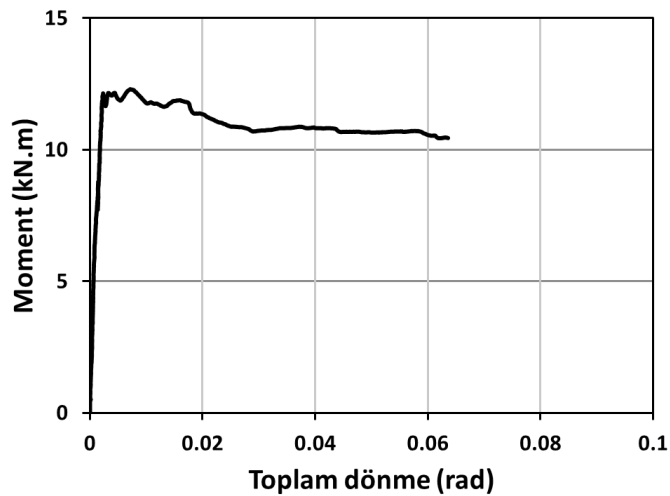
Deney elemanının deney süresince birim uzama miktarı 1,88 mm olarak ölçülmüştür.

Deneyler sırasında, yük hücresi ve potansiyometrik cetveller aracılığıyla elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak, elemanın burulma davranışı incelenmiştir. Bu verilerden, burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler, burulma rijitliğini açıklayan grafikler ve toplam enerji değişimini ortaya koyan grafikler her deney için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

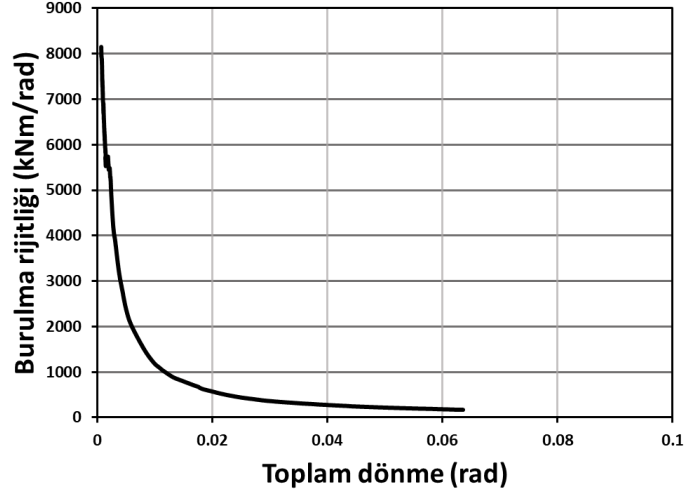
Moment ve toplam dönme arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.29'da yer almaktadır.

Deneylerde okunan maksimum burulma momenti, elemanın dönmesiyle bölünerek burulma rijitliği hesaplanmış ve Şekil 4.30'da bu değerler sunulmuştur.

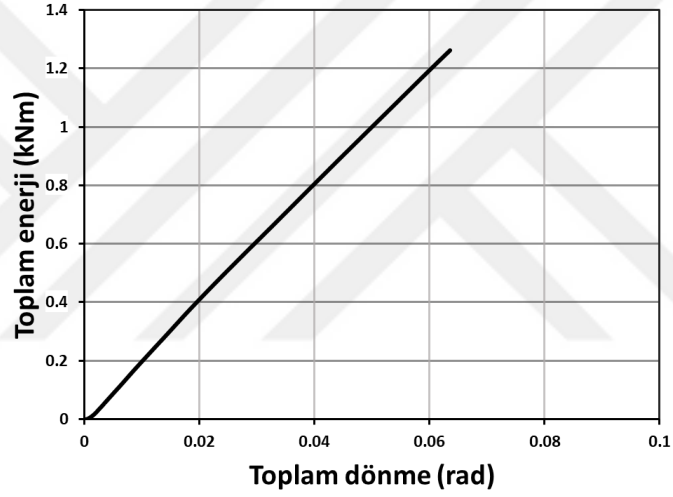
Toplam dönme eğrisinin altındaki alan, tüketilen enerji miktarını belirlemek amacıyla hesaplanmış ve buna dayalı olarak toplam enerji grafiği Şekil 4.31'de sunulmuştur.



Şekil 4.29. BK-D-20-A numunesinin burulma momenti-toplam dönme grafiği



Şekil 4.30. BK-D-20-A numunesinin toplam enerji-toplam dönme grafiği



Şekil 4.31. BK-D-20-A numunesinin burulma rijitliği-toplam dönme grafiği

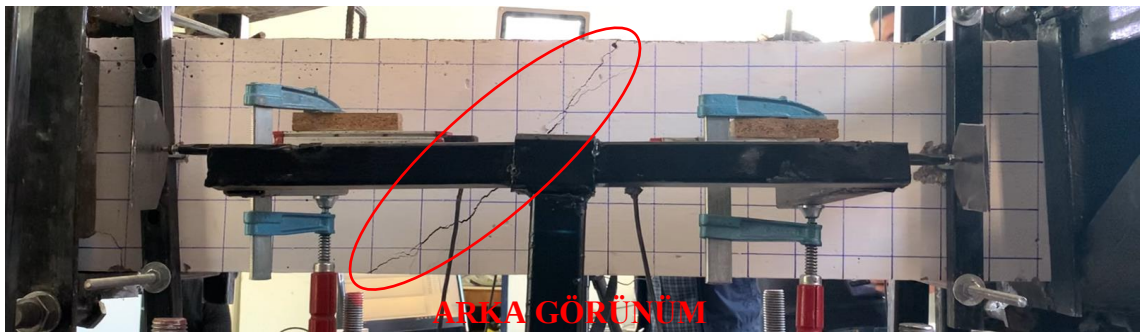
4.1.6. Deney 6 (BK-D-20-B)

Çalışma kapsamında BK-D-20-B numunesinde etriye aralığının 20 cm olduğu, boyuna donatı adetinin 3 ϕ 12 olduğu ve donatı cinsinin nervürlü donatı olduğu durumlar çerçevesinde testi yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney düzeneği deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.32).



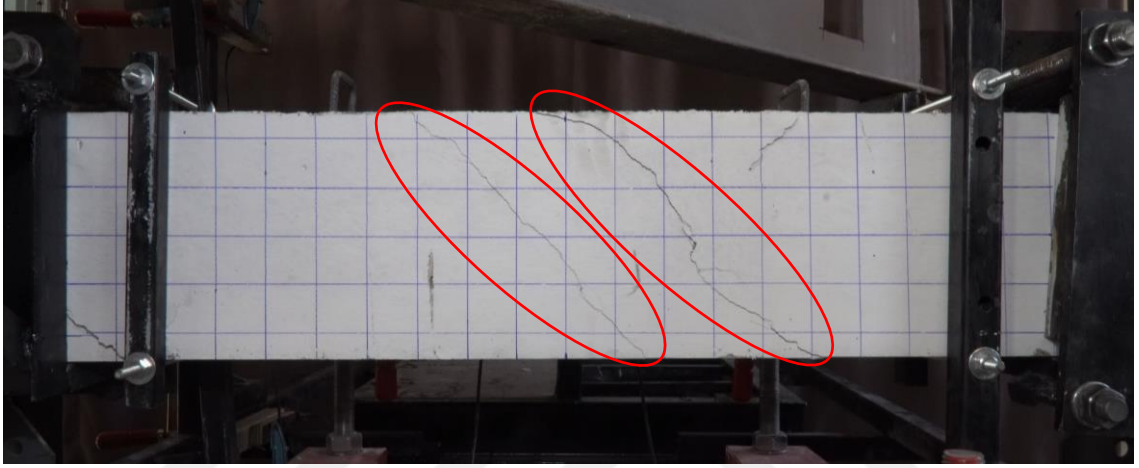
Şekil 4.32. BK-D-20-B numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney elemanında oluşan ilk çatlak $5,20 \times 10^{-3}$ radyan değerinde meydana gelmiştir ve bu dönme değerinde burulma momenti taşıma kapasitesi ise 14,62 kNm olarak kaydedilmiştir. İlk çatlak oluşum değerinin aynı zamanda maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine eşit olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 4.33). Yüklemenin devam etmesi ile yeni çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar kirişin orta bölgesinde yoğunlaşmıştır ve yaklaşık 45° 'lik bir açı ile meydana gelmiştir. İlk yükleme anında deney elemanı deney düzeneğine yerleştiği için sol alt köşede çatlak meydana gelmiştir. Bu çatlak numunenin düzeneğe tam olarak yerleşmesi sonrasında daha fazla genişlememiş ve büyümemiştir.



Şekil 4.33. BK-D-20-B numunesi ilk çatlak ve maksimum burulma momenti değerlerinde ön ve arka yüzey için hasar durumu

Numunenin moment-dönme eğrisinde belirgin bir azalma oluşturduğu ve bu azalmanın genellikle %15 kapasite kaybına ulaştığında göçme kabul edildiği nokta belirlenmiştir (Eurocode 8, 2004; Ünal, 2016). Bu noktada numunede $25,84 \times 10^{-3}$ radyan dönme meydana gelmiştir. Göçme durumunda burulma momenti taşıma kapasitesi değerinin 12,42 kNm olduğu tespit edilmiştir. Göçme noktasına ait deney elemanının hasar durumu incelendiğinde çatlakların belirginliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.34'e göçme noktasına ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.34. BK-D-20-B numunesi göçme noktası değerinde hasar durumu

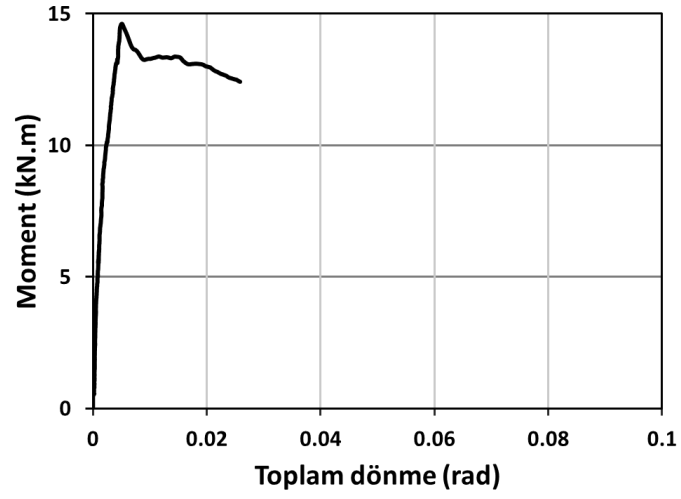
Deney elemanının deney süresince birim uzama miktarı 1,00 mm olarak ölçülmüştür.

Deneyler sırasında, yük hücresi ve potansiyometrik cetveller aracılığıyla elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak, elemanın burulma davranışı incelenmiştir. Bu verilerden, burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler, burulma rijitliğini açıklayan grafikler ve toplam enerji değişimini ortaya koyan grafikler her deney için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

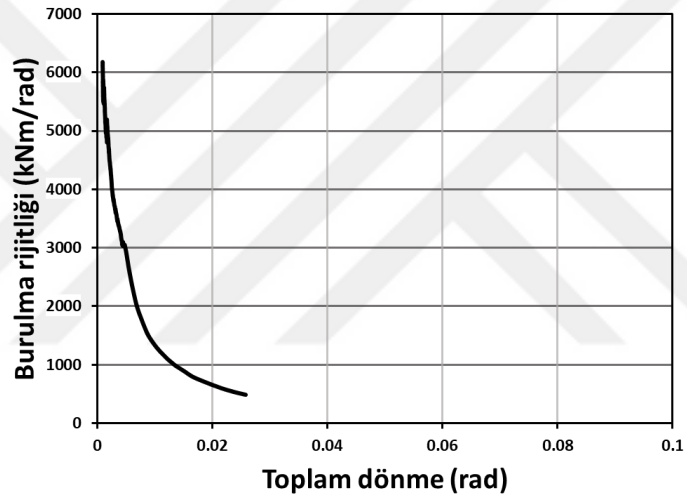
Moment ve toplam dönme arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.35'te yer almaktadır.

Deneylerde okunan maksimum burulma momenti, elemanın dönmesiyle bölünerek burulma rijitliği hesaplanmış ve Şekil 4.36'da bu değerler sunulmuştur.

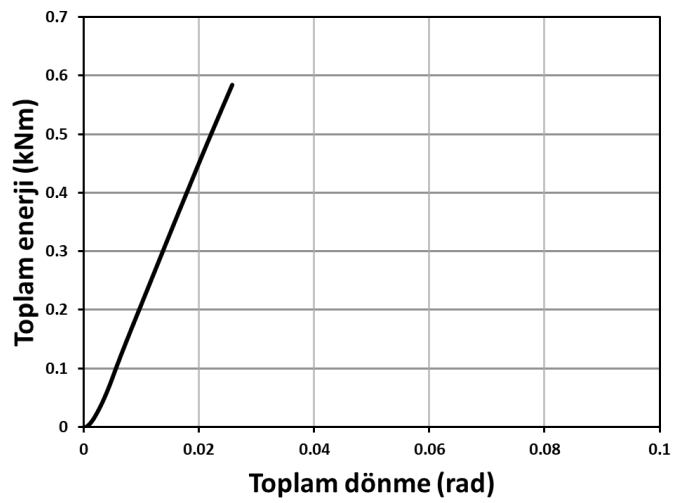
Toplam dönme eğrisinin altındaki alan, tüketilen enerji miktarını belirlemek amacıyla hesaplanmış ve buna dayalı olarak toplam enerji grafiği Şekil 4.37'de sunulmuştur.



Şekil 4.35. BK-D-20-B numunesinin burulma momenti-toplam dönme grafiği



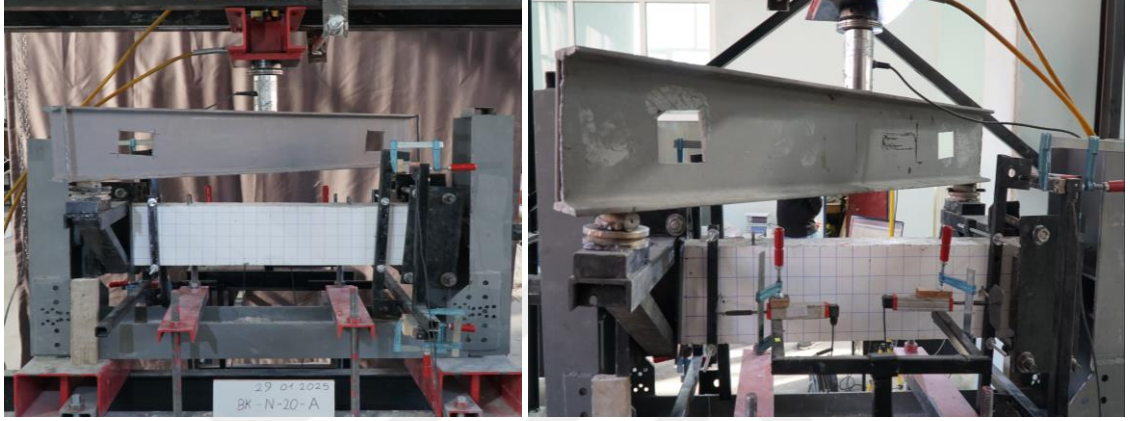
Şekil 4.36. BK-D-20-B numunesinin burulma rijitliği-toplam dönme grafiği



Şekil 4.37. BK-D-20-B numunesinin toplam enerji-toplam dönme grafiği

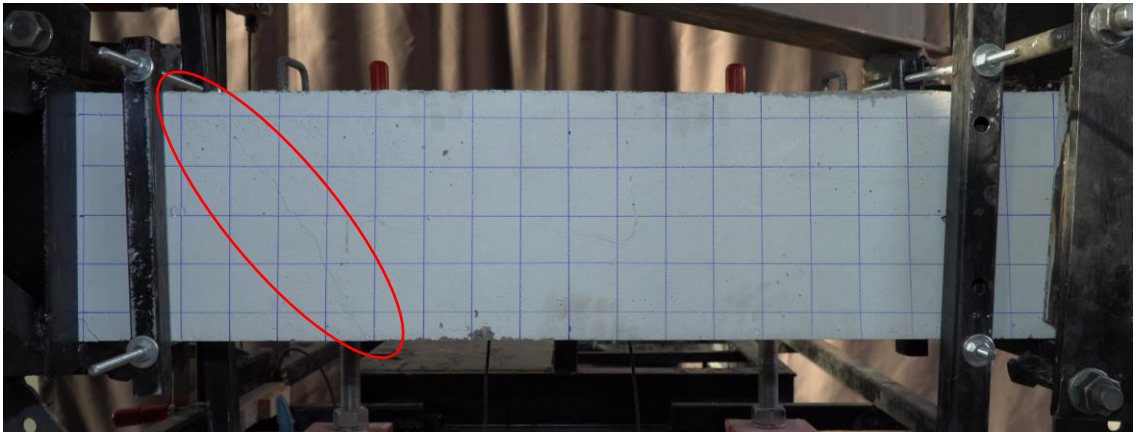
4.1.7. Deney 7 (BK-N-20-A)

Çalışma kapsamında BK-N-20-A numunesinde etriye aralığının 20 cm olduğu, boyuna donatı adetinin $2\phi 12$ olduğu ve donatı cinsinin nervürlü donatı olduğu durumlar çerçevesinde testi yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney düzeneği deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.38).



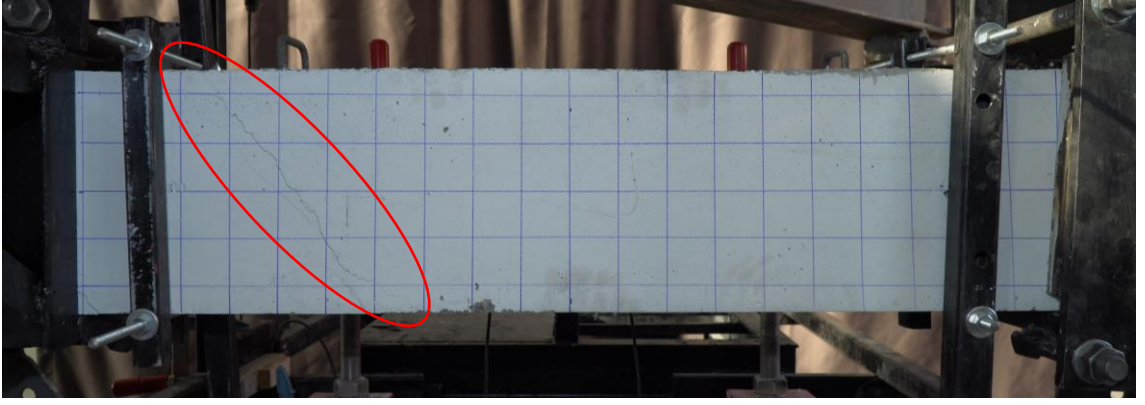
Şekil 4.38. BK-N-20-A numunesinin deney düzeneğinde görüntüsü

Deney elemanında oluşan ilk çatlak $3,83 \times 10^{-3}$ radyan değerinde meydana gelmiştir ve bu dönme değerinde burulma momenti taşıma kapasitesi ise 13,28 kNm olarak kaydedilmiştir (Şekil 4.39). Yüklemenin devam etmesi ile yeni çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar kiriş boyunca yaklaşık 45° 'lik bir açı ile meydana gelmiştir.



Şekil 4.39. BK-N-20-A numunesi ilk çatlak hasar durumu

Deney elemanı akma noktasına 13,59 kNm moment değerinde ve $10,79 \times 10^{-3}$ radyan değerinde ulaşmıştır. Elemanın bu andaki durumu Şekil 4.40'ta görülmektedir.



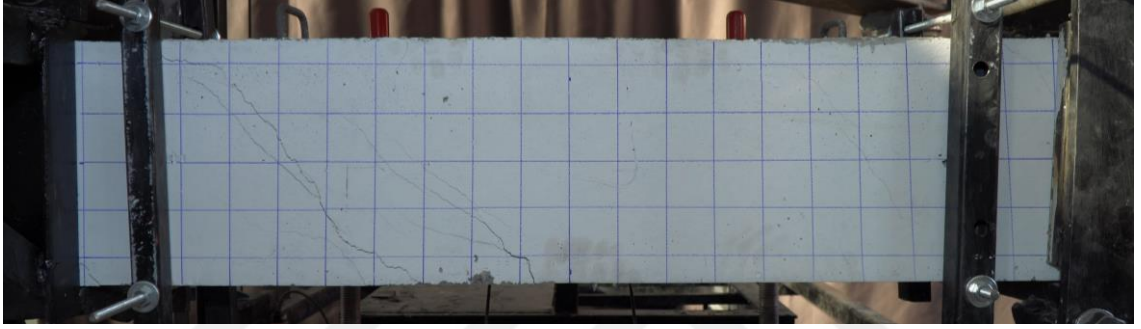
Şekil 4.40. BK-N-20-A numunesi akma noktası hasar durumu

Deney elemanı 14,28 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değeri için dönme $25,32 \times 10^{-3}$ radyan olarak kaydedilmiştir. Maksimum moment değerinde oluşan çatlaklar incelendiğinde ilk çatlağa paralel yeni çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Deney elemanının arka yüzünde oluşan çatlağın ön yüzünde oluşan çatlaklara göre daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.41’de maksimum moment noktasına ait ön ve yüzeyine ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.41. BK-N-20-A numunesi maksimum burulma momenti ön ve arka yüzey için hasar durumu

Numunenin moment-dönme eğrisinde belirgin bir azalma oluşturduğu ve bu azalmanın genellikle %15 kapasite kaybına ulaştığında göçme kabul edildiği nokta belirlenmiştir (Eurocode 8, 2004; Ünal, 2016). Bu noktada numunede $55,45 \times 10^{-3}$ radyan dönme meydana gelmiştir. Göçme durumunda burulma momenti taşıma kapasitesi değerinin 12,14 kNm olduğu tespit edilmiştir. Numunenin son hali incelendiğinde ilk çatlak üzerinden hasar almaya devam ettiği ve bu noktadan göçtüğü tespit edilmiştir. Göçme noktasına ait deney elemanının hasar durumu incelendiğinde çatlakların belirginliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.42’de göçme noktasına ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.42 BK-N-20-A numunesi göçme noktası hasar durumu

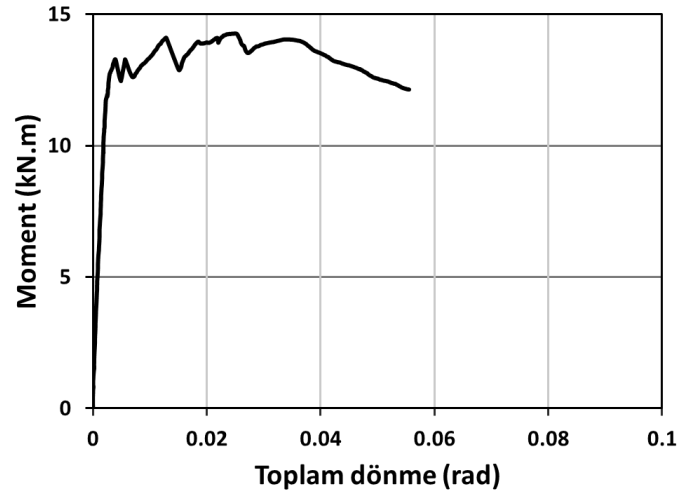
Deney elemanının deney süresince birim uzama miktarı 2,15 mm olarak ölçülmüştür.

Deneyler sırasında, yük hücresi ve potansiyometrik cetveller aracılığıyla elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak, elemanın burulma davranışı incelenmiştir. Bu verilerden, burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler, burulma rijitliğini açıklayan grafikler ve toplam enerji değişimini ortaya koyan grafikler her deney için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

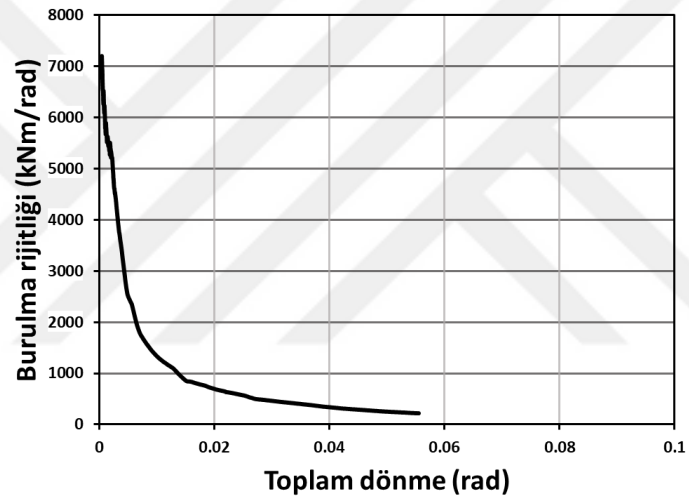
Moment ve toplam dönme arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.43'te yer almaktadır.

Deneylerde okunan maksimum burulma momenti, elemanın dönmesiyle bölünerek burulma rijitliği hesaplanmış ve Şekil 4.44'te bu değerler sunulmuştur.

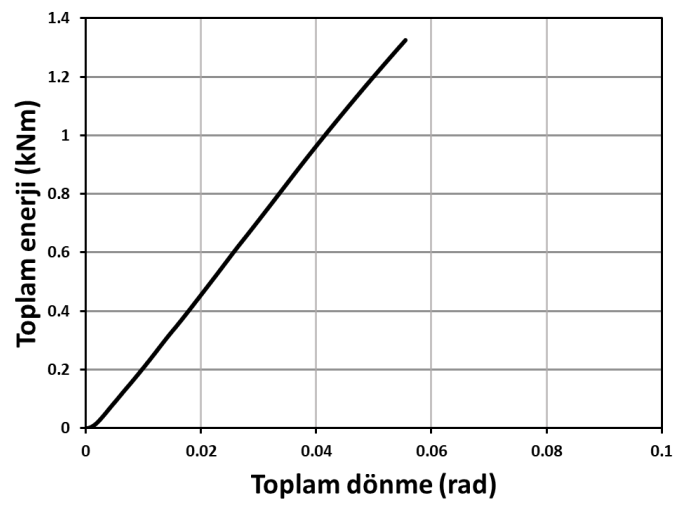
Toplam dönme eğrisinin altındaki alan, tüketilen enerji miktarını belirlemek amacıyla hesaplanmış ve buna dayalı olarak toplam enerji grafiği Şekil 4.45'te sunulmuştur.



Şekil 4.43. BK-N-20-A numunesinin burulma momenti-toplam dönme grafiği



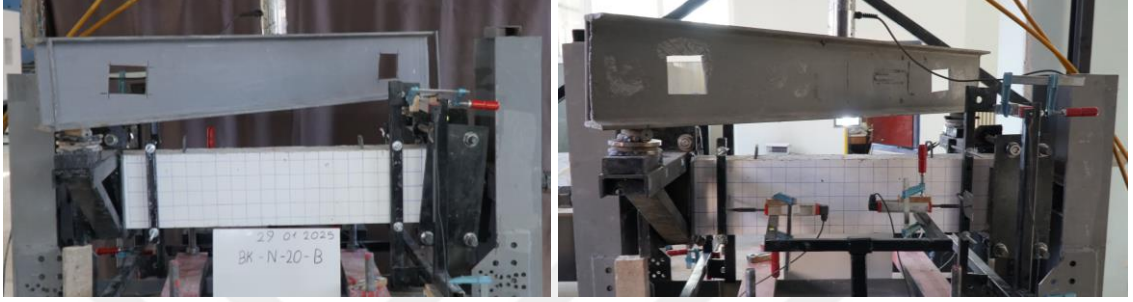
Şekil 4.44. BK-N-20-A numunesinin burulma rijitliği-toplam dönme grafiği



Şekil 4.45. BK-N-20-A numunesinin toplam enerji-toplam dönme grafiği

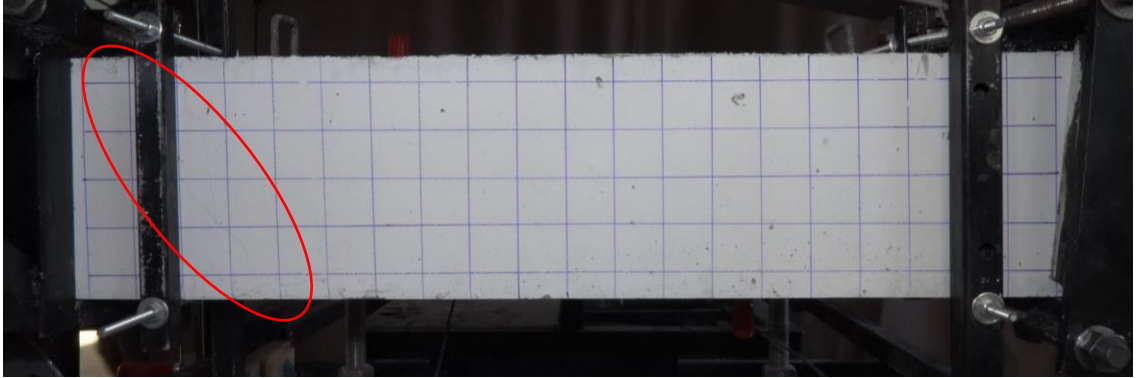
4.1.8. Deney 8 (BK-N-20-B)

Çalışma kapsamında BK-N-20-B numunesinde etriye aralığının 20 cm olduğu, boyuna donatı adetinin 3 ϕ 12 olduğu ve donatı cinsinin nervürlü donatı olduğu durumlar çerçevesinde testi yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney düzeneği deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.46).



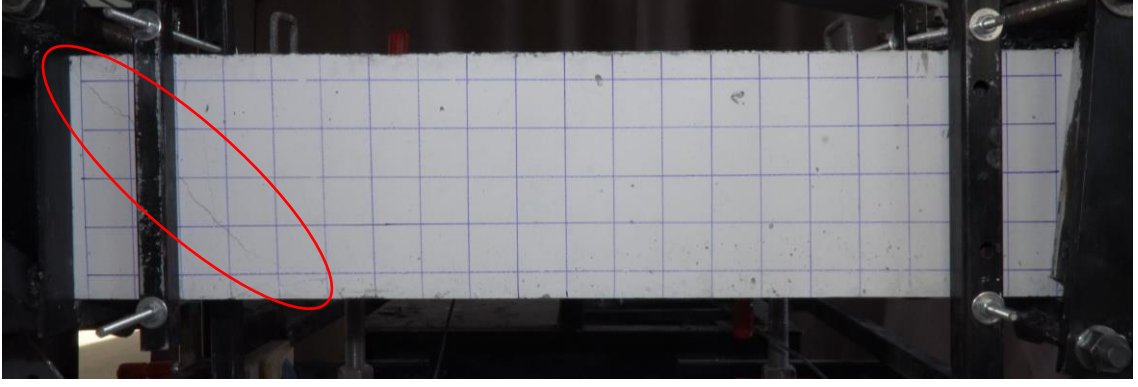
Şekil 4.46. BK-N-20-B numunesinin deney düzeneğinde görünüş

Deney elemanında oluşan ilk çatlak $3,43 \times 10^{-3}$ radyan değerinde meydana gelmiştir ve bu dönme değerinde burulma momenti taşıma kapasitesi ise 11,31 kNm olarak kaydedilmiştir. Yüklemenin devam etmesi ile yeni çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar giriş boyunca yaklaşık 45°'lik bir açı ile meydana gelmiştir (Şekil 4.47).



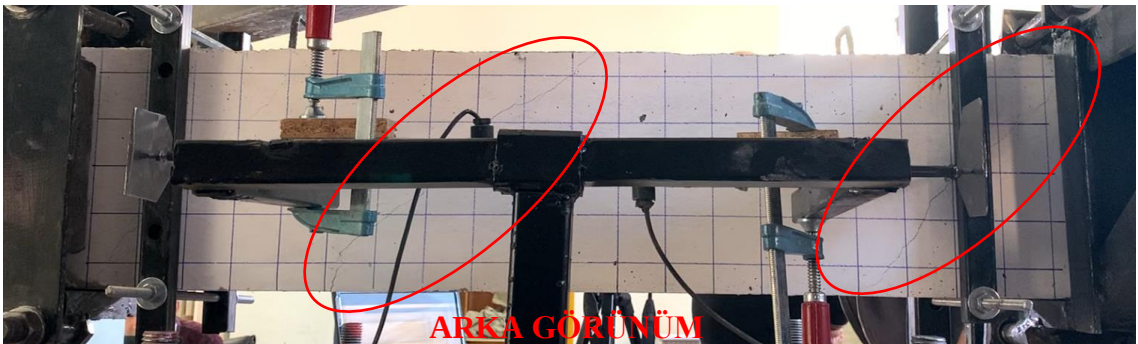
Şekil 4.47 BK-N-20-B numunesi ilk çatlak hasar durumu

Deney elemanı akma noktasına 12,42 kNm moment değerinde ve $5,72 \times 10^{-3}$ radyan değerinde ulaşmıştır. Elemanın akma noktasındaki durumu Şekil 4.48'de görülmektedir.



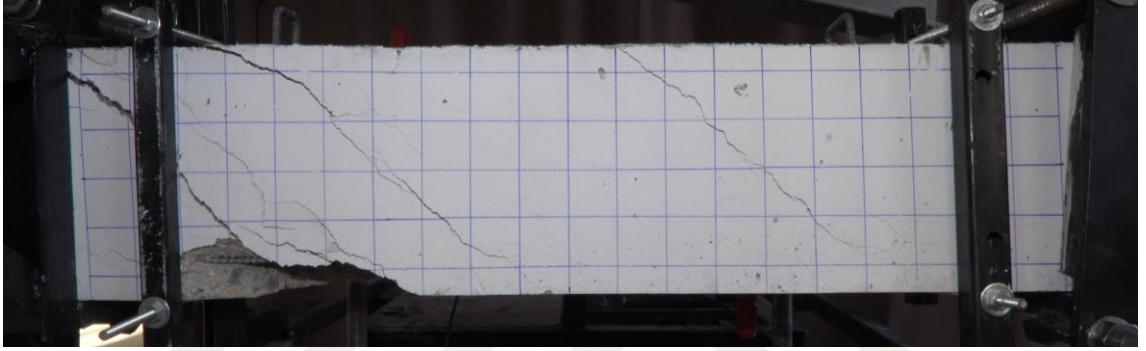
Şekil 4.48 BK-N-20-B numunesi akma noktası hasar durumu

Deney elemanı 13,35 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değeri için dönme $9,56 \times 10^{-3}$ radyan olarak kaydedilmiştir. Maksimum moment değerinde çatlaklar incelendiğinde numunenin orta kısmına yakın, ilk çatlığa paralel yeni çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Şekil 4.49'da maksimum moment noktasına ait ön ve yüzeyine ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.49 BK-N-20-B numunesi maksimum burulma momenti ön ve arka yüzey içim hasar durumu

Numunenin moment-dönme eğrisinde belirgin bir azalma oluşturduğu ve bu azalmanın genellikle %15 kapasite kaybına ulaştığında göçme kabul edildiği nokta belirlenmiştir (Eurocode 8, 2004; Ünal, 2016). Bu noktada numunede $89,19 \times 10^{-3}$ radyan dönme meydana gelmiştir. Göçme durumunda burulma momenti taşıma kapasitesi değerinin 11,34 kNm olduğu tespit edilmiştir. Numunenin son hali incelendiğinde ilk çatlak oluşum yerinden göçtüğü tespit edilmiştir. Göçme noktasına ait deney elemanının hasar durumu incelendiğinde yeni çatlakların oluştuğu, öncesinde oluşan çatlakların belirginliklerinin arttığı ve kabuk betonda büyük parçaların ayrıldığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.50’de göçme noktasına ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.50. BK-N-20-B numunesi göçme noktası değerinde hasar durumu

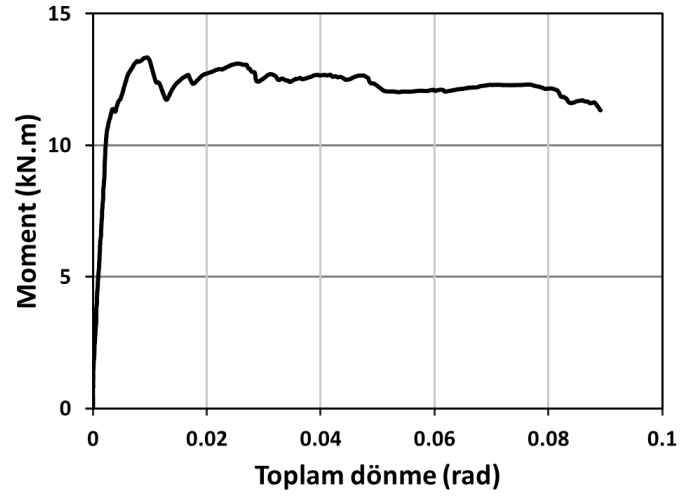
Deney elemanının deney süresince birim uzama miktarı 1,21 mm olarak ölçülmüştür.

Deneyler sırasında, yük hücresi ve potansiyometrik cetveller aracılığıyla elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak, elemanın burulma davranışı incelenmiştir. Bu verilerden, burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler, burulma rijitliğini açıklayan grafikler ve toplam enerji değişimini ortaya koyan grafikler her deney için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

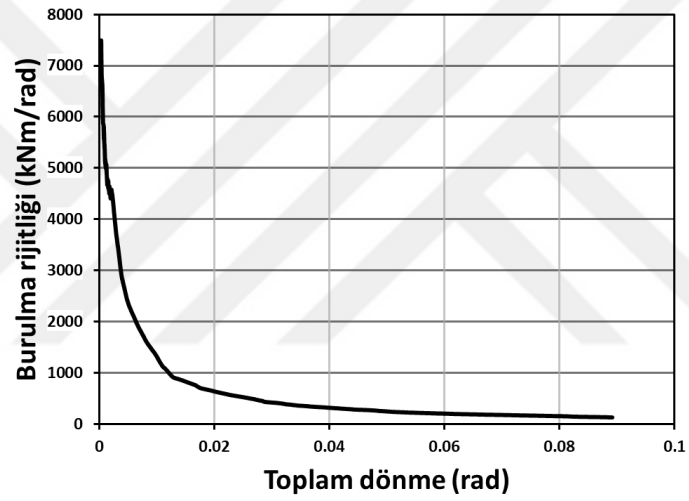
Moment ve toplam dönme arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.51’de yer almaktadır.

Deneylerde okunan maksimum burulma momenti, elemanın dönmesiyle bölünerek burulma rijitliği hesaplanmış ve Şekil 4.52’de bu değerler sunulmuştur.

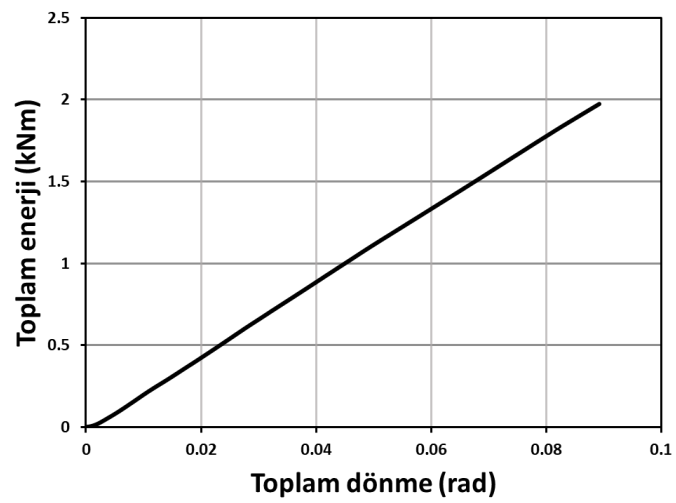
Toplam dönme eğrisinin altındaki alan, tüketilen enerji miktarını belirlemek amacıyla hesaplanmış ve buna dayalı olarak toplam enerji grafiği Şekil 4.53’te sunulmuştur.



Şekil 4.51. BK-N-20-B numunesinin burulma momenti-toplam dönme grafiği



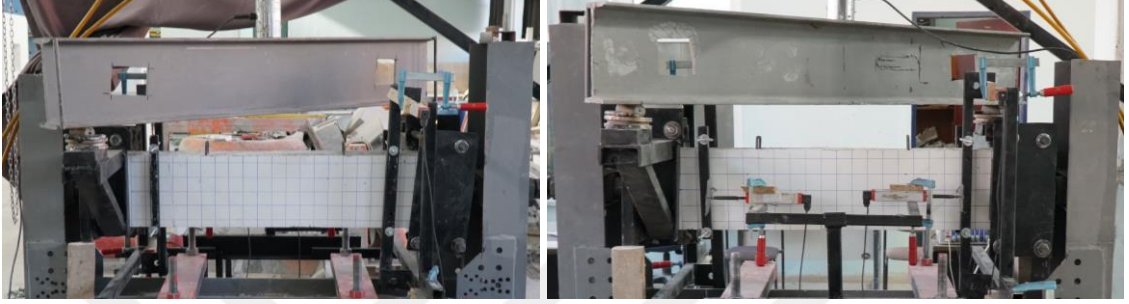
Şekil 4.52. BK-N-20-B numunesinin burulma rijitliği-toplam dönme grafiği



Şekil 4.53. BK-N-20-B numunesinin toplam enerji-toplam dönme grafiği

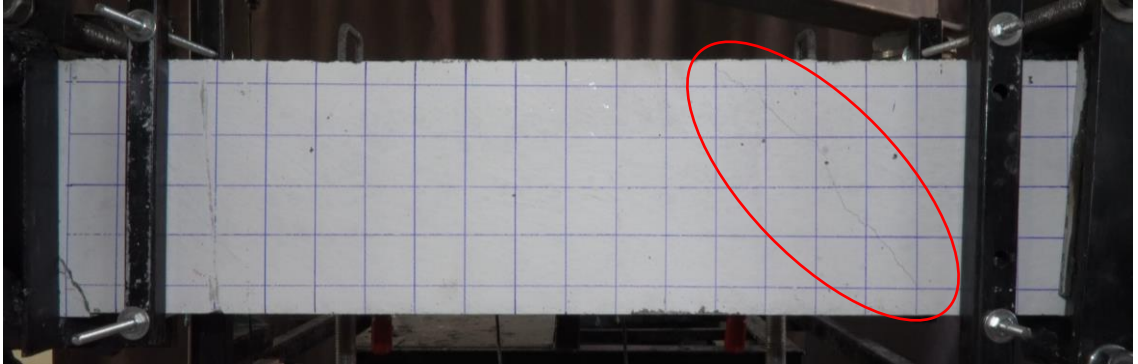
4.1.9. Deney 9 (BK-D-10-A)

Çalışma kapsamında BK-D-10-A numunesinde etriye aralığının 10 cm olduğu, boyuna donatı adetinin $2\phi 12$ olduğu ve donatı cinsinin nervürlü donatı olduğu durumlar çerçevesinde testi yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney düzeneği deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.54).



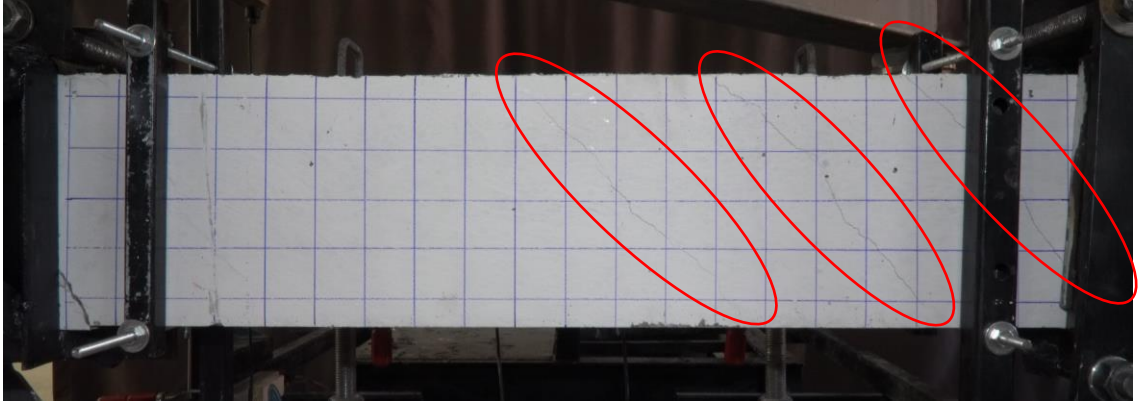
Şekil 4.54. BK-D-10-A numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney elemanında oluşan ilk çatlak $3,97 \times 10^{-3}$ radyan değerinde meydana gelmiştir ve bu dönme değerinde burulma momenti taşıma kapasitesi ise 10,21 kNm olarak kaydedilmiştir. Yüklemin devam etmesi ile yeni çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar kiriş boyunca yaklaşık 45° 'lik bir açı ile meydana gelmiştir (Şekil 4.55).



Şekil 4.55. BK-D-10-A numunesi ilk çatlak hasar durumu

Deney elemanı akma noktasına 12,60 kNm moment değerinde ve $5,12 \times 10^{-3}$ radyan değerinde ulaşmıştır. Elemanın akma noktasındaki durumu Şekil 4.56'da görülmektedir.



Şekil 4.56. BK-D-10-A numunesi akma anına ait hasar durumu

Deney elemanı 15,75 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değeri için dönme $27,44 \times 10^{-3}$ radyan olarak kaydedilmiştir. Maksimum moment değerinde çatlaklar incelendiğinde ilk çatlığa paralel yeni çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Deney elemanının ön yüzünde oluşan çatlığın arka yüzünde oluşan çatlaklara göre daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.57’de maksimum moment noktasına ait ön ve yüzeyine ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.57. BK-D-10-A numunesi maksimum burulma momenti ön ve arka yüzey için hasar durumu

Numunenin moment-dönme eğrisinde belirgin bir azalma oluşturduğu ve bu azalmanın genellikle %15 kapasite kaybına ulaştığında göçme kabul edildiği nokta belirlenmiştir (Eurocode 8, 2004; Ünal, 2016). Bu noktada numunede $51,52 \times 10^{-3}$ radyan dönme meydana gelmiştir. Göçme durumunda burulma momenti taşıma kapasitesi değerinin 13,39 kNm olduğu tespit edilmiştir. Göçme noktasına ait deney elemanının hasar durumu incelendiğinde maksimum moment noktasında meydana gelen çatlakların belirginliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.58’de göçme noktasına ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.58. BK-D-10-A numunesi göçme noktası değerinde hasar durumu

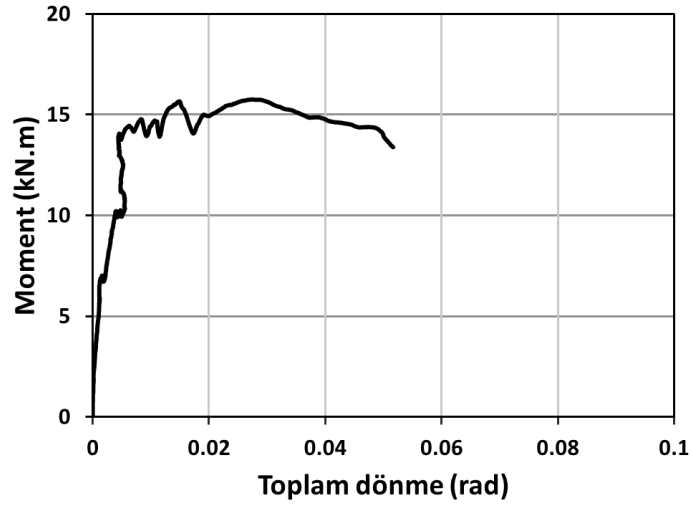
Deney elemanının deney süresince birim uzama miktarı 0,55 mm olarak ölçülmüştür.

Deneyler sırasında, yük hücresi ve potansiyometrik cetveller aracılığıyla elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak, elemanın burulma davranışı incelenmiştir. Bu verilerden, burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler, burulma rijitliğini açıklayan grafikler ve toplam enerji değişimini ortaya koyan grafikler her deney için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

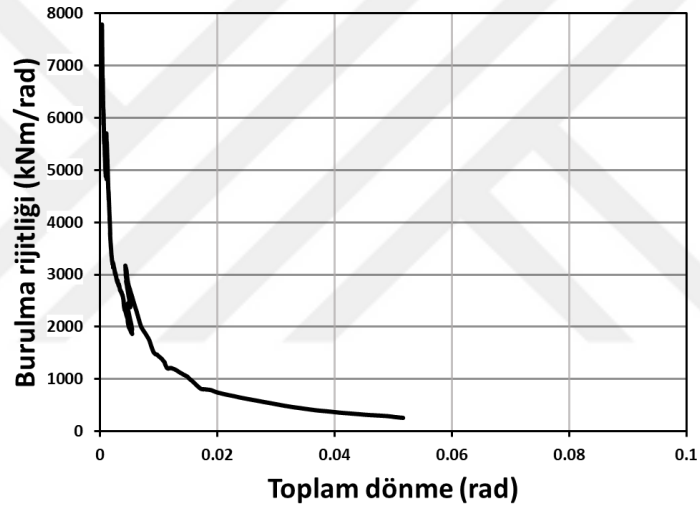
Moment ve toplam dönme arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.59’da yer almaktadır.

Deneylerde okunan maksimum burulma momenti, elemanın dönmesiyle bölünerek burulma rijitliği hesaplanmış ve Şekil 4.60’da bu değerler sunulmuştur.

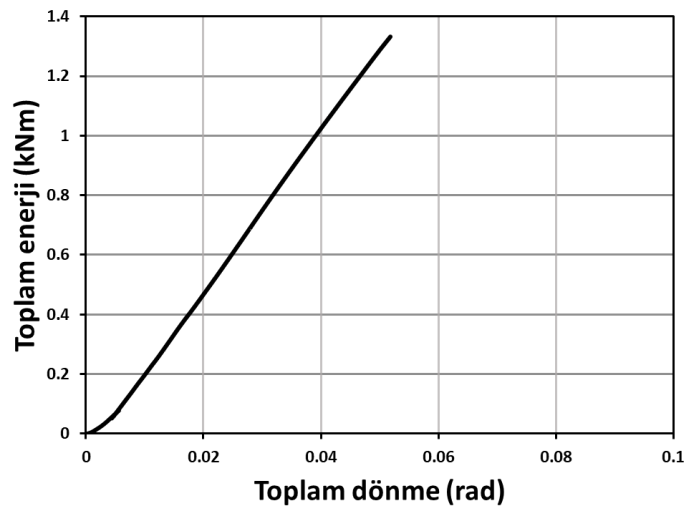
Toplam dönme eğrisinin altındaki alan, tüketilen enerji miktarını belirlemek amacıyla hesaplanmış ve buna dayalı olarak toplam enerji grafiği Şekil 4.61’de sunulmuştur.



Şekil 4.59. BK-D-10-A numunesinin burulma momenti-toplam dönme grafiği



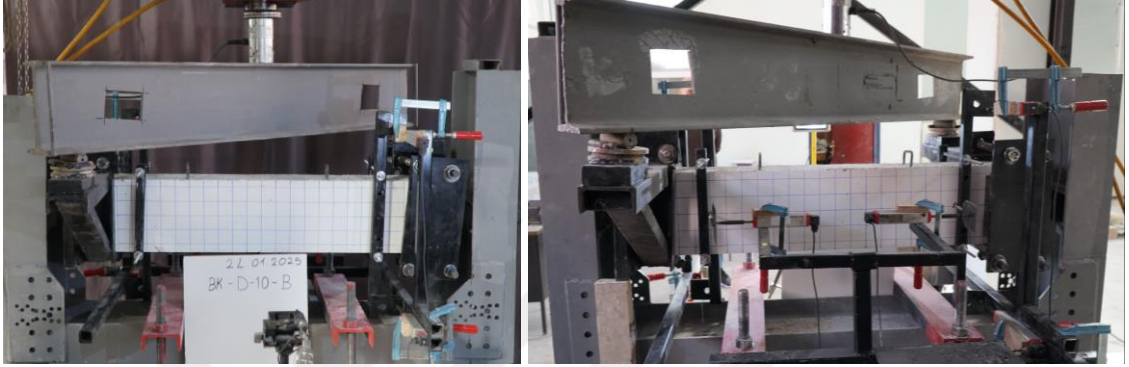
Şekil 4.60. BK-D-10-A numunesinin burulma rijitliği-toplam dönme grafiği



Şekil 4.61. BK-D-10-A numunesinin toplam enerji-toplam dönme grafiği

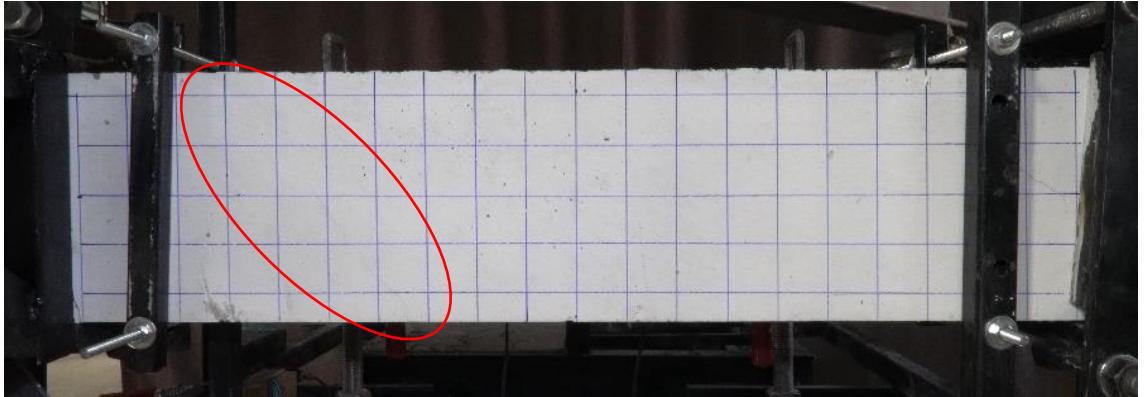
4.1.10. Deney 10 (BK-D-10-B)

Çalışma kapsamında BK-D-10-B numunesinde etriye aralığının 10 cm olduğu, boyuna donatı adetinin 3 ϕ 12 olduğu ve donatı cinsinin nervürlü donatı olduğu durumlar çerçevesinde testi yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney düzeneği deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.62).



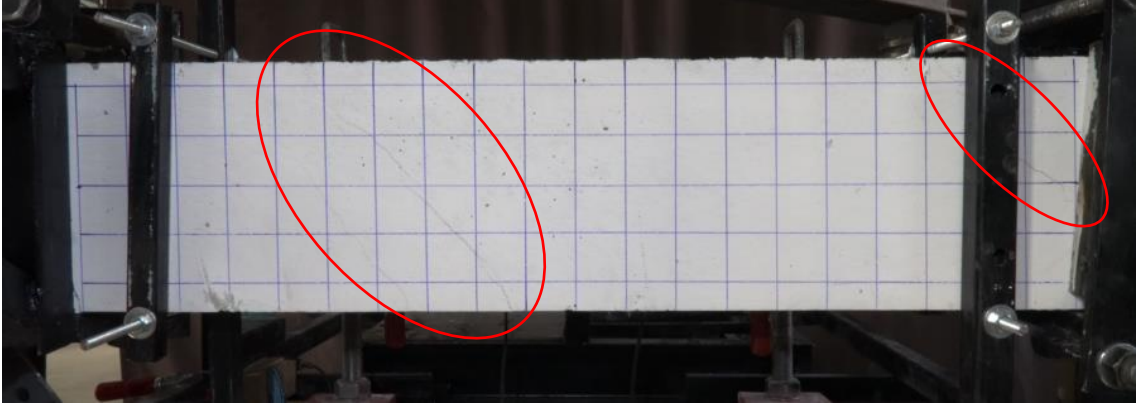
Şekil 4.62. BK-D-10-B numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney elemanında oluşan ilk çatlak $3,08 \times 10^{-3}$ radyan değerinde meydana gelmiştir ve bu dönme değerinde burulma momenti taşıma kapasitesi ise 14,05 kNm olarak kaydedilmiştir. Yüklemin devam etmesi ile yeni çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar kiriş boyunca yaklaşık 45° 'lik bir açı ile meydana gelmiştir (Şekil 4.63).



Şekil 4.63. BK-D-10-B numunesi ilk çatlak hasar durumu

Deney elemanı akma noktasına 13,50 kNm moment değerinde ve $1,74 \times 10^{-3}$ radyan değerinde ulaşmıştır. Elemanın akma noktasındaki durumu Şekil 4.64'te gösterilmiştir.



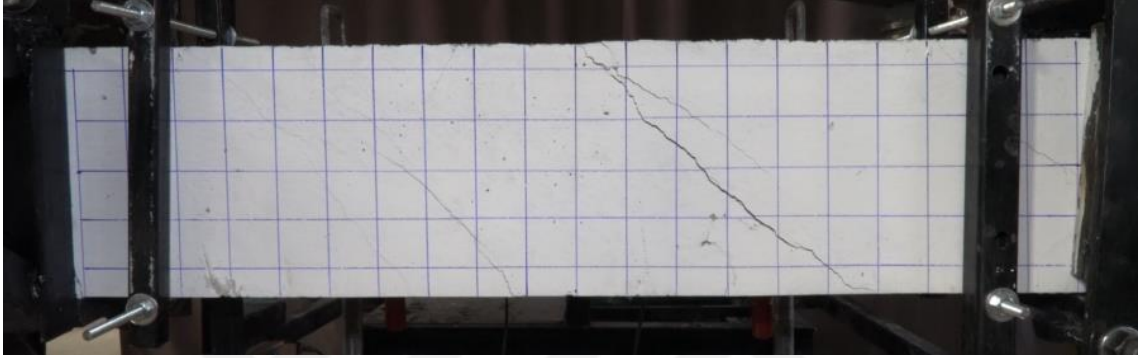
Şekil 4.64. BK-D-10-B numunesi akma noktasına ait hasar durumu

Deney elemanı 16,88 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değeri için dönme $10,00 \times 10^{-3}$ radyan olarak kaydedilmiştir. Maksimum moment değerinde çatlaklar incelendiğinde ilk çatlığa paralel yeni çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Deney elemanının arka yüzünde oluşan çatlığın ön yüzünde oluşan çatlaklara göre daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.65'te maksimum moment noktasına ait ön ve yüzeyine ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.65. BK-D-10-B numunesi maksimum burulma momenti hasar durumu

Numunenin moment-dönme eğrisinde belirgin bir azalma oluşturduğu ve bu azalmanın genellikle %15 kapasite kaybına ulaştığında göçme kabul edildiği nokta belirlenmiştir (Eurocode 8, 2004; Ünal, 2016). Bu noktada numunede $77,49 \times 10^{-3}$ radyan dönme meydana gelmiştir. Göçme durumunda burulma momenti taşıma kapasitesi değerinin 14,35 kNm olduğu tespit edilmiştir. Göçme noktasına ait deney elemanının hasar durumu incelendiğinde çatlakların belirginliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.66'da göçme noktasına ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.66. BK-D-10-B numunesi göçme noktası hasar durumu

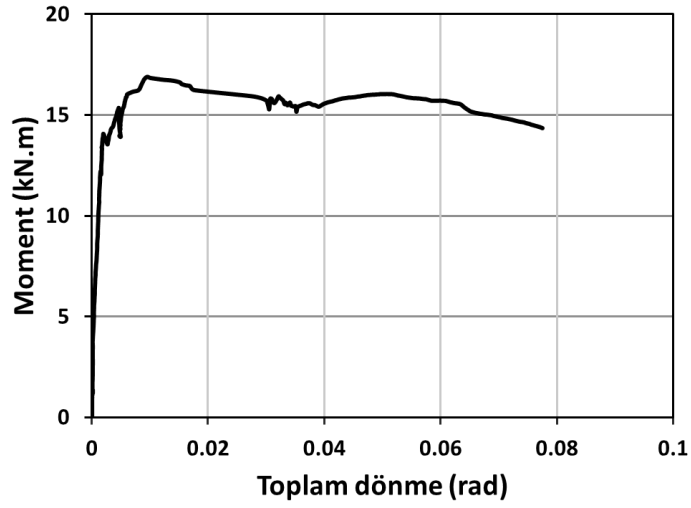
Deney elemanının deney süresince birim uzama miktarı 2,07 mm olarak ölçülmüştür.

Deneyler sırasında, yük hücresi ve potansiyometrik cetveller aracılığıyla elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak, elemanın burulma davranışı incelenmiştir. Bu verilerden, burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler, burulma rijitliğini açıklayan grafikler ve toplam enerji değişimini ortaya koyan grafikler her deney için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

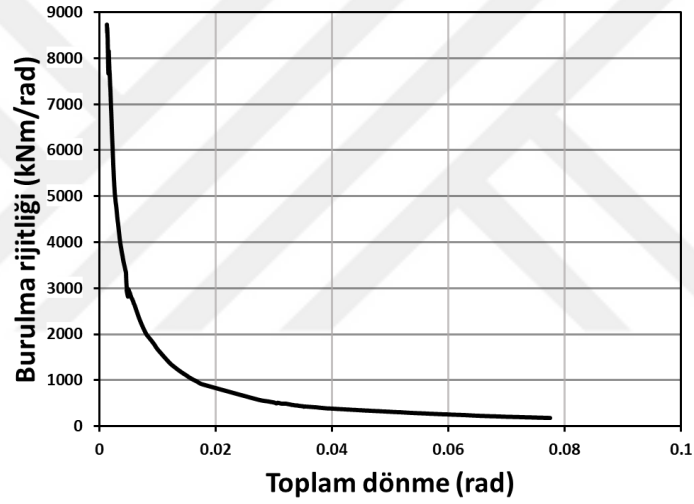
Moment ve toplam dönme arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.67'de yer almaktadır.

Deneylerde okunan maksimum burulma momenti, elemanın dönmesine bölünerek burulma rijitliği hesaplanmış ve Şekil 4.68'de bu değerler sunulmuştur.

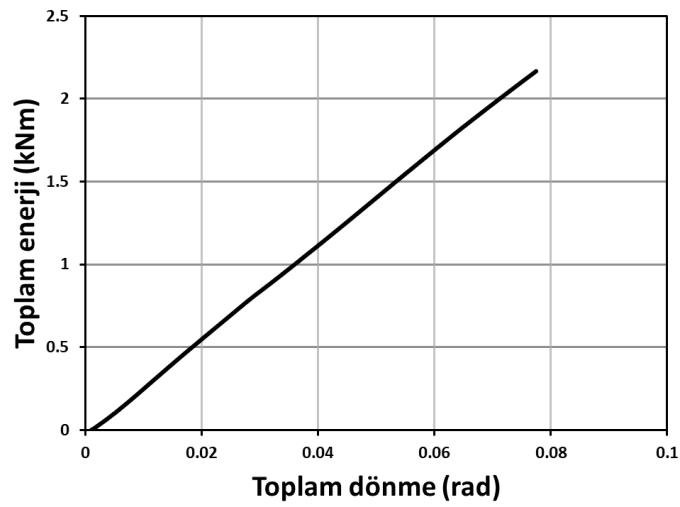
Toplam dönme eğrisinin altındaki alan, tüketilen enerji miktarını belirlemek amacıyla hesaplanmış ve buna dayalı olarak toplam enerji grafiği Şekil 4.69'da sunulmuştur.



Şekil 4.67. BK-D-10-B numunesinin burulma momenti-toplam dönme grafiği



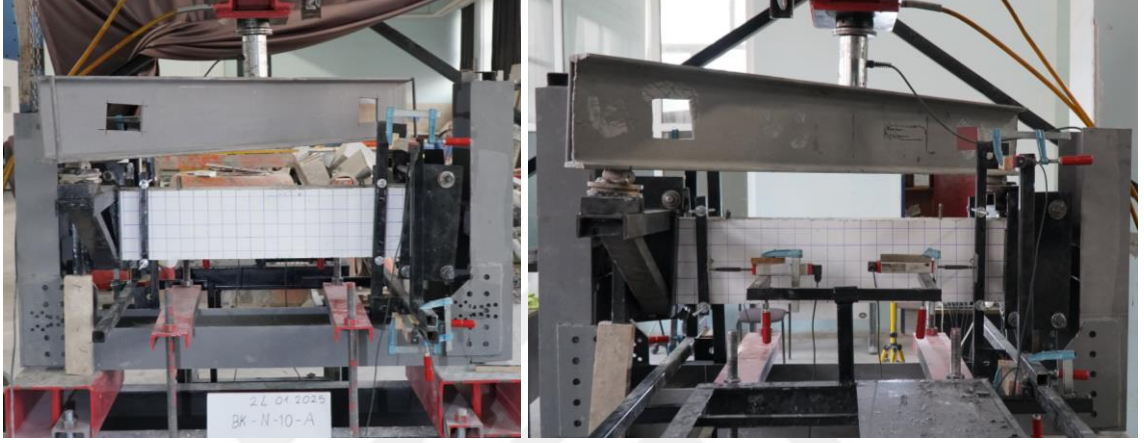
Şekil 4.68. BK-D-10-B numunesinin burulma rijitliği-toplam dönme grafiği



Şekil 4.69. BK-D-10-B numunesinin toplam enerji-toplam dönme grafiği

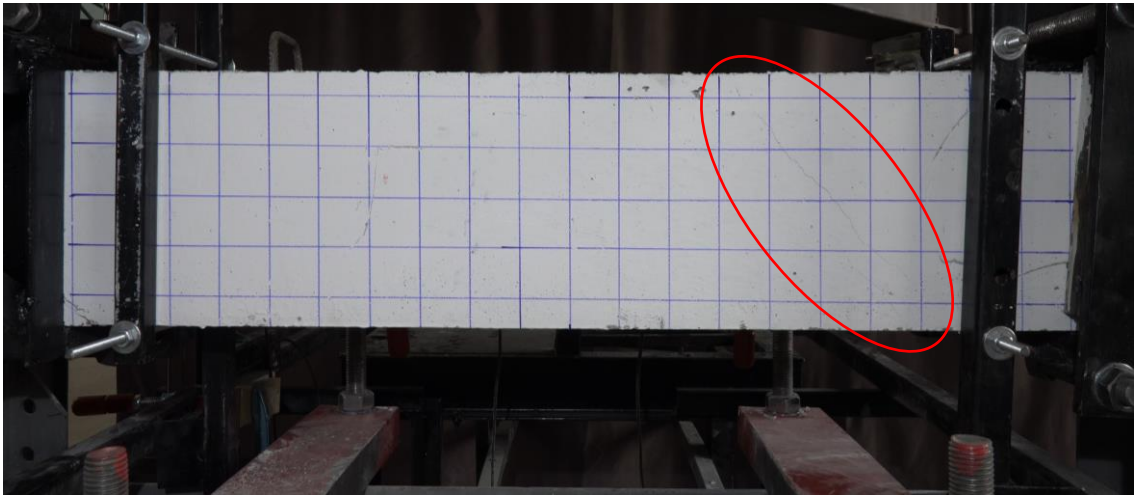
4.1.11. Deney 11 (BK-N-10-A)

Çalışma kapsamında BK-N-10-A numunesinde etriye aralığının 10 cm olduğu, boyuna donatı adetinin $2\phi 12$ olduğu ve donatı cinsinin nervürlü donatı olduğu durumlar çerçevesinde testi yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney düzeneği deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.70).



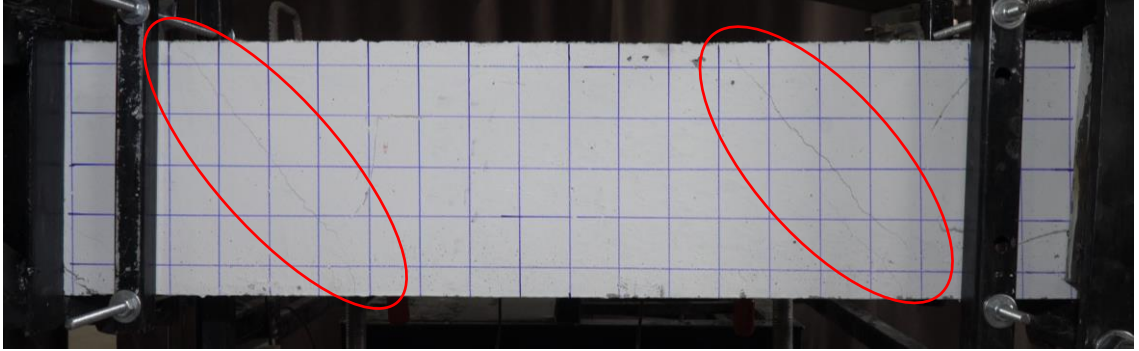
Şekil 4.70. BK-N-10-A numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney elemanında oluşan ilk çatlak $3,17 \times 10^{-3}$ radyan değerinde meydana gelmiştir ve bu dönme değerinde burulma momenti taşıma kapasitesi ise 12,68 kNm olarak kaydedilmiştir. Yüklemenin devam etmesi ile yeni çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar kiriş boyunca yaklaşık 45° 'lik bir açı ile meydana gelmiştir (Şekil 4.71).



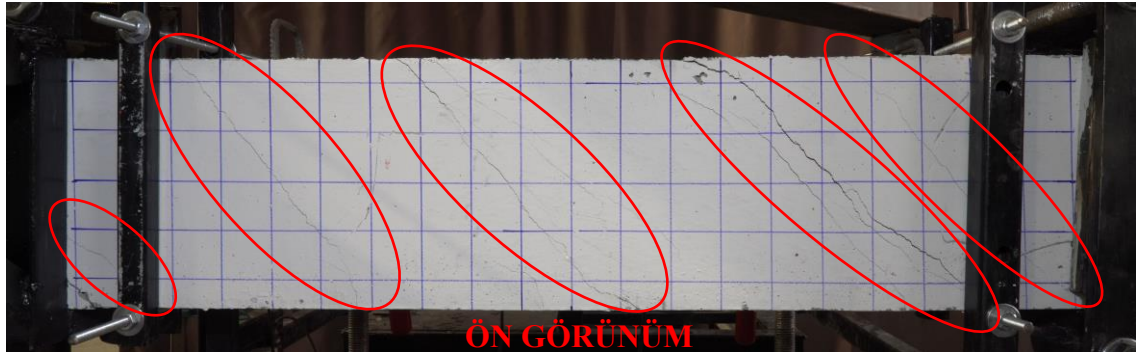
Şekil 4.71. BK-N-10-A numunesi ilk çatlak hasar durumu

Deney elemanı akma noktasına 14,30 kNm moment değerinde ve $22,36 \times 10^{-3}$ radyan değerinde ulaşmıştır. Elemanın bu andaki durumu Şekil 4.72’de gösterilmiştir.



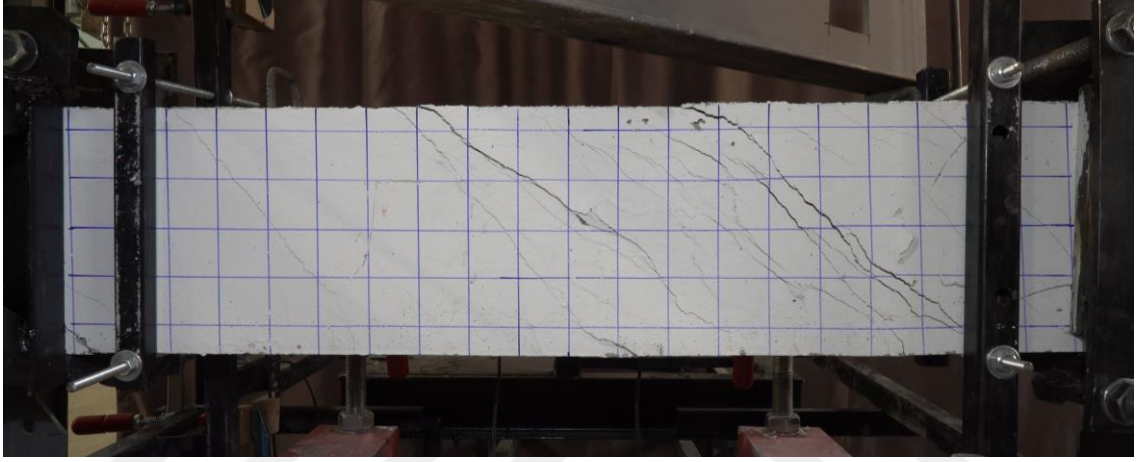
Şekil 4.72. BK-N-10-A numunesi akma anına ait hasar durumu

Deney elemanı 17,88 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değeri için dönme $54,55 \times 10^{-3}$ radyan olarak kaydedilmiştir. Maksimum moment değerinde çatlaklar incelendiğinde ilk çatlığa paralel yeni çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Deney elemanının ön ve arka yüzünde oluşan çatlakların belirginleştiği tespit edilmiştir. Şekil 4.73’te maksimum moment noktasına ait ön ve yüzeyine ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.73. BK-N-10-A numunesi maksimum burulma momenti ön ve arka yüzey için hasar durumu

Numunenin moment-dönme eğrisinde belirgin bir azalma oluşturduğu ve bu azalmanın genellikle %15 kapasite kaybına ulaştığında göçme kabul edildiği nokta belirlenmiştir (Eurocode 8, 2004; Ünal, 2016). Bu noktada numunede $98,62 \times 10^{-3}$ radyan dönme meydana gelmiştir. Göçme durumunda burulma momenti taşıma kapasitesi değerinin 15,20 kNm olduğu tespit edilmiştir. Göçme noktasına ait deney elemanının hasar durumu incelendiğinde yeni çatlakların oluştuğu ve öncesinde oluşan çatlakların belirginliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.74'te göçme noktasına ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.74. BK-N-10-A numunesi göçme noktası değerinde hasar durumu

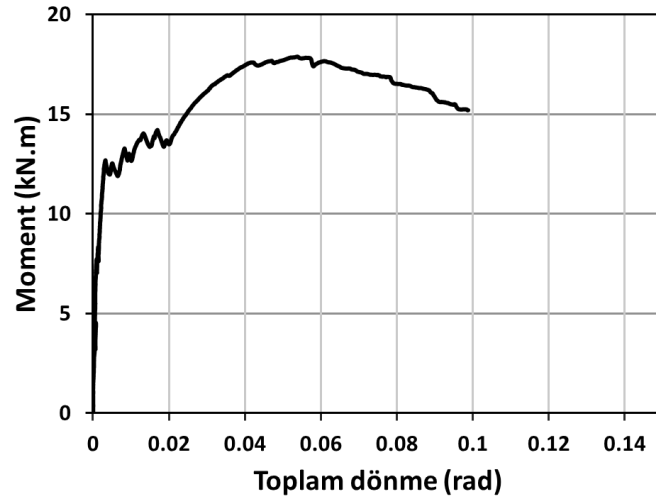
Deney elemanının deney süresince birim uzama miktarı 5,62 mm olarak ölçülmüştür.

Deneyler sırasında, yük hücresi ve potansiyometrik cetveller aracılığıyla elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak, elemanın burulma davranışı incelenmiştir. Bu verilerden, burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler, burulma rijitliğini açıklayan grafikler ve toplam enerji değişimini ortaya koyan grafikler her deney için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

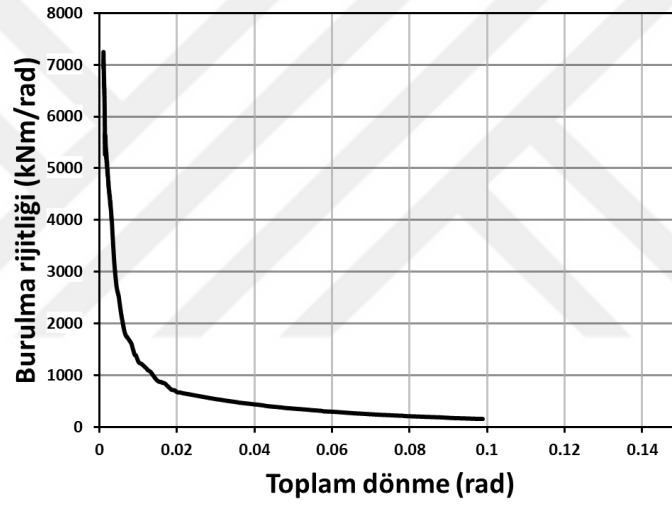
Moment ve toplam dönme arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.75'te yer almaktadır.

Deneylerde okunan maksimum burulma momenti, elemanın dönmesine bölünerek burulma rijitliği hesaplanmış ve Şekil 4.76'da bu değerler sunulmuştur.

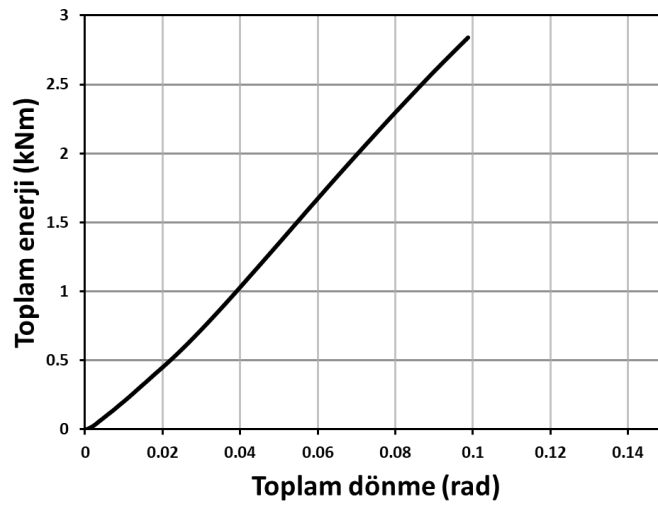
Toplam dönme eğrisinin altındaki alan, tüketilen enerji miktarını belirlemek amacıyla hesaplanmış ve buna dayalı olarak toplam enerji grafiği Şekil 4.77'de sunulmuştur.



Şekil 4.75. BK-N-10-A numunesinin burulma momenti-toplam dönme grafiği



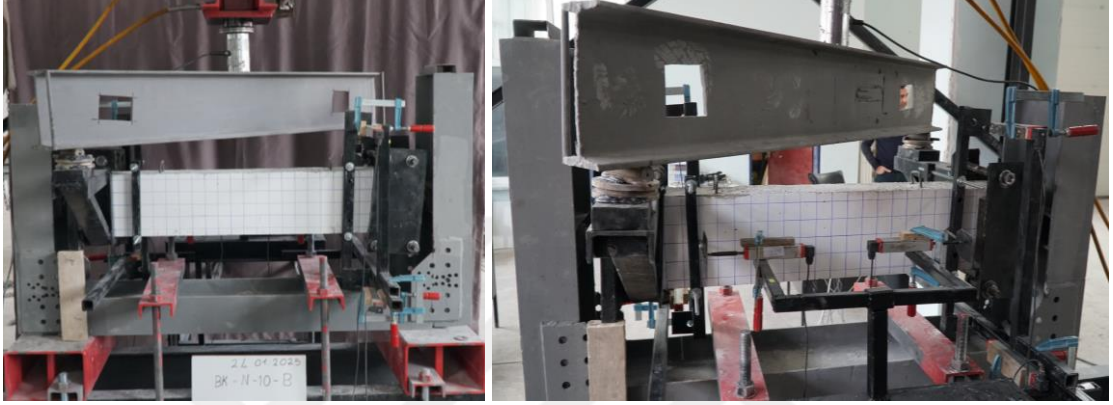
Şekil 4.76. BK-N-10-A numunesinin burulma rijitliği-toplam dönme grafiği



Şekil 4.77. BK-N-10-A numunesinin toplam enerji-toplam dönme grafiği

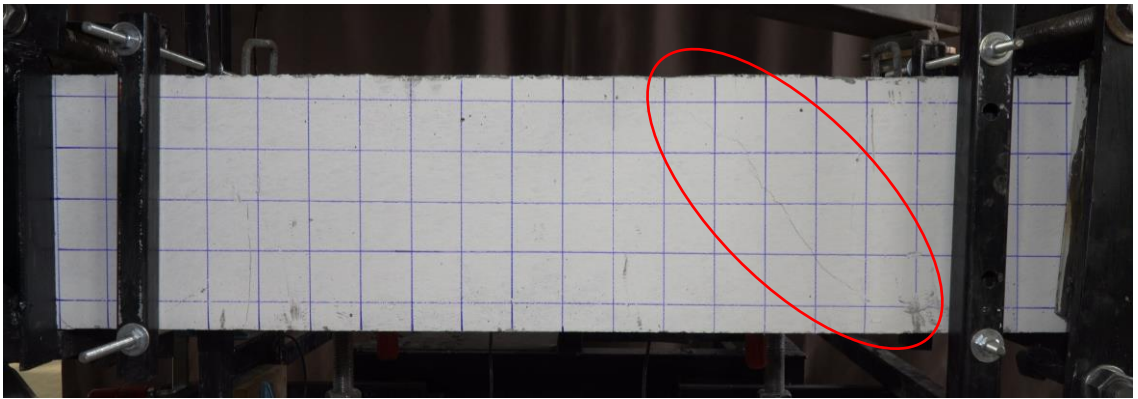
4.1.12. Deney 12 (BK-N-10-B)

Çalışma kapsamında BK-N-10-B numunesinde etriye aralığının 10 cm olduğu, boyuna donatı adetinin 3 ϕ 12 olduğu ve donatı cinsinin nervürlü donatı olduğu durumlar çerçevesinde testi yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney düzeneği deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.78).



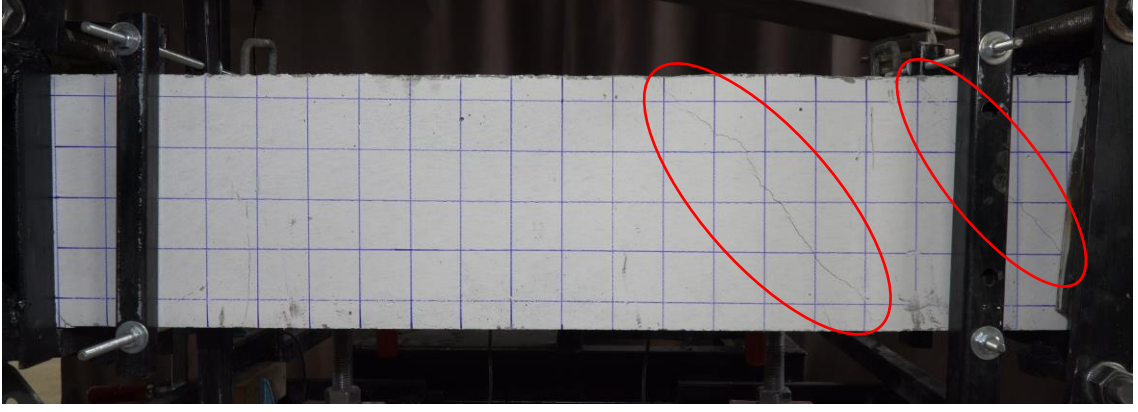
Şekil 4.78. BK-N-10-B numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney elemanında oluşan ilk çatlak $2,76 \times 10^{-3}$ radyan değerinde meydana gelmiştir ve bu dönme değerinde burulma momenti taşıma kapasitesi ise 13,03 kNm olarak kaydedilmiştir. Yüklemin devam etmesi ile yeni çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar kiriş boyunca yaklaşık 45° 'lik bir açı ile meydana gelmiştir (Şekil 4.79).



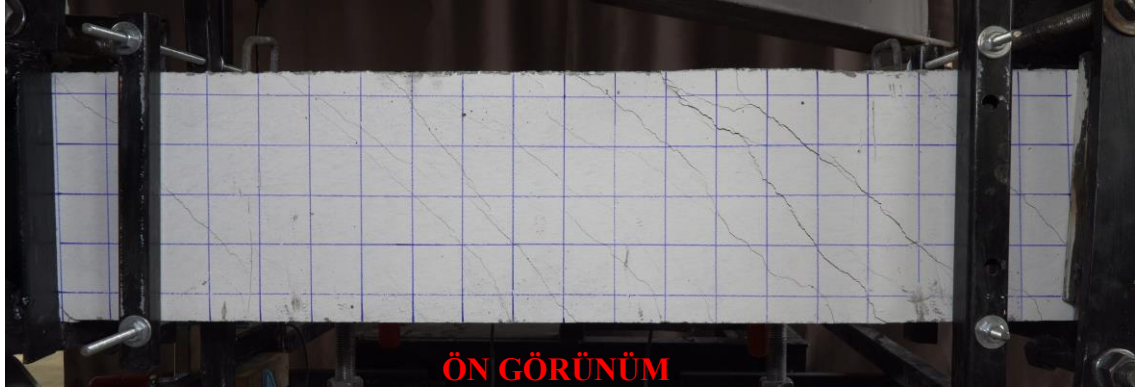
Şekil 4.79. BK-N-10-B numunesi ilk çatlak hasar durumu

Deney elemanı akma noktasına 14,38 kNm moment değerinde ve $8,17 \times 10^{-3}$ radyan değerinde ulaşmıştır. Elemanın akma noktasındaki durumu Şekil 4.80'de gösterilmiştir.



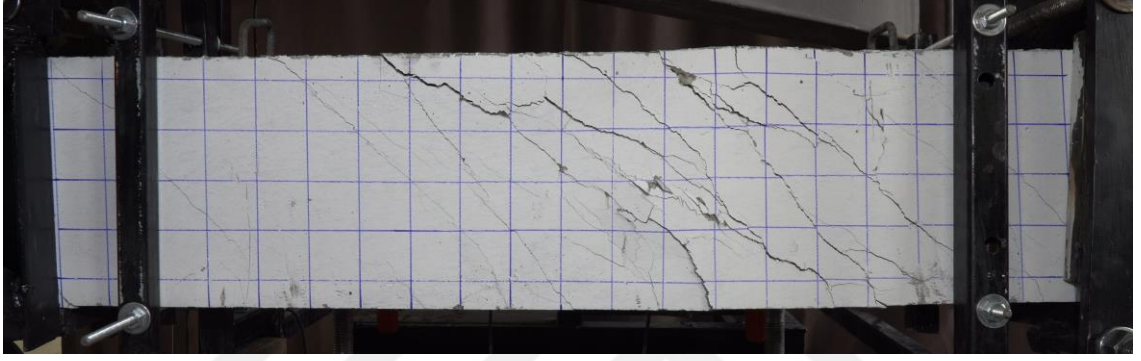
Şekil 4.80. BK-N-10-B numunesi akma noktası hasar durumu

Deney elemanı 17,98 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değeri için dönme $55,11 \times 10^{-3}$ radyan olarak kaydedilmiştir. Maksimum moment değerinde çatlaklar incelendiğinde ilk çatlakla paralel yeni çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Deney elemanının ön yüzünde oluşan çatlakların arka yüzünde oluşan çatlaklara göre daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.81’de maksimum moment noktasına ait ön ve yüzeyine ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.81. BK-N-10-B numunesi maksimum burulma momenti ön ve arka yüzü için hasar durumu

Numunenin moment-dönme eğrisinde belirgin bir azalma oluşturduğu ve bu azalmanın genellikle %15 kapasite kaybına ulaştığında göçme kabul edildiği nokta belirlenmiştir (Eurocode 8, 2004; Ünal, 2016). Bu noktada numunede $137,04 \times 10^{-3}$ radyan dönme meydana gelmiştir. Göçme durumunda burulma momenti taşıma kapasitesi değerinin 15,29 kNm olduğu tespit edilmiştir. Göçme noktasına ait deney elemanının hasar durumu incelendiğinde çatlakların belirginliklerinin arttığı ve kabuk betonda atmaların olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.82’de göçme noktasına ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.82. BK-N-10-B numunesi göçme noktası değerinde hasar durumu

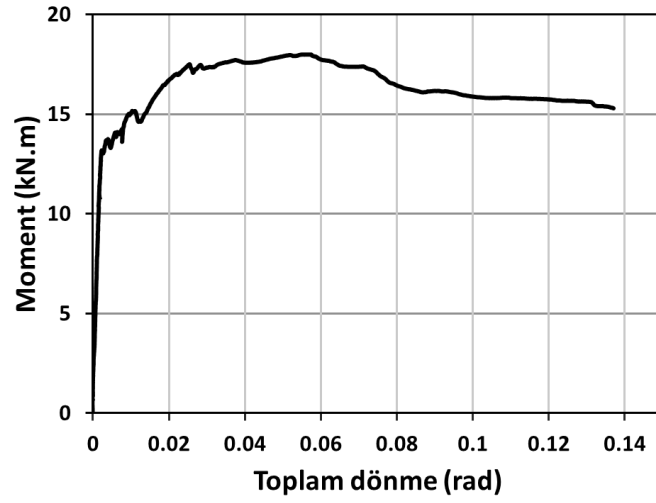
Deney elemanının deney süresince birim uzama miktarı 1,84 mm olarak ölçülmüştür.

Deneyler sırasında, yük hücresi ve potansiyometrik cetveller aracılığıyla elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak, elemanın burulma davranışı incelenmiştir. Bu verilerden, burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler, burulma rijitliğini açıklayan grafikler ve toplam enerji değişimini ortaya koyan grafikler her deney için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

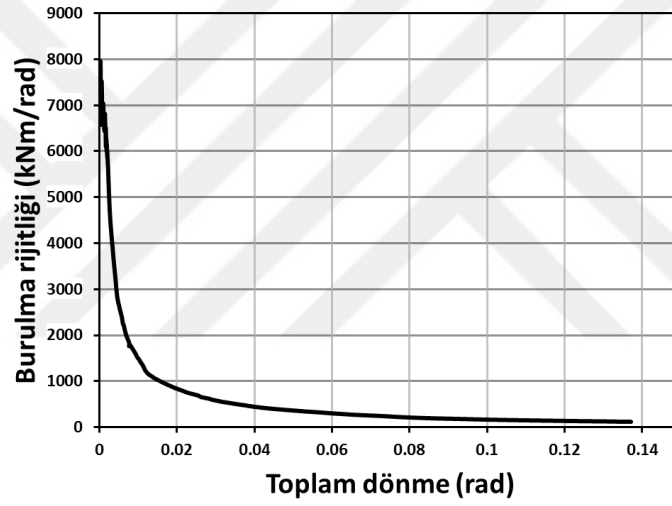
Moment ve toplam dönme arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.83'te yer almaktadır.

Deneylerde okunan maksimum burulma momenti, elemanın dönmesine bölünerek burulma rijitliği hesaplanmış ve Şekil 4.84'te bu değerler sunulmuştur.

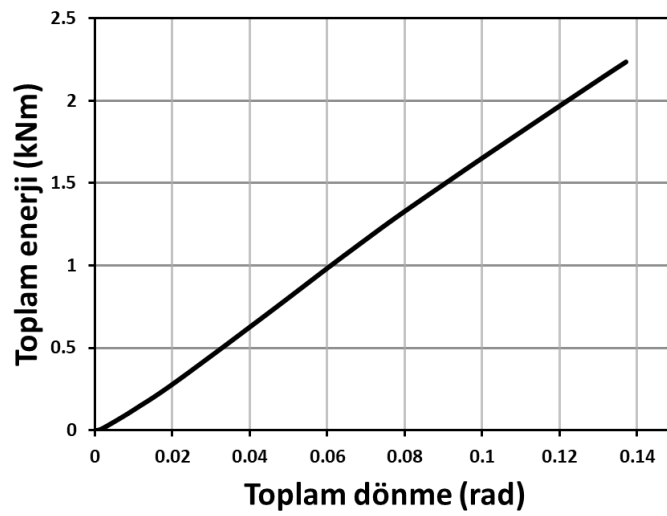
Toplam dönme eğrisinin altındaki alan, tüketilen enerji miktarını belirlemek amacıyla hesaplanmış ve buna dayalı olarak toplam enerji grafiği Şekil 4.85'te sunulmuştur.



Şekil 4.83. BK-N-10-B numunesinin burulma momenti-toplam dönme grafiği



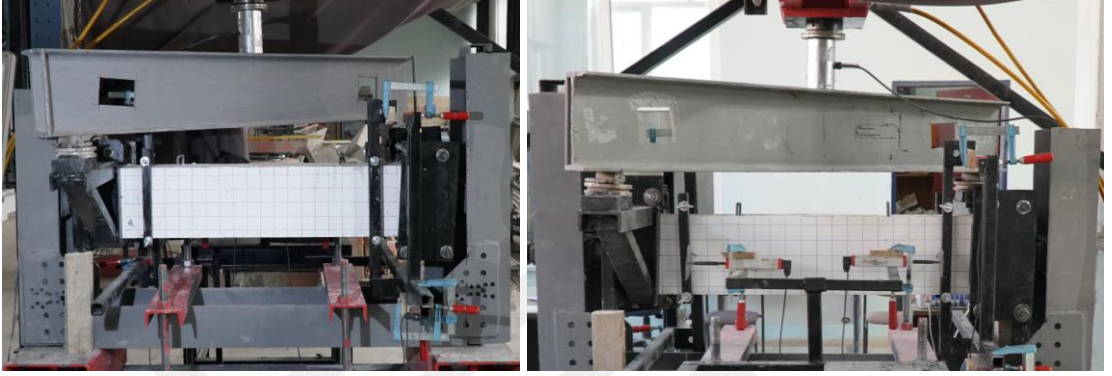
Şekil 4.84. BK-N-10-B numunesinin burulma rijitliği-toplam dönme grafiği



Şekil 4.85. BK-N-10-B numunesinin toplam enerji-toplam dönme grafiği

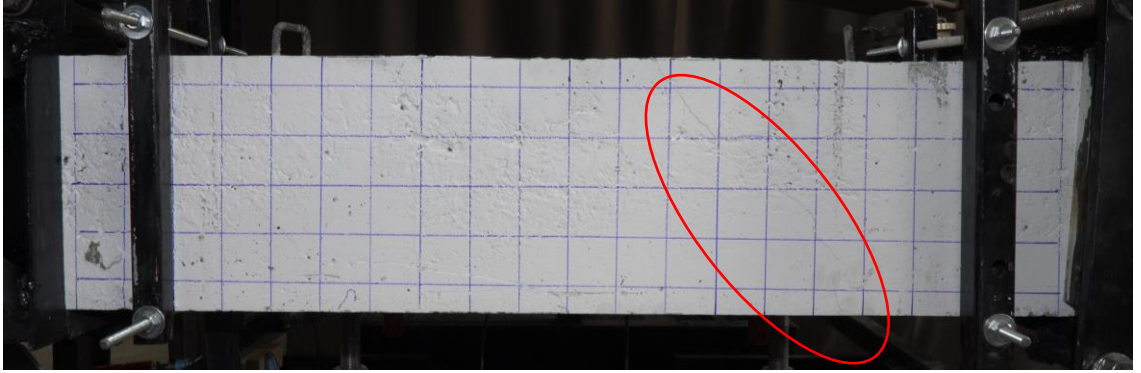
4.1.13. Deney 13 (BK-D-5-A)

Çalışma kapsamında BK-D-5-A numunesinde etriye aralığının 10 cm olduğu, boyuna donatı adetinin 2 ϕ 12 olduğu ve donatı cinsinin nervürlü donatı olduğu durumlar çerçevesinde testi yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney düzeneği deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.86).



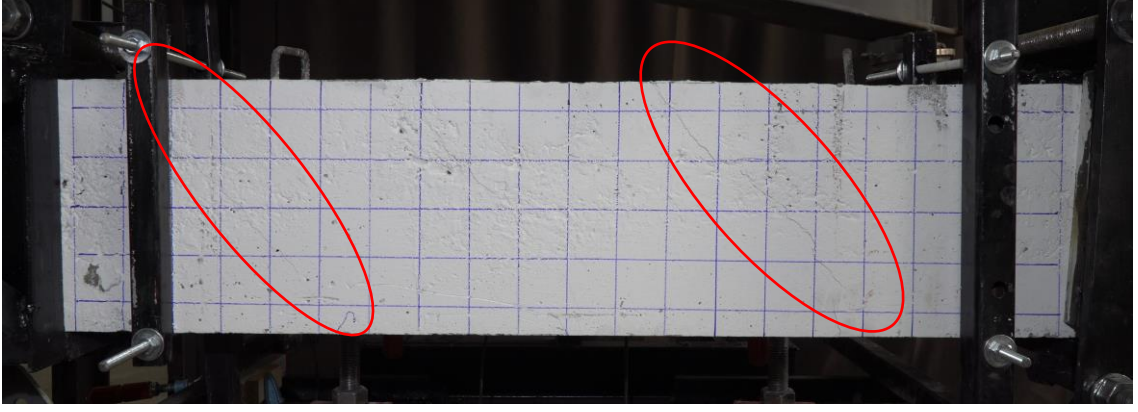
Şekil 4.86. BK-D-5-A numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney elemanında oluşan ilk çatlak $2,65 \times 10^{-3}$ radyan değerinde meydana gelmiştir ve bu dönme değerinde burulma momenti taşıma kapasitesi ise 14.89 kNm olarak kaydedilmiştir. Yüklemenin devam etmesi ile yeni çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar kiriş boyunca yaklaşık 45°'lik bir açı ile meydana gelmiştir (Şekil 4.87).



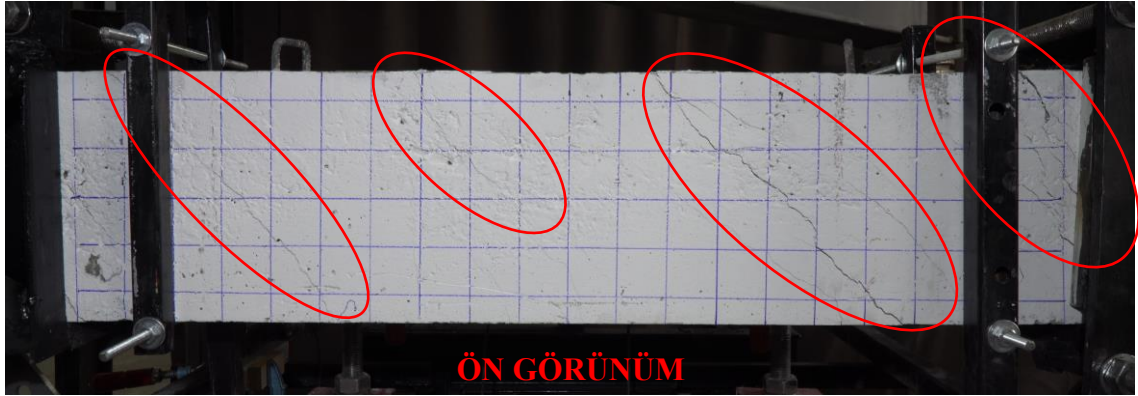
Şekil 4.87. BK-D-5-A numunesi ilk çatlak hasar durumu

Deney elemanı akma noktasına yaklaşık 18,02 kNm moment değerinde ve $15,85 \times 10^{-3}$ radyan değerinde ulaşmıştır. Elemanın akma noktasındaki durumu Şekil 4.88'de gösterilmiştir.



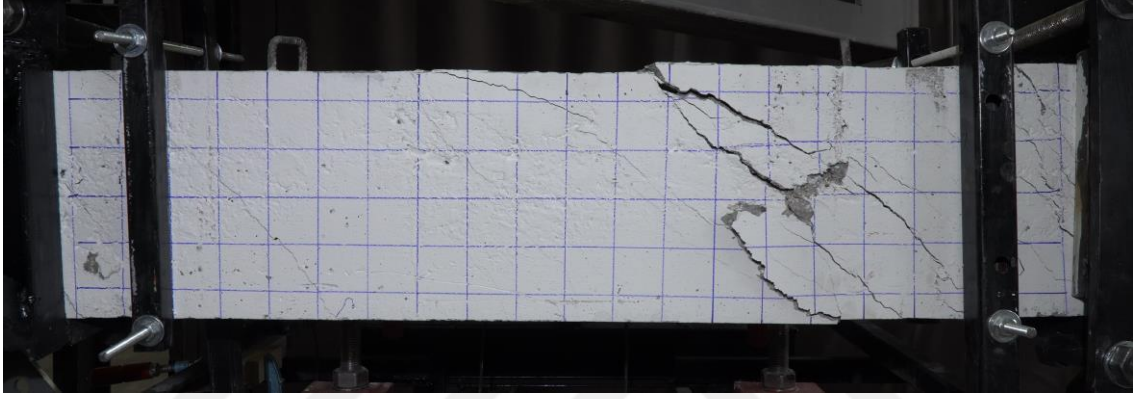
Şekil 4.88. BK-D-5-A numunesi akma anına ait hasar durumu

Deney elemanı 22,53 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değeri için dönme $58,06 \times 10^{-3}$ radyan olarak kaydedilmiştir. Maksimum moment değerinde oluşan çatlaklar incelendiğinde ilk çatlığa paralel yeni çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Deney elemanının ön ve arka yüzünde oluşan çatlakların belirginleştiği tespit edilmiştir. Şekil 4.89’da maksimum moment noktasına ait ön ve yüzeyine ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.89 BK-D-5-A numunesi maksimum burulma momenti hasar durumu

Numunenin moment-dönme eğrisinde belirgin bir azalma oluşturduğu ve bu azalmanın genellikle %15 kapasite kaybına ulaştığında göçme kabul edildiği nokta belirlenmiştir (Eurocode 8, 2004; Ünal, 2016). Bu noktada numunede $138,00 \times 10^{-3}$ radyan dönme meydana gelmiştir. Göçme durumunda burulma momenti taşıma kapasitesi değerinin 19,15 kNm olduğu tespit edilmiştir. Göçme noktasına ait deney elemanının hasar durumu incelendiğinde çatlakların belirginliklerinin arttığı ve kabuk betonda atmaların olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.90'da göçme noktasına ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.90. BK-D-5-A numunesi göçme noktası değerinde hasar durumu

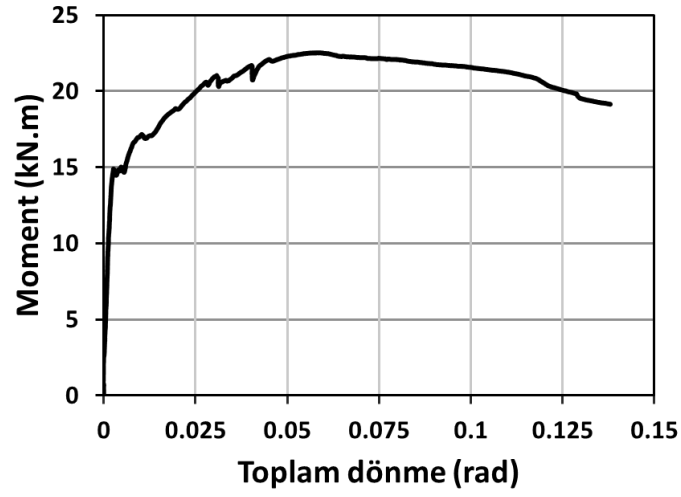
Deney elemanının deney süresince birim uzama miktarı 0,89 mm olarak ölçülmüştür.

Deneyler sırasında, yük hücresi ve potansiyometrik cetveller aracılığıyla elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak, elemanın burulma davranışı incelenmiştir. Bu verilerden, burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler, burulma rijitliğini açıklayan grafikler ve toplam enerji değişimini ortaya koyan grafikler her deney için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

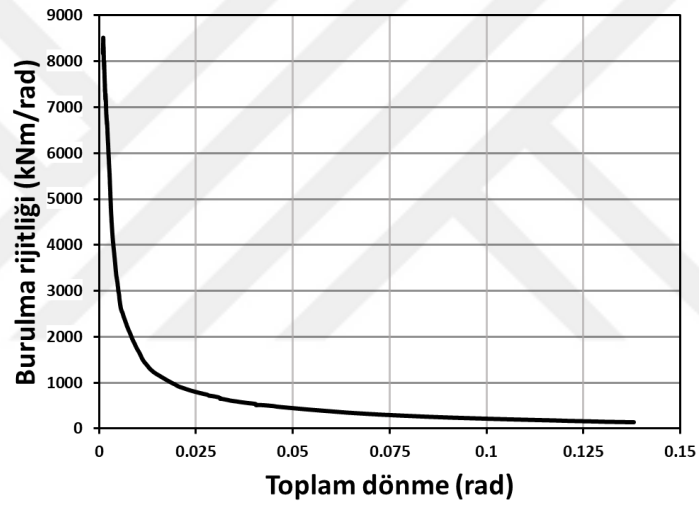
Moment ve toplam dönme arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.91'de yer almaktadır.

Deneylerde okunan maksimum burulma momenti, elemanın dönmesine bölünerek burulma rijitliği hesaplanmış ve Şekil 4.92'de bu değerler sunulmuştur.

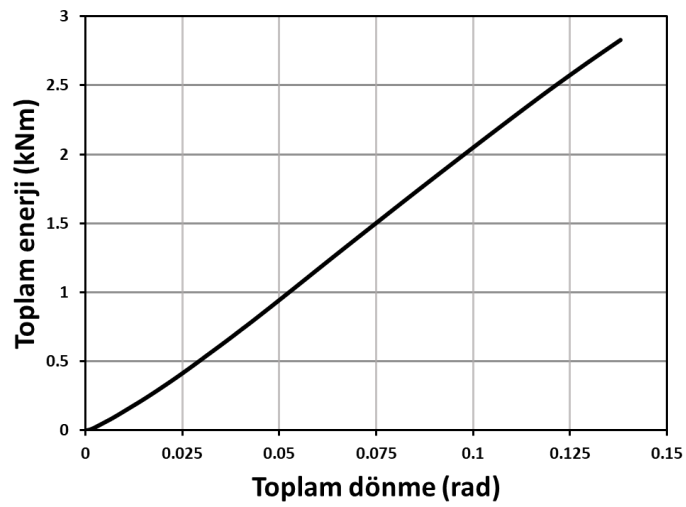
Toplam dönme eğrisinin altındaki alan, tüketilen enerji miktarını belirlemek amacıyla hesaplanmış ve buna dayalı olarak toplam enerji grafiği Şekil 4.93'te sunulmuştur.



Şekil 4.91. BK-D-5-A numunesinin burulma momenti-toplam dönme grafiği



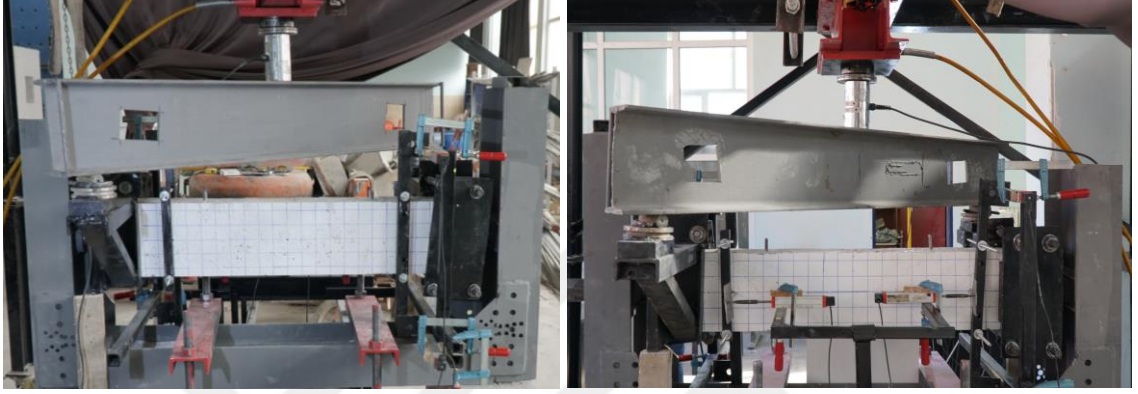
Şekil 4.92. BK-D-5-A numunesinin burulma rijitliği-toplam dönme grafiği



Şekil 4.93. BK-D-5-A numunesinin toplam enerji-toplam dönme grafiği

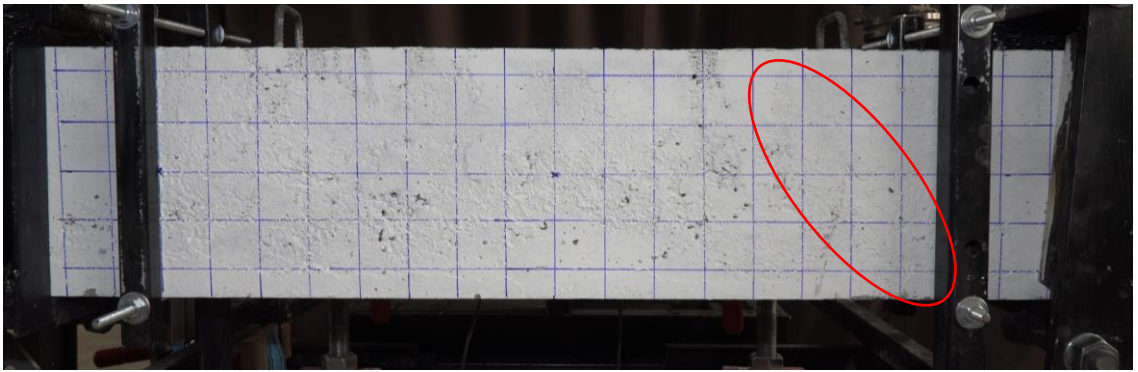
4.1.14. Deney 14 (BK-D-5-B)

Çalışma kapsamında BK-D-5-B numunesinde etriye aralığının 5 cm olduğu, boyuna donatı adetinin 3 ϕ 12 olduğu ve donatı cinsinin nervürlü donatı olduğu durumlar çerçevesinde testi yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney düzeneği deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.94).



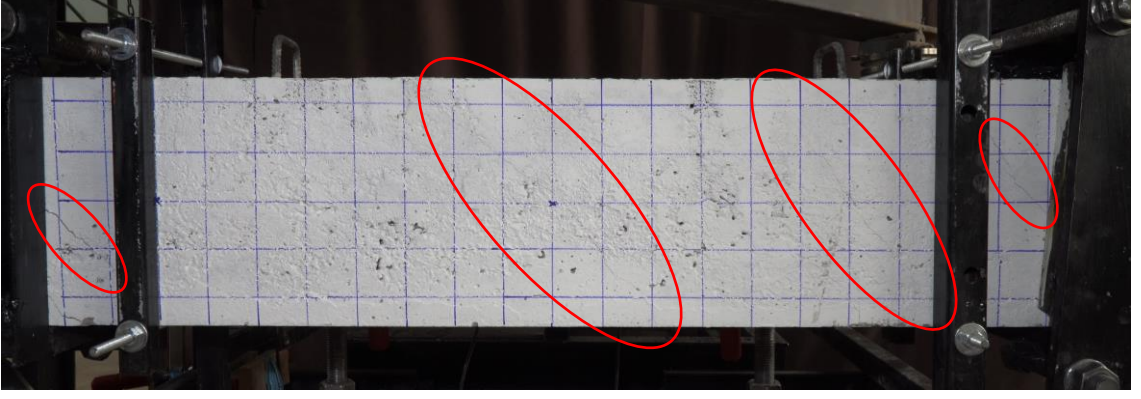
Şekil 4.94. BK-D-5-B numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney elemanında oluşan ilk çatlak $3,11 \times 10^{-3}$ radyan değerinde meydana gelmiştir ve bu dönme değerinde burulma momenti taşıma kapasitesi ise 16,31 kNm olarak kaydedilmiştir. Yüklemin devam etmesi ile yeni çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar kiriş boyunca yaklaşık 45° 'lik bir açı ile meydana gelmiştir (Şekil 4.95).



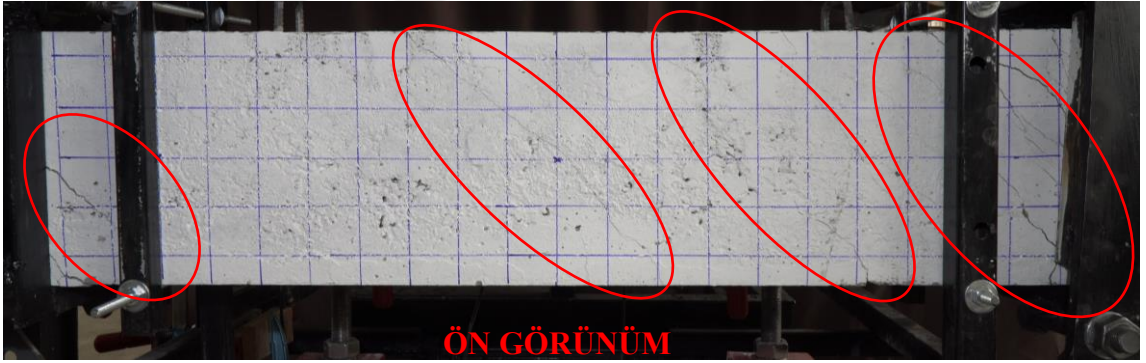
Şekil 4.95. BK-D-5-B numunesi ilk çatlak hasar durumu

Deney elemanı akma noktasına 20,37 kNm moment değerinde ve $18,99 \times 10^{-3}$ radyan değerinde ulaşmıştır. Elemanın akma noktasındaki durumu Şekil 4.96'da gösterilmiştir.



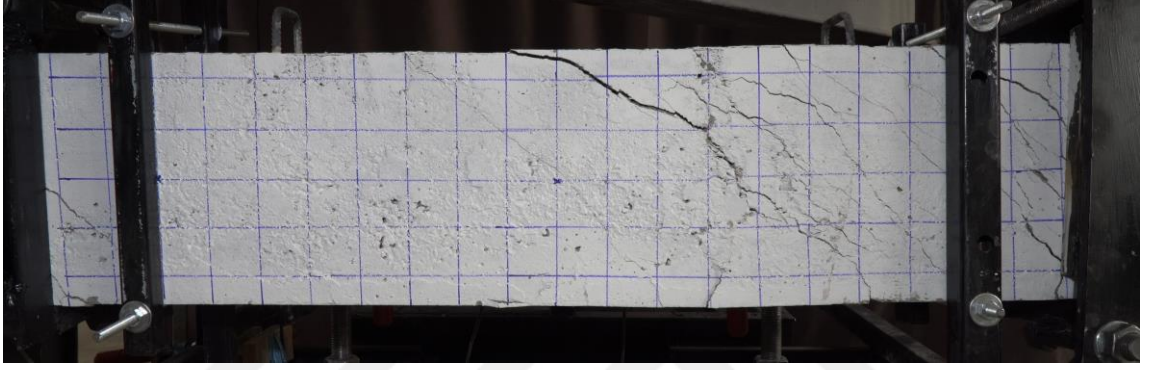
Şekil 4.96 BK-D-5-B numunesi akma noktası hasar durumu

Deney elemanı 24,89 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değeri için dönme $51,07 \times 10^{-3}$ radyan olarak kaydedilmiştir. Maksimum moment değerinde çatlaklar incelendiğinde ilk çatlığa paralel yeni çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Deney elemanının ön yüzünde oluşan çatlakların arka yüzünde oluşan çatlaklara göre daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.97’de maksimum moment noktasına ait ön ve yüzeyine ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.97. BK-D-5-B numunesi maksimum burulma momenti ön ve arka yüzey için hasar durumu

Numunenin moment-dönme eğrisinde belirgin bir azalma oluşturduğu ve bu azalmanın genellikle %15 kapasite kaybına ulaştığında göçme kabul edildiği nokta belirlenmiştir (Eurocode 8, 2004; Ünal, 2016). Bu noktada numunede $116,84 \times 10^{-3}$ radyan dönme meydana gelmiştir. Göçme durumunda burulma momenti taşıma kapasitesi değerinin 21,15 kNm olduğu tespit edilmiştir. Göçme noktasına ait deney elemanının hasar durumu incelendiğinde çatlakların belirginliklerinin arttığı ve kabuk betonda atmaların olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.98’de göçme noktasına ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.98. BK-D-5-B numunesi göçme noktası değerinde hasar durumu

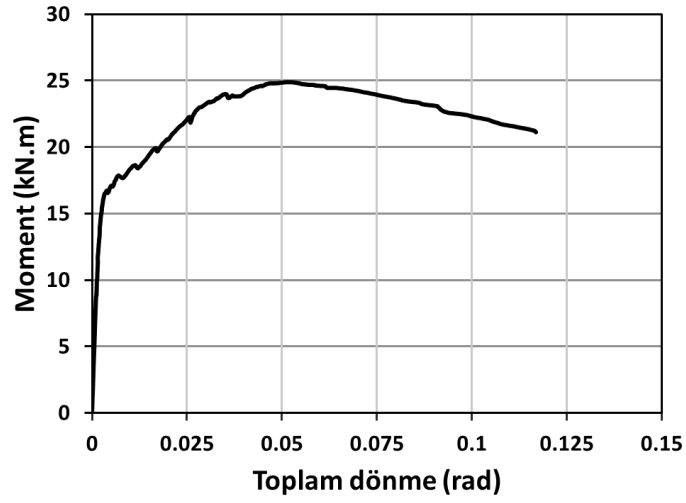
Deney elemanının deney süresince birim uzama miktarı 5,31 mm olarak ölçülmüştür.

Deneyler sırasında, yük hücresi ve potansiyometrik cetveller aracılığıyla elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak, elemanın burulma davranışı incelenmiştir. Bu verilerden, burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler, burulma rijitliğini açıklayan grafikler ve toplam enerji değişimini ortaya koyan grafikler her deney için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

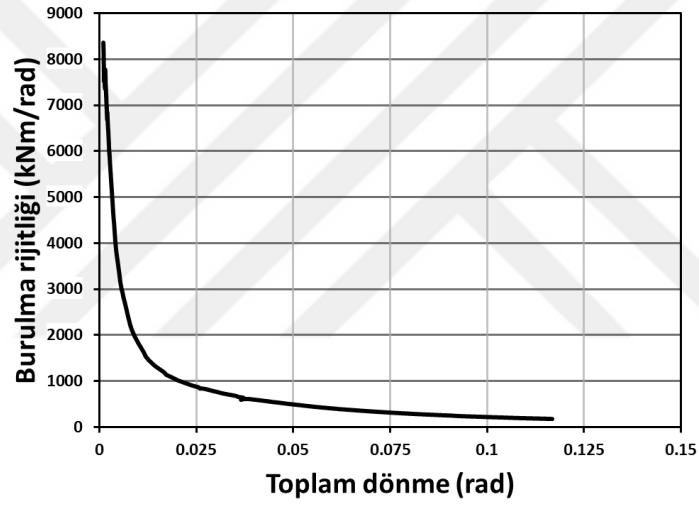
Moment ve toplam dönme arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.99’da yer almaktadır.

Deneylerde okunan maksimum burulma momenti, elemanın dönmesine bölünerek burulma rijitliği hesaplanmış ve Şekil 4.100’de bu değerler sunulmuştur.

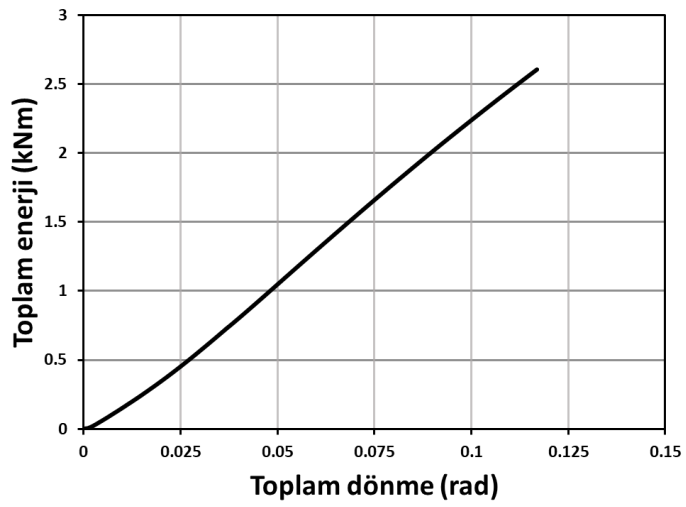
Toplam dönme eğrisinin altındaki alan, tüketilen enerji miktarını belirlemek amacıyla hesaplanmış ve buna dayalı olarak toplam enerji grafiği Şekil 4.101’de sunulmuştur.



Şekil 4.99. BK-D-5-B numunesinin burulma momenti-toplam dönme grafiği



Şekil 4.100. BK-D-5-B numunesinin burulma rijitliği-toplam dönme grafiği



Şekil 4.101. BK-D-5-B numunesinin toplam enerji-toplam dönme grafiği

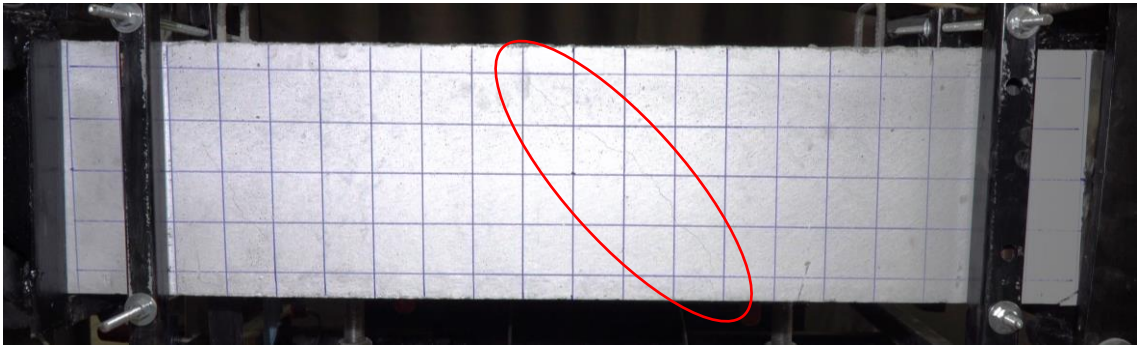
4.1.15. Deney 15 (BK-N-5-A)

Çalışma kapsamında BK-N-5-A numunesinde etriye aralığının 5 cm olduğu, boyuna donatı adetinin $2\phi 12$ olduğu ve donatı cinsinin nervürlü donatı olduğu durumlar çerçevesinde testi yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney düzeneği deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.102).



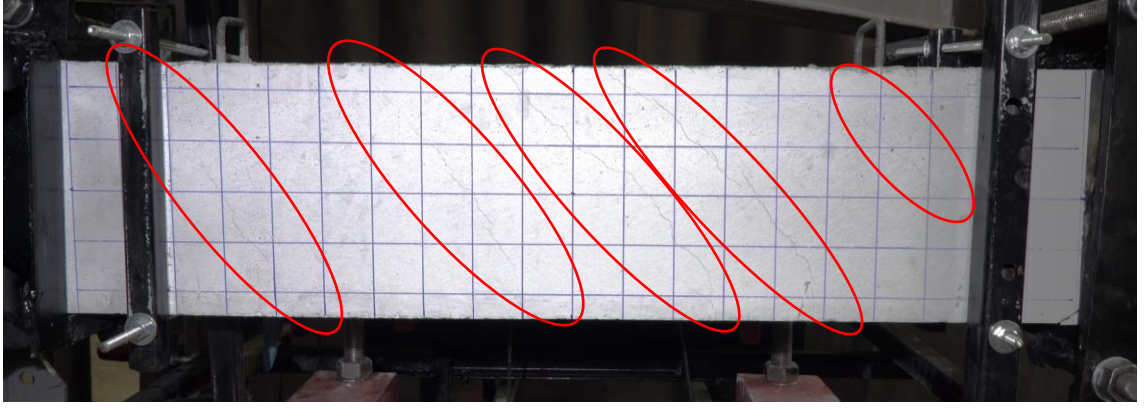
Şekil 4.102. BK-N-5-A numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney elemanında oluşan ilk çatlak $2,44 \times 10^{-3}$ radyan değerinde meydana gelmiştir ve bu dönme değerinde burulma momenti taşıma kapasitesi ise 14,24 kNm olarak kaydedilmiştir. Yüklemin devam etmesi ile yeni çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar kiriş boyunca yaklaşık 45° 'lik bir açı ile meydana gelmiştir (Şekil 4.103).



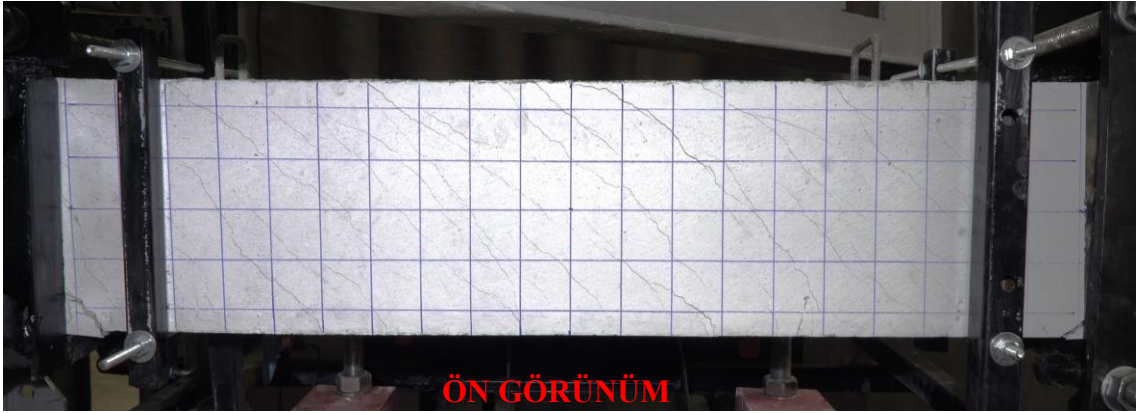
Şekil 4.103. BK-N-5-A numunesi ilk çatlak hasar durumu

Deney elemanı akma noktasına yaklaşık 20,64 kNm moment değerinde ve $31,50 \times 10^{-3}$ radyan değerinde ulaşmıştır. Elemanın akma noktasındaki durumu Şekil 4.104'te gösterilmiştir.



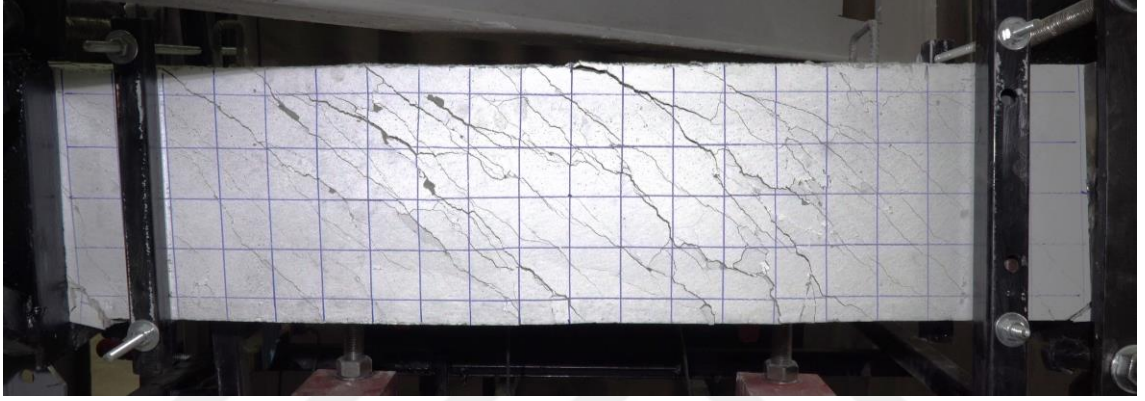
Şekil 4.104. BK-N-5-A numunesi akma noktası hasar durumu

Deney elemanı 25,81 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değeri için dönme $75,09 \times 10^{-3}$ radyan olarak kaydedilmiştir. Maksimum moment değerinde çatlaklar incelendiğinde ilk çatlakla paralel yeni çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Deney elemanının ön ve arka yüzünde oluşan çatlakların belirginliklerinin arttığı tespit edilmiştir. Şekil 4.105'te maksimum moment noktasına ait ön ve yüzeyine ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.105. BK-N-5-A numunesi maksimum burulma momenti ön ve arka yüzey için hasar durumu

Numunenin moment-dönme eğrisinde belirgin bir azalma oluşturduğu ve bu azalmanın genellikle %15 kapasite kaybına ulaştığında göçme kabul edildiği nokta belirlenmiştir (Eurocode 8, 2004; Ünal, 2016). Bu noktada numunede $279,02 \times 10^{-3}$ radyan dönme meydana gelmiştir. Göçme durumunda burulma momenti taşıma kapasitesi değerinin 21,95 kNm olduğu tespit edilmiştir. Göçme noktasına ait deney elemanının hasar durumu incelendiğinde çatlakların belirginliklerinin arttığı ve kabuk betonda atmaların olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.106'da göçme noktasına ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.106. BK-N-5-A numunesi göçme noktası değerinde hasar durumu

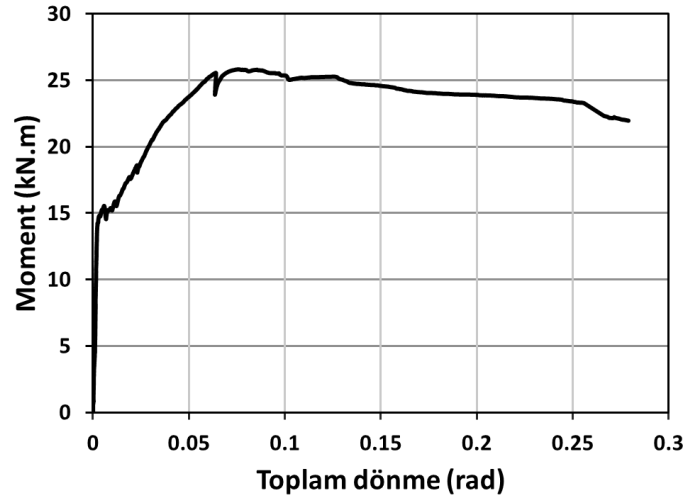
Deney elemanının deney süresince birim uzama miktarı 9,03 mm olarak ölçülmüştür.

Deneyler sırasında, yük hücresi ve potansiyometrik cetveller aracılığıyla elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak, elemanın burulma davranışı incelenmiştir. Bu verilerden, burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler, burulma rijitliğini açıklayan grafikler ve toplam enerji değişimini ortaya koyan grafikler her deney için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

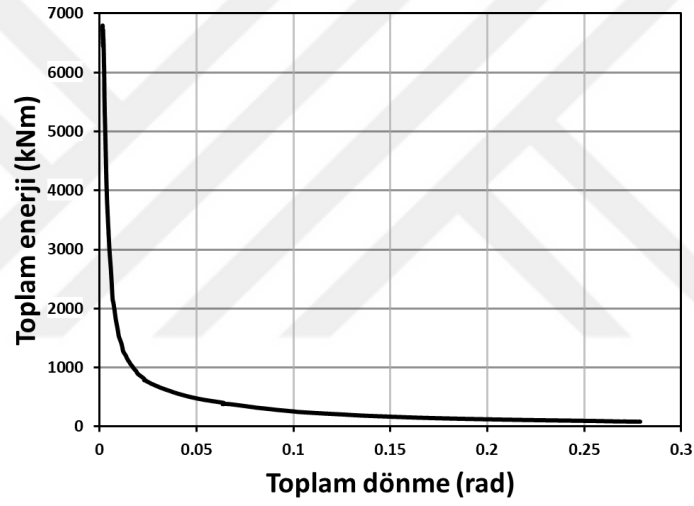
Moment ve toplam dönme arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.107'de yer almaktadır.

Deneylerde okunan maksimum burulma momenti, elemanın dönmesine bölünerek burulma rijitliği hesaplanmış ve Şekil 4.108'de bu değerler sunulmuştur.

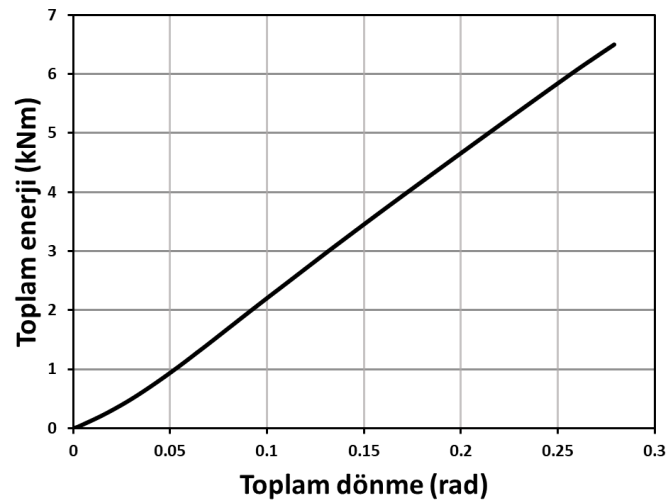
Toplam dönme eğrisinin altındaki alan, tüketilen enerji miktarını belirlemek amacıyla hesaplanmış ve buna dayalı olarak toplam enerji grafiği Şekil 4.109'da sunulmuştur.



Şekil 4.107. BK-N-5-A numunesinin burulma momenti-toplam dönme grafiği



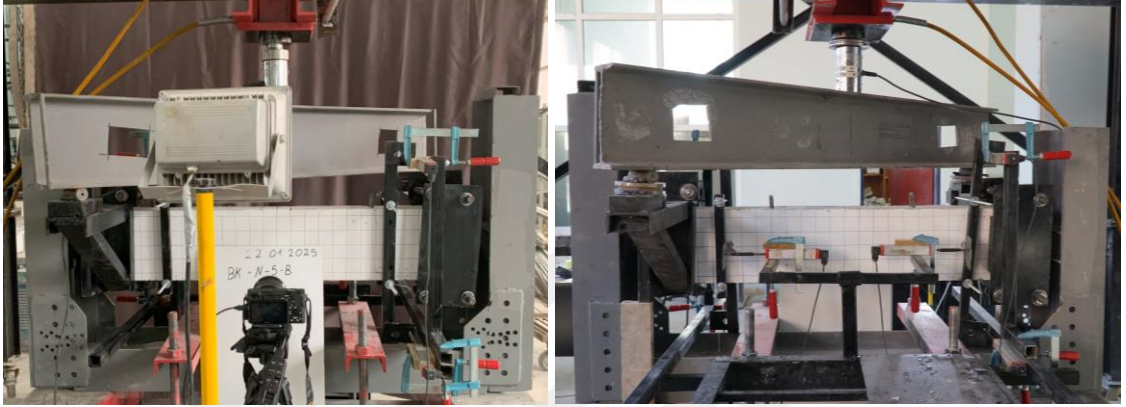
Şekil 4.108. BK-N-5-A numunesinin burulma rijitliği-toplam dönme grafiği



Şekil 4.109. BK-N-5-A numunesinin toplam enerji-toplam dönme grafiği

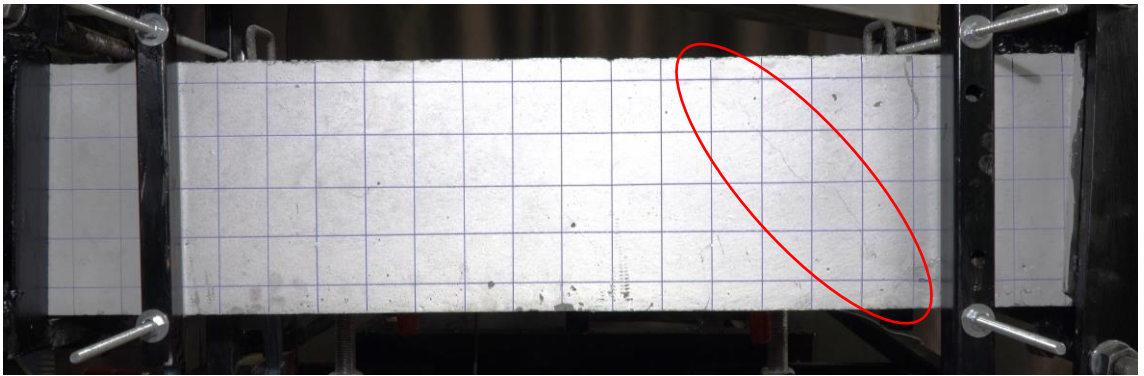
4.1.16. Deney 16 (BK-N-5-B)

Çalışma kapsamında BK-N-5-B numunesinde etriye aralığının 5 cm olduğu, boyuna donatı adetinin $3\phi 12$ olduğu ve donatı cinsinin nervürlü donatı olduğu durumlar çerçevesinde testi yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney düzeneği deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.110).



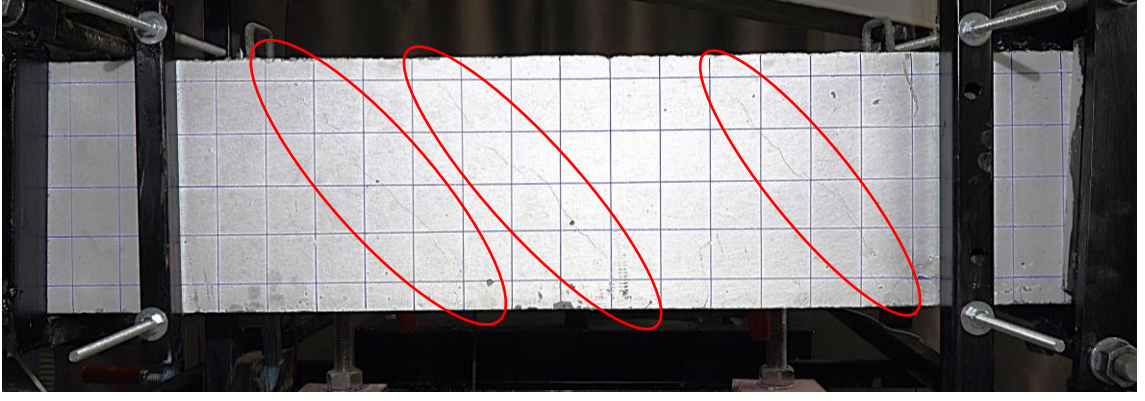
Şekil 4.110. BK-N-5-B numunesinin deney düzeneğinde görünüşü

Deney elemanında oluşan ilk çatlak $4,01 \times 10^{-3}$ radyan değerinde meydana gelmiştir ve bu dönme değerinde burulma momenti taşıma kapasitesi ise 13,48 kNm olarak kaydedilmiştir (Şekil 4.111). Yüklemin devam etmesi ile yeni çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar kiriş boyunca yaklaşık 45° 'lik bir açı ile meydana gelmiştir.



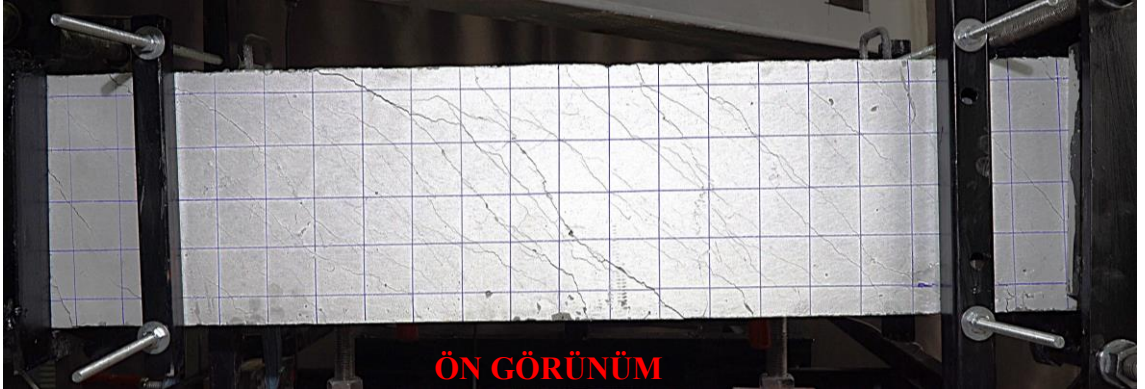
Şekil 4.111. BK-N-5-B numunesi ilk çatlak hasar durumu

Deney elemanı akma noktasına 21,52 kNm moment değerinde ve $36,52 \times 10^{-3}$ radyan değerinde ulaşmıştır. Elemanın akma noktasındaki durumu Şekil 4.112'de gösterilmiştir.



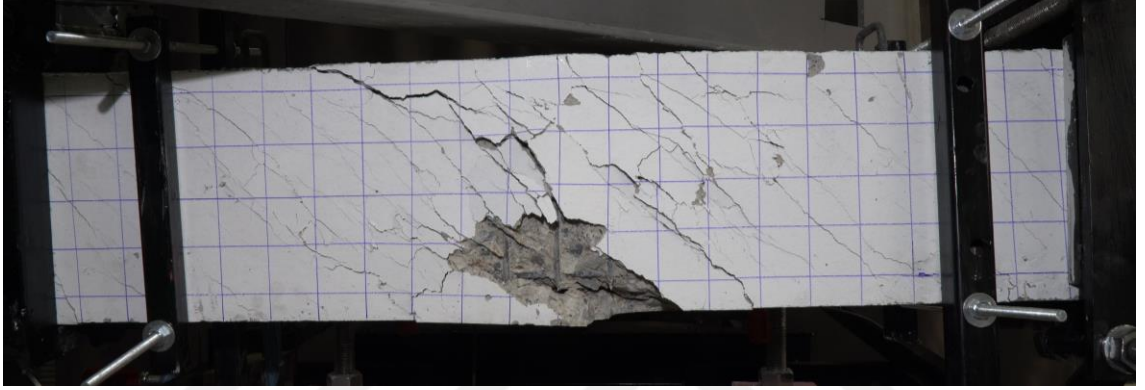
Şekil 4.112. BK-N-5-B numunesi akma noktası hasar durumu

Deney elemanı 26,90 kNm moment değerinde maksimum burulma momenti taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Maksimum moment değeri için dönme $87,69 \times 10^{-3}$ radyan olarak kaydedilmiştir. Maksimum moment değerinde çatlaklar incelendiğinde ilk çatlakla paralel yeni çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Deney elemanının ön ve arka yüzünde oluşan çatlakların belirginliğinin arttığı tespit edilmiştir. Şekil 4.113'te maksimum moment noktasına ait ön ve yüzeyine ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.113. BK-N-5-B numunesi maksimum burulma momenti ön ve arka yüzey için hasar durumu

Numunenin moment-dönme eğrisinde belirgin bir azalma oluşturduğu ve bu azalmanın genellikle %15 kapasite kaybına ulaştığında göçme kabul edildiği nokta belirlenmiştir (Eurocode 8, 2004; Ünal, 2016). Bu noktada numunede $266,06 \times 10^{-3}$ radyan dönme meydana gelmiştir. Göçme durumunda burulma momenti taşıma kapasitesi değerinin 22,86 kNm olduğu tespit edilmiştir. Göçme noktasına ait deney elemanının hasar durumu incelendiğinde çatlakların belirginliklerinin arttığı ve kabuk betonda atmaların olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.114'te göçme noktasına ait hasar durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.114. BK-N-5-B numunesi göçme noktası hasar durumu

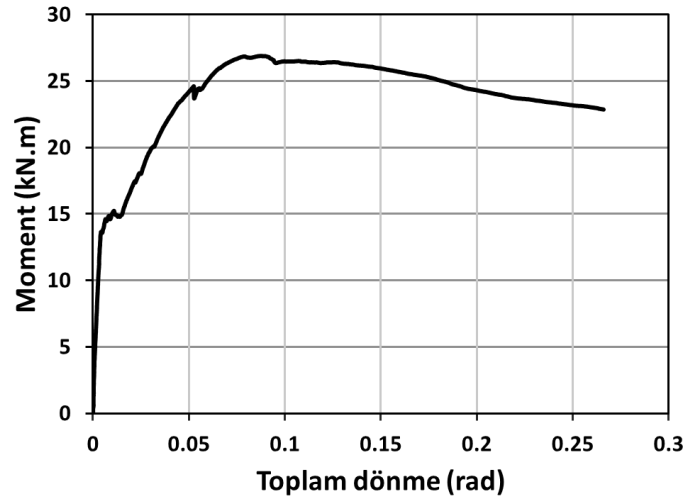
Deney elemanının deney süresince birim uzama miktarı 5,00 mm olarak ölçülmüştür.

Deneyler sırasında, yük hücresi ve potansiyometrik cetveller aracılığıyla elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak, elemanın burulma davranışı incelenmiştir. Bu verilerden, burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler, burulma rijitliğini açıklayan grafikler ve toplam enerji değişimini ortaya koyan grafikler her deney için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

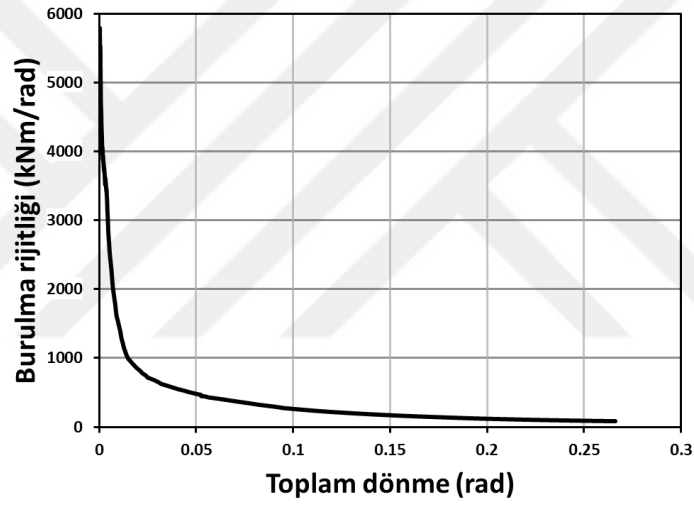
Moment ve toplam dönme arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.115'te yer almaktadır.

Deneylerde okunan maksimum burulma momenti, elemanın dönmesine bölünerek burulma rijitliği hesaplanmış ve Şekil 4.116'da bu değerler sunulmuştur.

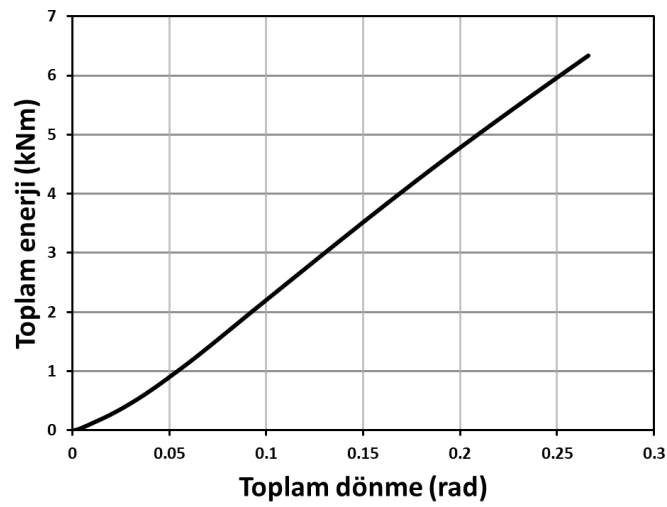
Toplam dönme eğrisinin altındaki alan, tüketilen enerji miktarını belirlemek amacıyla hesaplanmış ve buna dayalı olarak toplam enerji grafiği Şekil 4.117'de sunulmuştur.



Şekil 4.115. BK-N-5-B numunesinin burulma momenti-toplam dönme grafiği



Şekil 4.116. BK-N-5-B numunesinin burulma rijitliği-toplam dönme grafiği



Şekil 4.117. BK-N-5-B numunesinin toplam enerji-toplam dönme grafiği

4.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde, 16 adet betonarme kiriş elemanına ait deney sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Karşılaştırma sürecinde, deneysel çalışmanın amacı göz önünde bulundurulmuş ve elemanlar belirli gruplara ayrılmıştır (Çizelge 4.1). Her grup içindeki numuneler değerlendirilerek analiz edilmiş ve sonuçlar, tüm numuneleri bir arada gösteren genel bir grafikte sunulmuştur. Kıyaslama yapılan deney elemanlarının karşılaştırılmasında ise aşağıda yer alan grafiklerden yararlanılmıştır.

- Moment-Dönme grafiği
- Burulma-Rijitlik grafiği
- Toplam Enerji grafiği

Çizelge 4.1. Deney elemanları karşılaştırılırken kullanılan gruplar

Grup No	Karşılaştırma	Deney elemanları
1	Etriye Aralığının Burulma Davranışına Etkisi	A) BK-D-0-A, BK-D-20-A, BK-D-10-A ve BK-D-5-A
		B) BK-D-0-B, BK-D-20-B, BK-D-10-B ve BK-D-5-B
		C) BK-N-0-A, BK-N-20-A, BK-N-10-A ve BK-N-5-A
		D) BK-N-0-B, BK-N-20-B, BK-N-10-B ve BK-N-5-B
2	Donatı Tipinin Burulma Davranışına Etkisi	A) BK-D-0-A ve BK-N-0-A, B) BK-D-0-B ve BK-N-0-B
		C) BK-D-20-A ve BK-N-20-A, D) BK-D-20-B ve BK-N-20-B
		E) BK-D-10-A ve BK-N-10-A, F) BK-D-10-B ve BK-N-10-B
		G) BK-D-5-A ve BK-N-5-A, H) BK-D-5-B ve BK-N-5-B
3	Boyuna Donatı Adetinin Burulma Davranışına Etkisi	A) BK-D-0-A ve BK-D-0-B, B) BK-N-0-A ve BK-N-0-B
		C) BK-D-20-A ve BK-D-20-B, D) BK-N-20-A ve BK-N-20-B
		E) BK-D-10-A ve BK-D-10-B, F) BK-N-10-A ve BK-N-10-B
		G) BK-D-5-A ve BK-D-5-B, H) BK-N-5-A ve BK-N-5-B

4.2.1. Etriye aralığının burulma davranışına etkisi

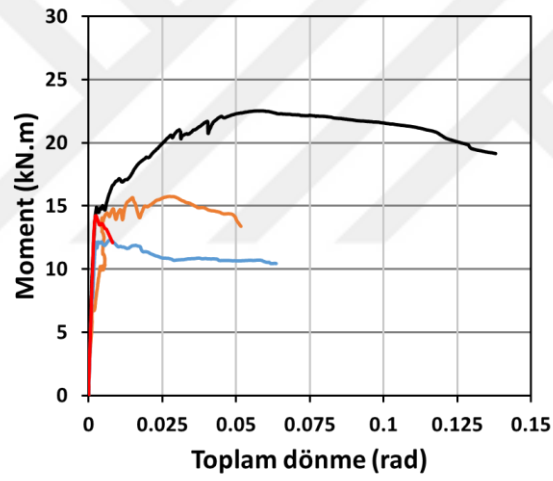
Bu bölümde, etriye aralığındaki değişimin betonarme kirişlerin burulma davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla Çizelge 4.1’de yer alan Grup-1 elemanlarının deney sonuçları incelenmiştir. Aynı özelliklere sahip olup yalnızca etriye aralıkları farklı olan kiriş numuneleri kendi içinde karşılaştırılmıştır.

Grup-1’e ait burulma momenti-dönme grafikleri Şekil 4.118’de verilmiştir. Genel olarak etriye aralığının artışı ile beraber dayanımın azaldığı tespit edilmiştir. Etriye aralığı arttıkça elemanlarda ani burulma momenti kapasitesi düşüşleri olmuştur. Grafikler incelendiğinde burulma momenti kapasitesi en büyük olan numune 26,90 kNm ile BK-N-5-B isimli numunedir. Bu numune maksimum burulma momenti değerinin %15 kapasite kaybı noktasının belirlendiği ana kadar $266,06 \times 10^{-3}$ radyan dönme değerine ulaşmıştır. Dönme değeri en büyük olan numune $279,02 \times 10^{-3}$ radyan ile BK-N-5-A isimli numunedir. Tüm numuneler incelendiğinde etriye aralığının artmasıyla burulma momenti taşıma kapasitesi azalarak beklenen şekilde sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

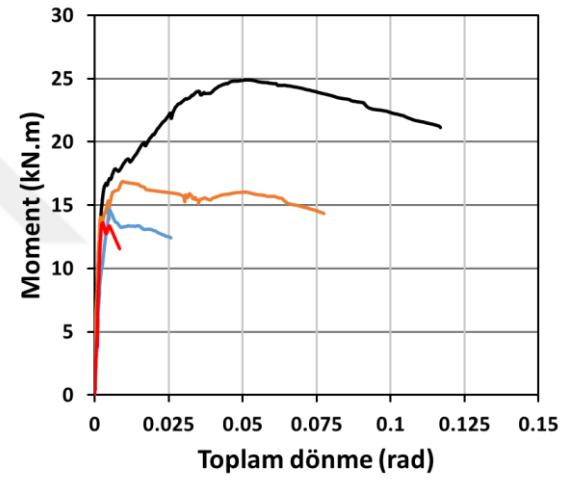
Nervürsüz ve boyuna donatı adeti $2\phi 12$ olan numuneler karşılaştırıldığında BK-D-5-A deney elemanı, BK-D-10-A deney elemanına göre %43,05, BK-D-20-A deney elemanına göre %83,32, BK-D-0-A deney elemanına göre %58,10 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir. Nervürsüz ve boyuna donatı adeti $3\phi 12$ olan numuneler karşılaştırıldığında BK-D-5-B deney elemanı, BK-D-10-B deney elemanına göre %47,45, BK-D-20-B deney elemanına göre %70,24, BK-D-0-B deney elemanına göre %83,01 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir. Nervürlü ve boyuna donatı adeti $2\phi 12$ olan numuneler karşılaştırıldığında BK-N-5-A deney elemanı, BK-N-10-A deney elemanına göre %44,35, BK-N-20-A deney elemanına göre %80,77, BK-N-0-A deney elemanına göre %76,29 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir. Nervürlü ve boyuna donatı adeti $3\phi 12$ olan numuneler karşılaştırıldığında BK-N-5-B deney elemanı, BK-N-10-B deney elemanına göre %49,61, BK-N-20-B deney elemanına göre %101,50, BK-N-0-B deney elemanına göre %88,77 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir. Etriye aralığının azalması ile artan kafeslenme etkisi elemandaki burulma kapasitesini arttırdığı gözlemlenmiştir. Ancak etriyesiz numunede yükleme daha kısa sürede hasar oluşmasına neden olduğundan yükleme hızının artmış olması dayanımın daha fazla olmasına neden olmaktadır.

Grup-1'e ait rijitlik grafikleri Şekil 4.119'da verilmiştir. Tüm numunelerin ilk rijitlik değerleri birbirinden farklıdır. Donatı tipi nervürsüz, boyuna donatı adeti 2 ϕ 12 ve 3 ϕ 12 olan numunelerin ilk rijitlikleri donatı tipi nervürlü, boyuna donatı adeti 2 ϕ 12 ve 3 ϕ 12 olan numunelerle benzer seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. İlk çatlakların meydana gelmesinin ardından, etriyesiz numuneler rijitliklerini büyük oranda kaybetmiştir. Buna karşılık, etriye aralığı daha az olan numunelerde, etriyelerin taşıyıcı sisteme katkıda bulunmaya başlamasıyla rijitlikteki azalma daha sınırlı olmuştur. Burulma kapasitesine ulaşıldıktan sonra ise tüm numunelerin rijitliği benzer seviyeye düşmüştür.

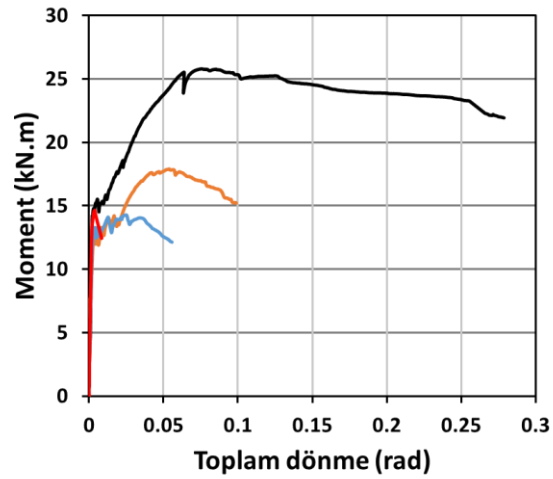
Grup-1'e ait toplam enerji grafikleri Şekil 4.120'de verilmiştir. BK-N-5-B, BK-N-5-A, BK-D-5-B ve BK-D-5-A isimli 5 cm etriye aralığına sahip numuneler en fazla enerji tüketirken, BK-N-0-B, BK-N-0-A, BK-D-0-B ve BK-D-0-A isimli etriyesiz numunelerin enerji tüketimi ise çok azdır. 10 cm etriye aralığına sahip numuneler 20 cm etriye aralığına sahip numunelere göre enerji tüketimi daha fazla olmuştur. Etriye aralığının azalışı toplam enerjiye pozitif yönde katkı sağlamıştır.



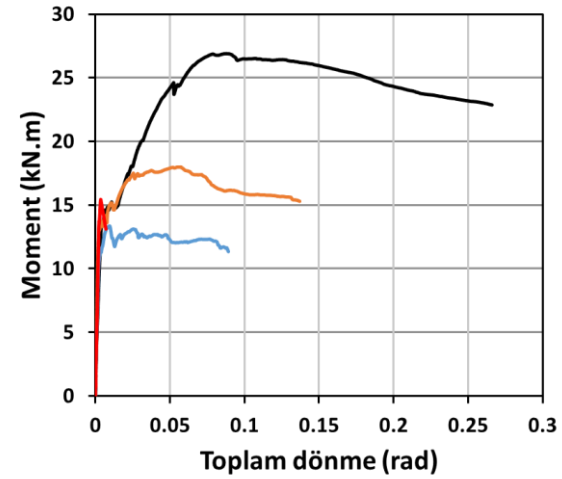
(a)



(b)

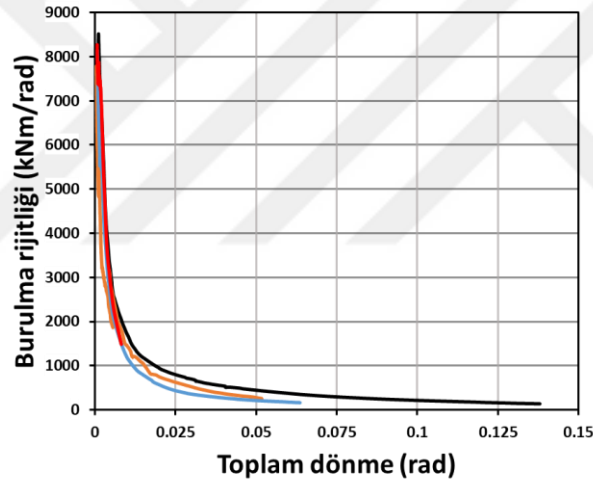


(c)

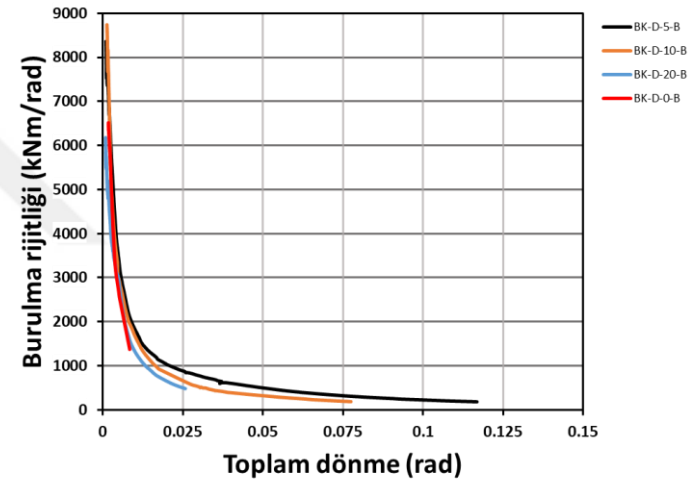


(d)

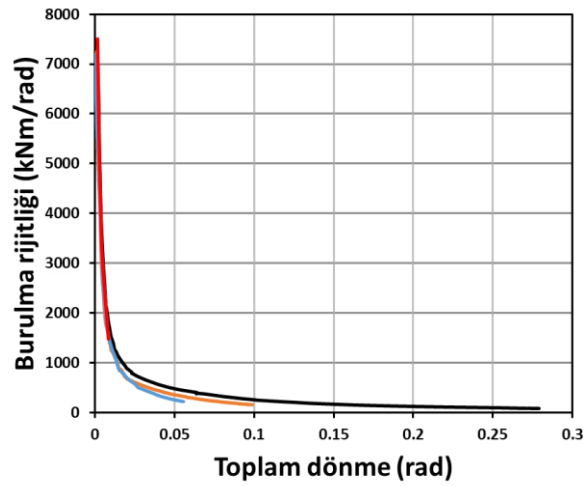
Şekil 4.118. Grup-1 için moment-toplam dönme grafiklerinin karşılaştırılması



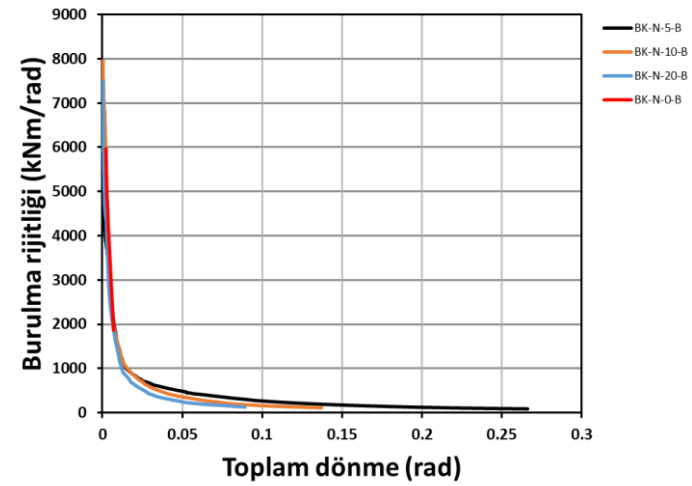
(a)



(b)

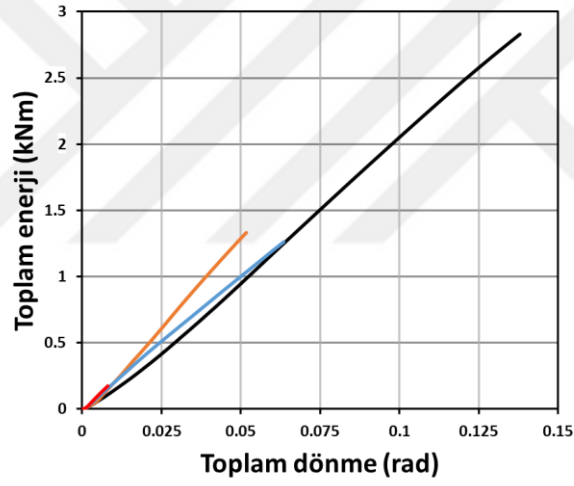


(c)

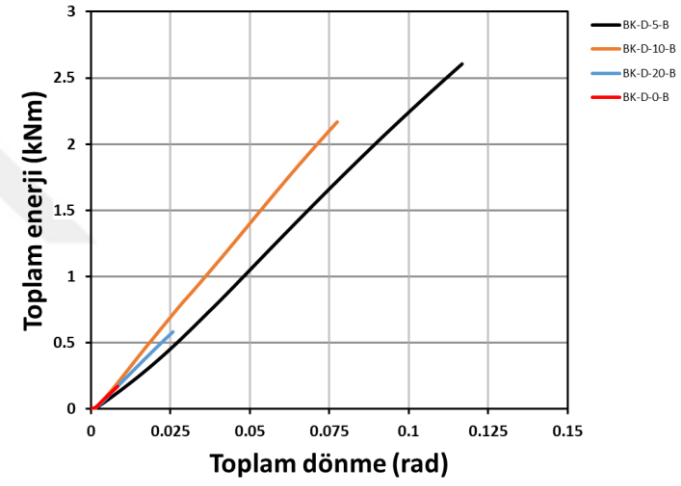


(d)

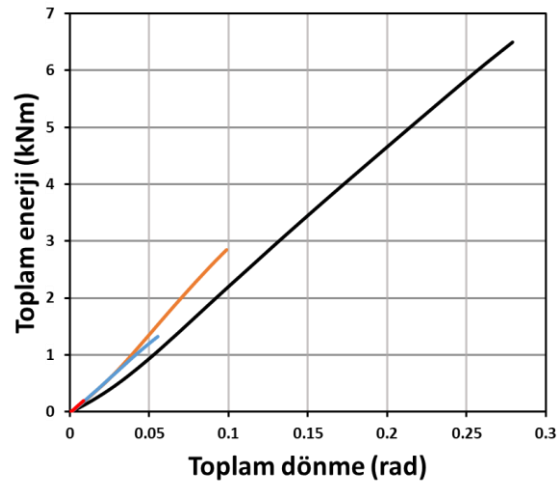
Şekil 4.119. Grup-1 için burulma rijitliği-toplam dönme grafiklerinin karşılaştırılması



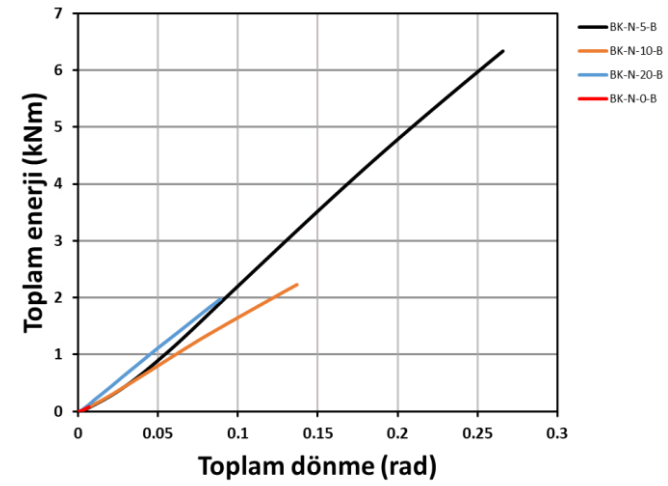
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.120. Grup-1 için toplam enerji-toplam dönme grafiklerinin karşılaştırılması

4.2.2. Donatı tipinin burulma davranışına etkisi

Bu bölümde, donatı tipinin değişimin (nervürlü-nervürsüz) betonarme kirişlerin burulma davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla Çizelge 4.1’de yer alan Grup-2 elemanlarının deney sonuçları incelenmiştir. Aynı özelliklere sahip olup yalnızca donatı tipi farklı olan kiriş numuneleri kendi içinde karşılaştırılmıştır.

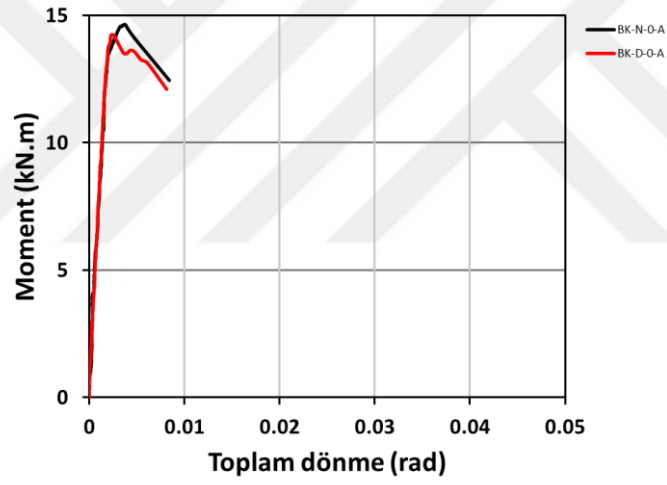
Grup-2’ye ait burulma momenti-dönme grafikleri Şekil 4.121’de verilmiştir. Genel olarak incelendiğinde nervürlü donatı tipine sahip numunelerin nervürsüz donatı tipine sahip numunelere göre, kendi karşılaştırma grafikleri içinde, maksimum burulma kapasitelerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca nervürlü donatı kullanılan numunelerde dönme kapasitesinin de daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Nervürlü donatının hem kapasite hem de süneklik bakımından düz donatıya göre belirgin üstünlük sağladığı tespit edilmiştir. Düz donatılı numuneler daha sınırlı bir enerji tüketimi ve ani kapasite kayıplarıyla karakterize olurken, nervürlü donatılı numuneler daha kontrollü ve sünek bir taşıma davranışı sergilemiştir.

Etriyesiz ve boyuna donatı adeti $2\phi 12$ (A) olan numuneler karşılaştırıldığında BK-N-0-A deney elemanı, BK-D-0-A deney elemanına göre %2,74 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir. Etriyesiz ve boyuna donatı adeti $3\phi 12$ (B) olan numuneler karşılaştırıldığında BK-N-0-B deney elemanı, BK-D-0-B deney elemanına göre %13,46 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir. Etriye aralığı 20 cm olan ve boyuna donatı adeti $2\phi 12$ olan BK-N-20-A deney elemanı, BK-D-20-A deney elemanına göre %21,07 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir. Etriye aralığı 20 cm olan ve boyuna donatı adeti $3\phi 12$ olan BK-D-20-B deney elemanı, BK-N-20-B deney elemanına göre %9,51 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir ve sadece bu karşılaştırmada nervürsüz donatı tipine sahip numunenin nervürlü donatı tipine sahip numuneye göre daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Etriye aralığı 10 cm olan ve boyuna donatı adeti $2\phi 12$ olan BK-N-10-A deney elemanı, BK-D-10-A deney elemanına göre %13,52 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir. Etriye aralığı 10 cm olan ve boyuna donatı adeti $3\phi 12$ olan BK-N-10-B deney elemanı, BK-D-10-B deney elemanına göre %6,52 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir. Etriye aralığı 5 cm olan ve boyuna donatı adeti $2\phi 12$ olan BK-N-5-A deney elemanı, BK-D-5-A deney elemanına göre %14,56 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir. Etriye aralığı 5 cm olan ve boyuna donatı adeti $3\phi 12$ olan

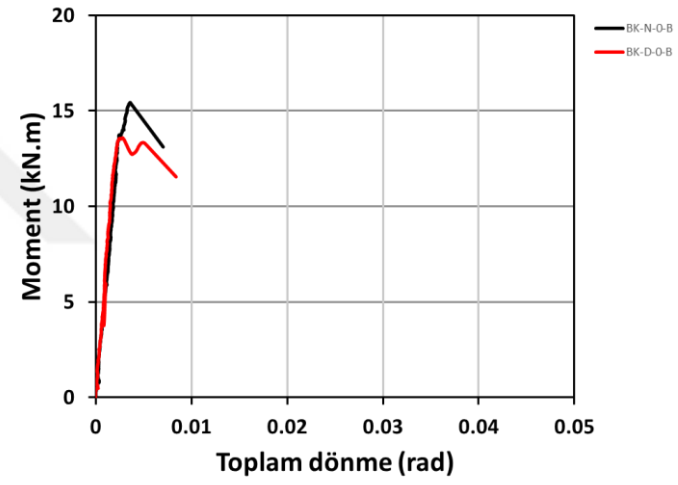
BK-N-5-B deney elamanı, BK-D-5-B deney elemanına göre %8,08 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir.

Grup-2'ye ait rijitlik grafikleri Şekil 4.122'de verilmiştir. Tüm numunelerin ilk rijitlik değerleri birbirinden farklıdır. Toplamda 8 adet olan karşılaştırma grafikleri incelendiğinde donatı tipi nervürlü ve nervürsüz olan numunelerin başlangıç rijitlik değerlerinin yakın seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Nervürlü donatı tipine sahip numuneler ile nervürsüz donatı tipine sahip numuneler ilk çatlakların meydana gelmesinin ardından rijitliklerini aynı oranda kaybetmişlerdir. Burulma kapasitesine ulaşıldıktan sonra ise tüm numunelerin rijitliği benzer seviyeye düşmüştür.

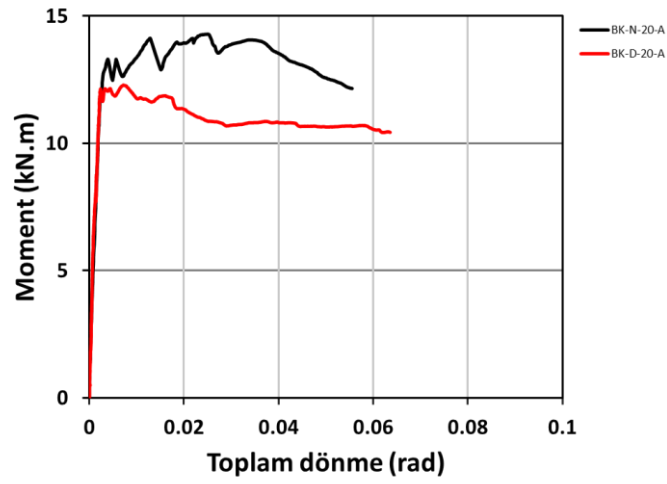
Grup-2'ye ait toplam enerji grafikleri Şekil 4.123'te verilmiştir. Nervürlü donatı tipine sahip numunelerin, nervürsüz donatı tipine sahip numunelere göre genel olarak daha fazla enerji tükettikleri tespit edilmiştir. Sadece BK-D-0-B deney elemanı BK-N-0-B deney elamanına göre daha fazla enerji tükettiği tespit edilmiştir. Nervürlü donatıların nervürsüz donatılarına göre enerji tüketimine katkısının daha fazla olduğu tespit edilmiştir



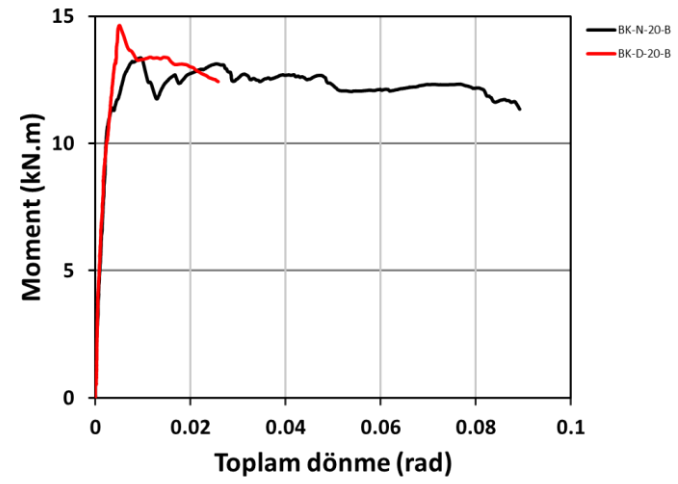
(a)



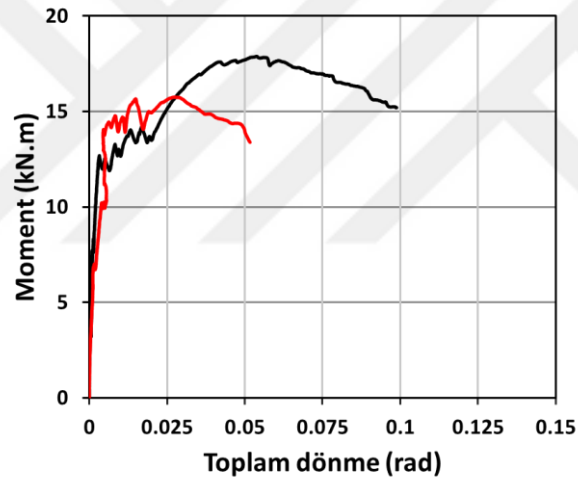
(b)



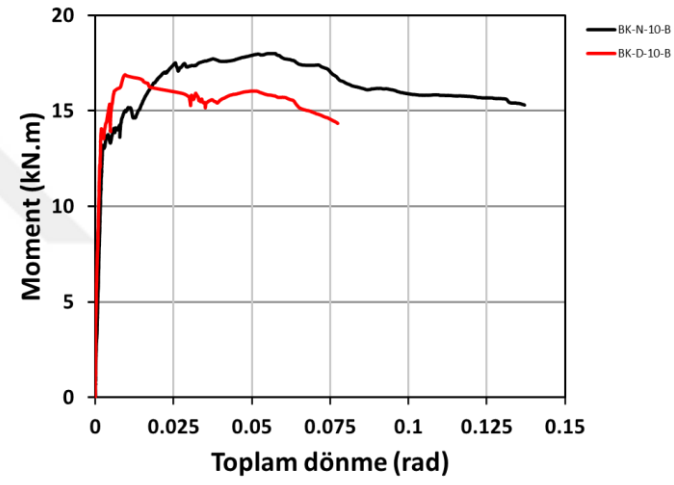
(c)



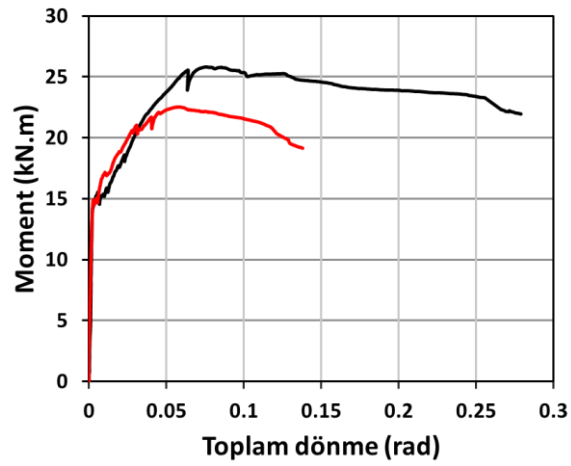
(d)



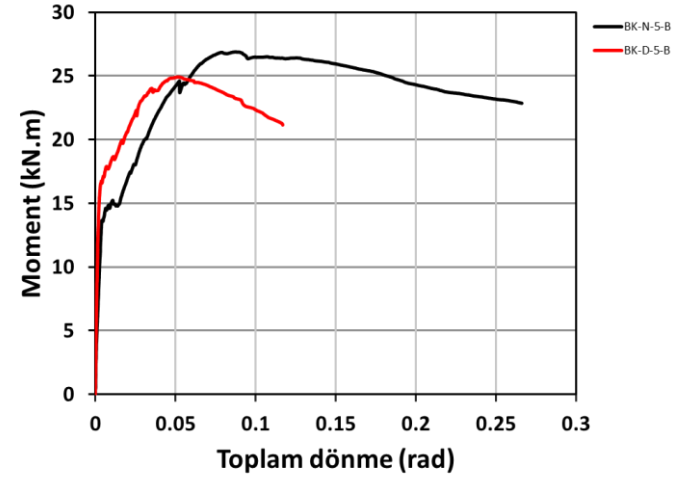
(e)



(f)

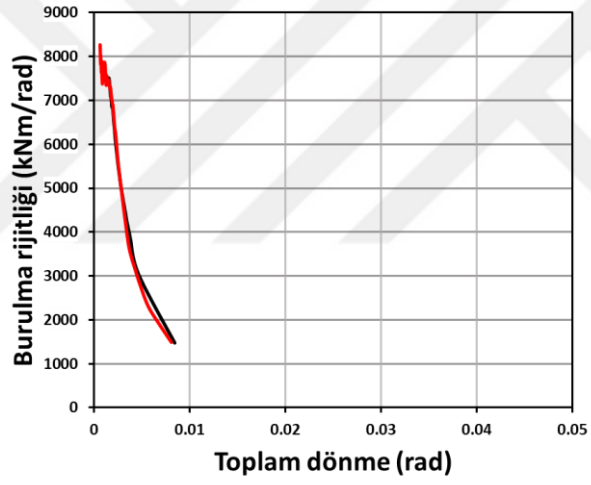


(g)

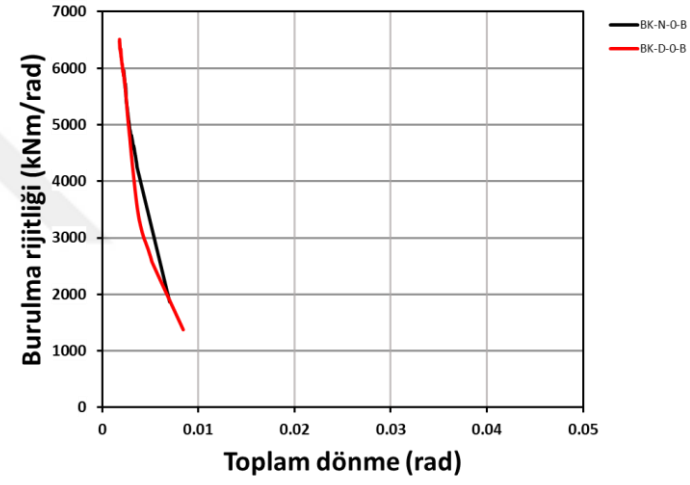


(h)

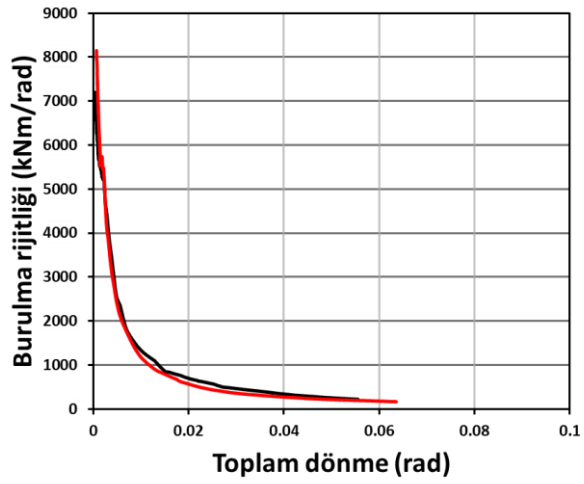
Şekil 4.121. Grup-2 için moment-toplam dönme grafiklerinin karşılaştırılması



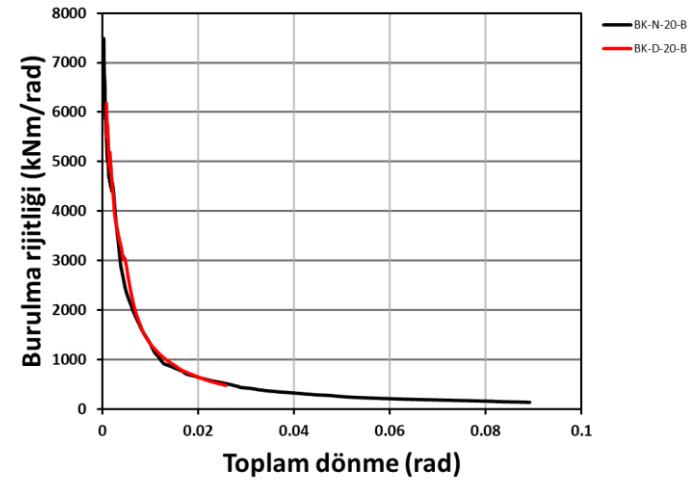
(a)



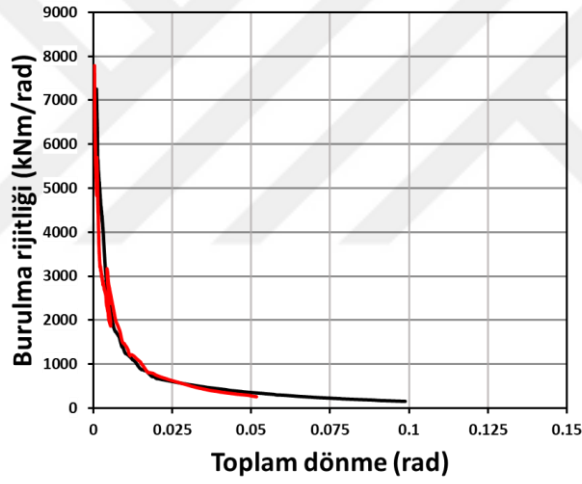
(b)



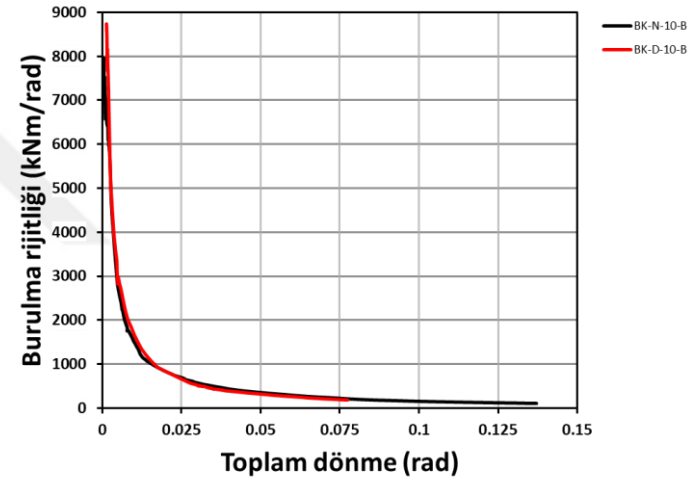
(c)



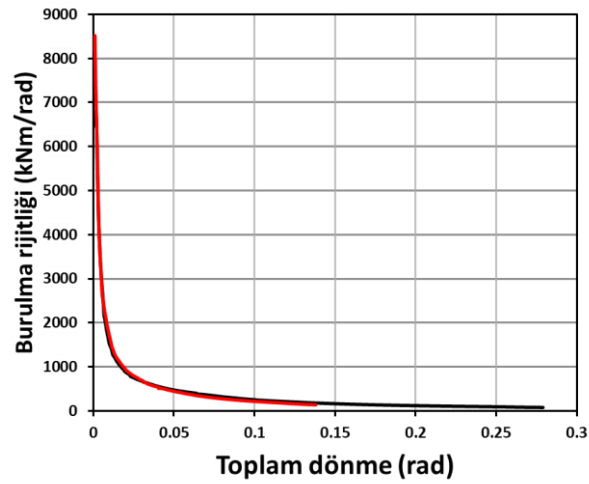
(d)



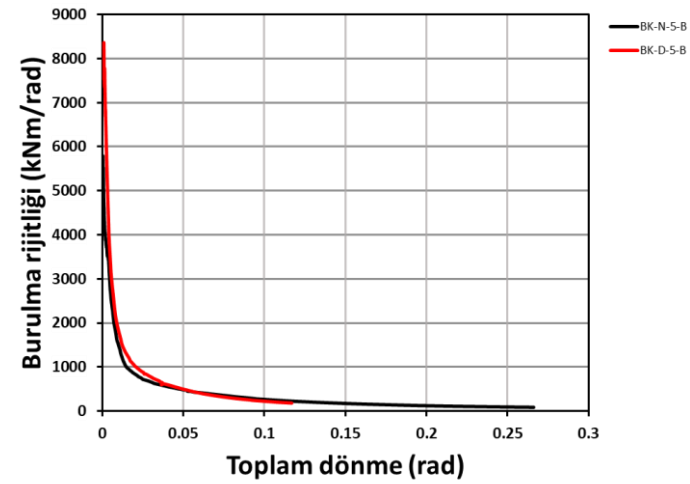
(e)



(f)

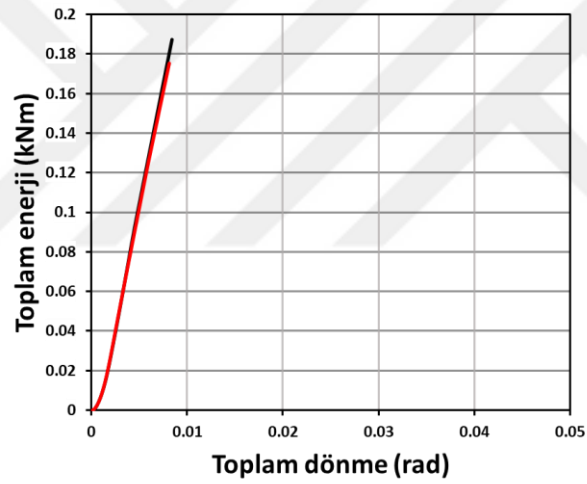


(g)

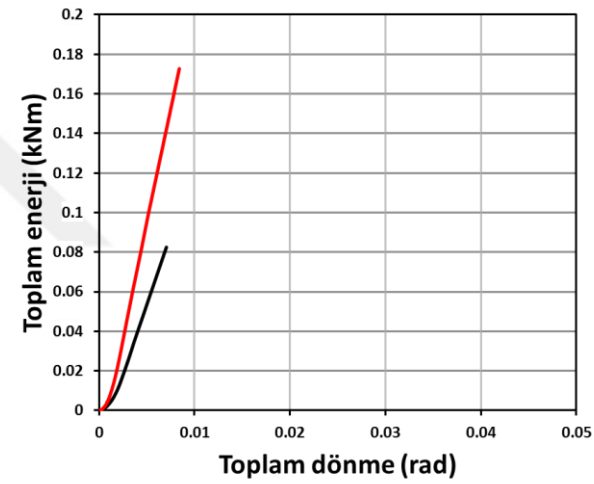


(h)

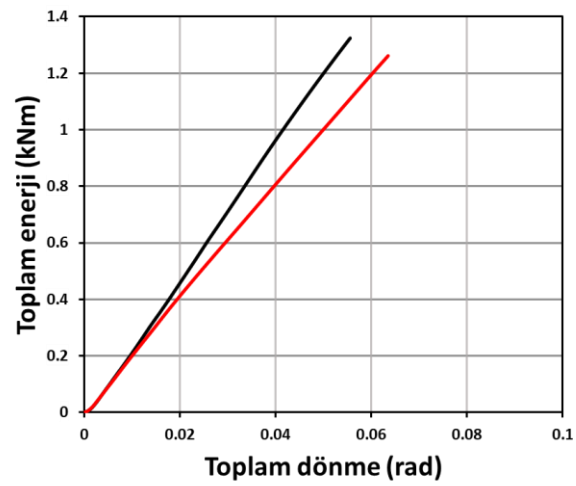
Şekil 4.122. Grup-2 için burulma rijitliği-toplam dönme grafiklerinin karşılaştırılması



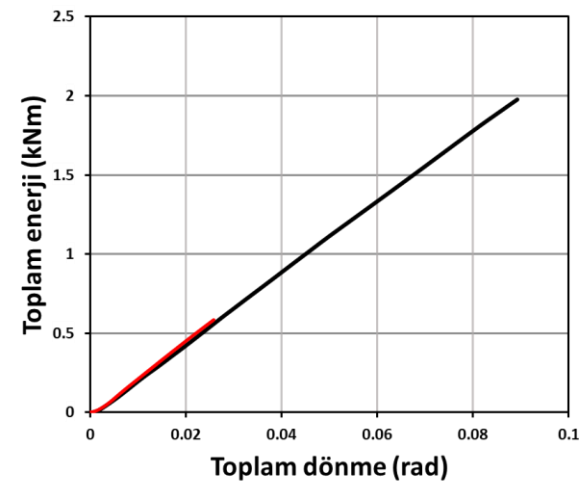
(a)



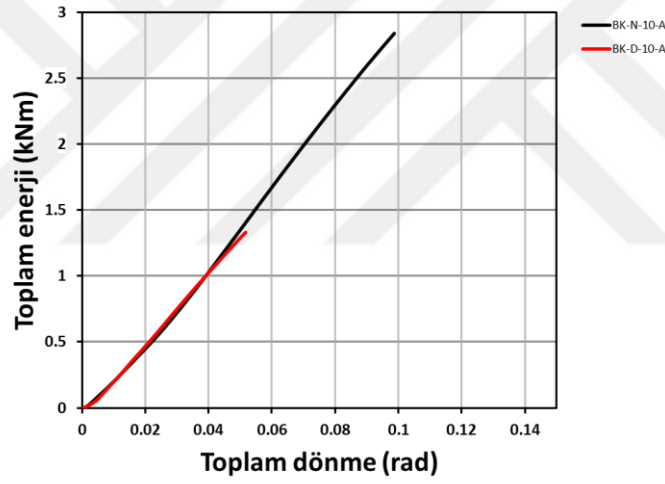
(b)



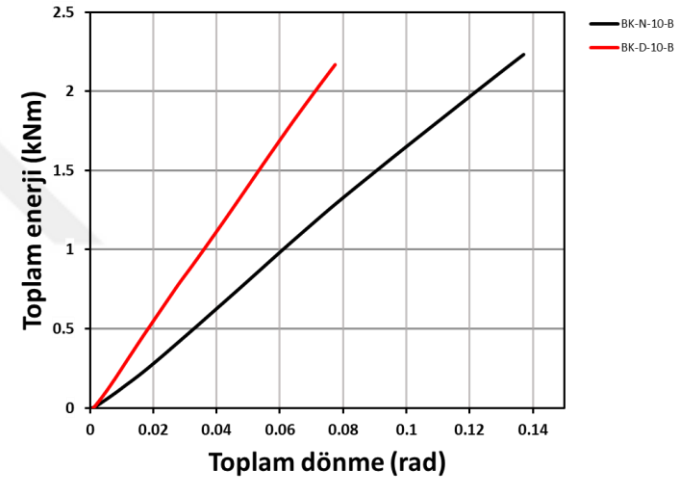
(c)



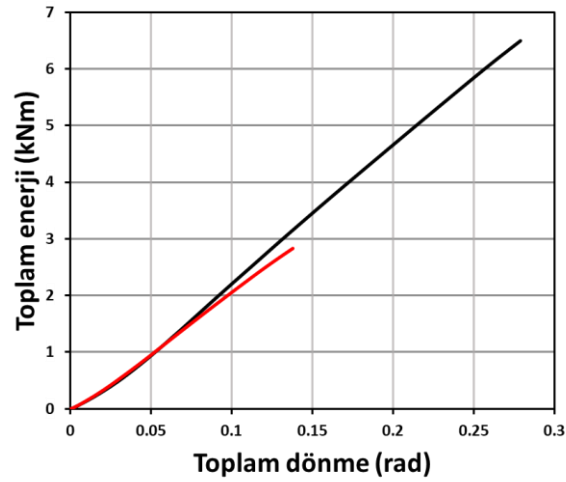
(d)



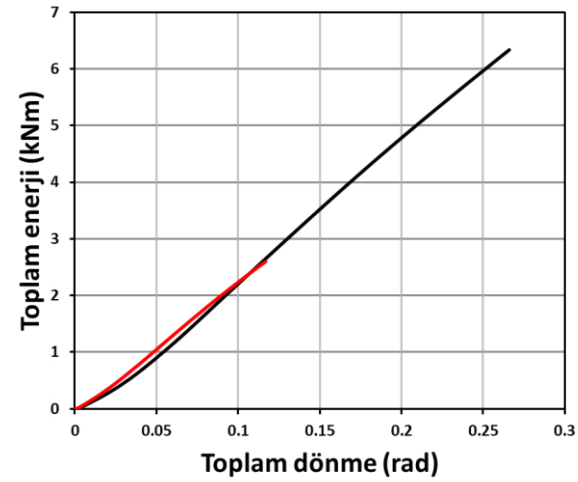
(e)



(f)



(g)



(h)

Şekil 4.123. Grup-2 için toplam enerji-toplam dönme grafiklerinin karşılaştırılması

4.2.3. Boyuna donatı adedinin burulma davranışına etkisi

Bu bölümde, boyuna donatı adedinin ($2\phi 12$ - $3\phi 12$) betonarme kirişlerin burulma davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla Çizelge 4.1’de yer alan Grup-3 elemanlarının deney sonuçları incelenmiştir. Aynı özelliklere sahip olup yalnızca boyuna donatı adedi olan kiriş numuneleri kendi içinde karşılaştırılmıştır.

Grup-3’e ait burulma momenti-dönme grafikleri Şekil 4.124’te verilmiştir. Etriyesiz ve etriye aralığı 20 cm olan numunelerde, $2\phi 12$ (A) donatı adedi ve çapına sahip numunelerin $3\phi 12$ (B) donatı adedi ve çapına sahip numunelere göre maksimum burulma kapasitelerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Etriye aralığı 5 cm ve 10 cm olan numunelerde, $3\phi 12$ (B) donatı adedi ve çapına sahip numunelerin $2\phi 12$ (A) donatı adedi ve çapına sahip numunelere göre maksimum burulma kapasitelerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Etriye aralığı 5 cm olan numuneler için yapılan incelemelerde, maksimum burulma momentinin %15 kapasite kaybı noktasına kadar olan süreçte, $2\phi 12$ donatı çapı ve adetine sahip (A) numunelerin, $3\phi 12$ donatı çapı ve adetine sahip (B) numunelere kıyasla daha yüksek dönme kapasitesi sergilediği belirlenmiştir. Etriye aralığı 10 cm olan numuneler için yapılan incelemelerde, maksimum burulma momentinin %15 kapasite kaybı noktasına kadar olan süreçte, $3\phi 12$ donatı çapı ve adetine sahip (B) numunelerin, $2\phi 12$ donatı çapı ve adetine sahip (A) numunelere kıyasla daha yüksek dönme kapasitesi sergilediği belirlenmiştir. Etriye aralığı 20 cm olan numuneler için yapılan incelemelerde, nervürsüz donatıya sahip numunelerde maksimum burulma kapasitesinin, $3\phi 12$ donatı çapı ve adetine sahip (B) numunelerin, $2\phi 12$ donatı çapı ve adetine sahip (A) numunelere kıyasla daha yüksek olduğu; ancak maksimum burulma momentinin %15 kapasite kaybı noktasına kadar olan süreçte, $2\phi 12$ donatı çapı ve adetine sahip (A) numunelerin, $3\phi 12$ donatı çapı ve adetine sahip (B) numunelere kıyasla daha yüksek dönme kapasitesi sergilediği belirlenmiştir. Etriye aralığı 20 cm olan nervürlü donatıya sahip numunelerde ise maksimum burulma kapasitesinin, $2\phi 12$ donatı çapı ve adetine sahip (A) numunelerin, $3\phi 12$ donatı çapı ve adetine sahip (B) numunelere kıyasla daha yüksek olduğu; ancak maksimum burulma momentinin %15 kapasite kaybı noktasına kadar olan süreçte, $3\phi 12$ donatı çapı ve adetine sahip (B) numunelerin, $2\phi 12$ donatı çapı ve adetine sahip (A) numunelere kıyasla daha yüksek dönme kapasitesi sergilediği tespit edilmiştir. Etriyesiz numuneler incelendiğinde, $2\phi 12$ (A) donatı adedi ve çapına sahip numunelerin, $3\phi 12$ (B) donatı adedi ve çapına sahip numunelere kıyasla

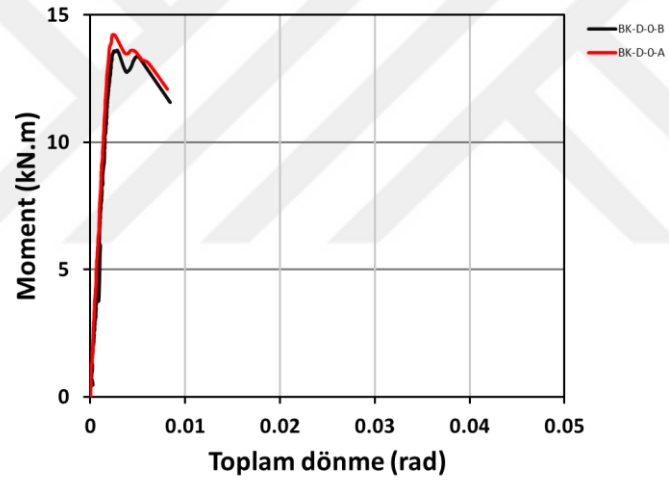
maksimum burulma kapasitelerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ancak, maksimum burulma momentinin %15 kapasite kaybı noktasına kadar olan süreçte, 3 ϕ 12 (B) donatıya sahip numunelerin, 2 ϕ 12 (A) donatıya sahip numunelere kıyasla daha yüksek dönme kapasitesi sergilediği belirlenmiştir.

Nervürsüz ve etriyesiz olan numuneler karşılaştırıldığında BK-D-0-A deney elemanı, BK-D-0-B deney elemanına göre %4,78 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir. Nervürlü ve etriyesiz olan numuneler karşılaştırıldığında BK-N-0-B deney elemanı, BK-N-0-A deney elemanına göre %5,40 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir. Nervürsüz ve 20 cm etriye aralığına sahip olan numuneler karşılaştırıldığında BK-D-20-B deney elemanı, BK-D-20-A deney elemanına göre %18,96 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir. Nervürlü ve 20 cm etriye aralığına sahip olan numuneler karşılaştırıldığında BK-N-20-A deney elemanı, BK-N-20-B deney elemanına göre %11,46 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir. Nervürsüz ve 10 cm etriye aralığına sahip olan numuneler karşılaştırıldığında BK-D-10-B deney elemanı, BK-D-10-A deney elemanına göre %7,18 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir. Nervürlü ve 10 cm etriye aralığına sahip olan numuneler karşılaştırıldığında BK-N-10-A deney elemanı, BK-N-10-B deney elemanına göre %11,46 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir. Nervürsüz ve 5 cm etriye aralığına sahip olan numuneler karşılaştırıldığında BK-D-5-B deney elemanı, BK-D-5-A deney elemanına göre %10,48 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir. Nervürlü ve 5 cm etriye aralığına sahip olan numuneler karşılaştırıldığında BK-N-5-B deney elemanı, BK-N-5-A deney elemanına göre %4,22 daha fazla burulma momenti taşıma kapasitesine sahiptir.

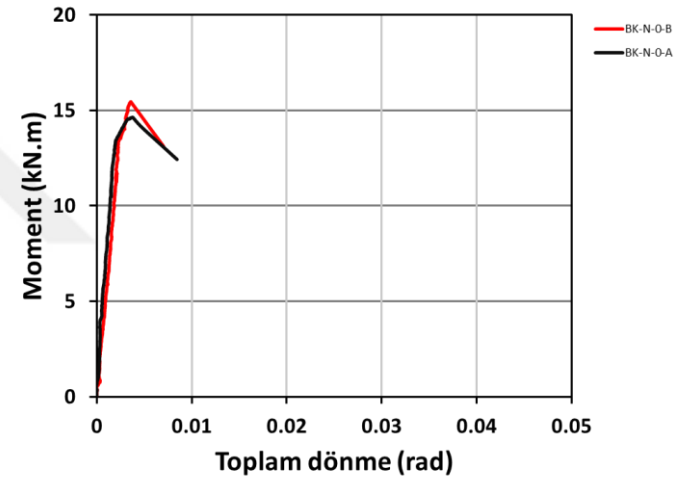
Grup-3'e ait rijitlik grafikleri Şekil 4.125'te verilmiştir. Tüm karşılaştırma yapılan numunelerin ilk rijitlik değerleri BK-D-5-B ve BK-D-5-A deney elemanları hariç birbirinden farklıdır. Toplamda 8 adet olan karşılaştırma grafikleri incelendiğinde boyuna donatı adeti 2 ϕ 12 (A) boyuna donatı adetine sahip numunelerin ve 3 ϕ 12 (B) boyuna donatı adetine sahip numunelerin ilk rijitlik değerlerinin değişken durum gösterdiği tespit edilmiştir. BK-N-5-A deney elemanı, BK-N-5-B deney elemanına göre %17,24 daha yüksek ilk rijitlik değerine sahiptir. BK-N-10-B deney elemanı, BK-N-10-A deney elemanına göre %11,11 daha yüksek ilk rijitlik değerine sahiptir. BK-D-10-B deney elemanı, BK-D-10-A deney elemanına göre %10,13 daha yüksek ilk rijitlik değerine sahiptir. BK-N-20-B deney elemanı, BK-N-20-A deney elemanına göre ilk rijitlik değerinin %5,13 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. BK-D-20-A deney elemanı, BK-

D-20-B deney elemanına göre ilk rijitlik değerinin %30,65 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. BK-N-0-A deney elemanı, BK-N-0-B deney elemanına göre ilk rijitlik değerinin %25,00 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. BK-D-0-A deney elemanı, BK-D-0-B deney elemanına göre ilk rijitlik değerinin %25,76 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, etriye aralığının artmasıyla birlikte boyuna donatı adetinin rijitlik üzerindeki etkisinin değişebileceğini göstermektedir. İlk çatlak oluşumundan sonra, tüm numunelerde rijitlik kaybı benzer oranlarda gerçekleşmiştir. Burulma kapasitesine ulaşıldığında ise, 2 ϕ 12 (A) ve 3 ϕ 12 (B) donatılı numunelerin rijitlik değerleri birbirine yakın seviyelere düşmüştür. Bu da yüksek deformasyon seviyelerinde boyuna donatı adetinin rijitlik davranışı üzerindeki etkisinin azaldığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, 3 ϕ 12 (B) boyuna donatı adetine sahip numunelerin, 2 ϕ 12 (A) donatılı numunelere kıyasla genel olarak daha yüksek ilk rijitlik değerleri sergilediği, ancak bu farkın yüksek deformasyon seviyelerinde belirgin olmadığı tespit edilmiştir.

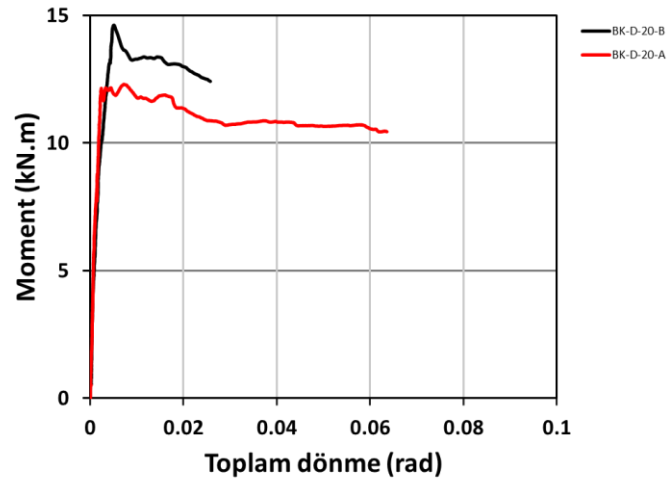
Grup-3'e ait toplam enerji grafikleri Şekil 4.126'da verilmiştir. 2 ϕ 12 (A) ve 3 ϕ 12 (B) donatılı numunelerin genel olarak enerji tüketimleri açısından birbirinden üstünlükleri yoktur. 5 cm etriye aralığına sahip numunelerde, 2 ϕ 12 (A) donatı adetine sahip numuneler 3 ϕ 12 (B) donatı adetine sahip numunelere göre daha fazla enerji tüketmişlerdir. 10 cm etriye aralığına sahip numunelerde ise, 3 ϕ 12 (B) donatı adetine sahip numuneler 2 ϕ 12 (A) donatı adetine sahip numunelere göre daha fazla enerji tüketmişlerdir. 20 cm etriye aralığına sahip nervürsüz numunelerde 2 ϕ 12 (A) donatı adetine sahip numuneler 3 ϕ 12 (B) donatı adetine sahip numunelere göre daha fazla enerji tüketmişlerdir. 20 cm etriye aralığına sahip nervürlü numunelerde 3 ϕ 12 (B) donatı adetine sahip numuneler 2 ϕ 12 (A) donatı adetine sahip numunelere göre daha fazla enerji tüketmişlerdir. Etriyesiz numunelerde 2 ϕ 12 (A) donatı adetine sahip numuneler 3 ϕ 12 (B) donatı adetine sahip numunelere göre daha fazla enerji tüketmişlerdir. Bu sonuçlar ışığında boyuna donatı adetinin enerji tüketiminde değişken sonuçlar gösterdiği ve tek başına bir parametre olarak etki etmediğine ulaşılmıştır.



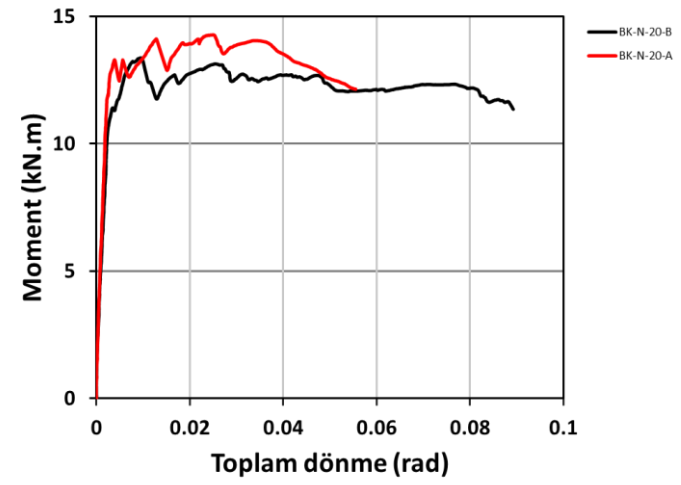
(a)



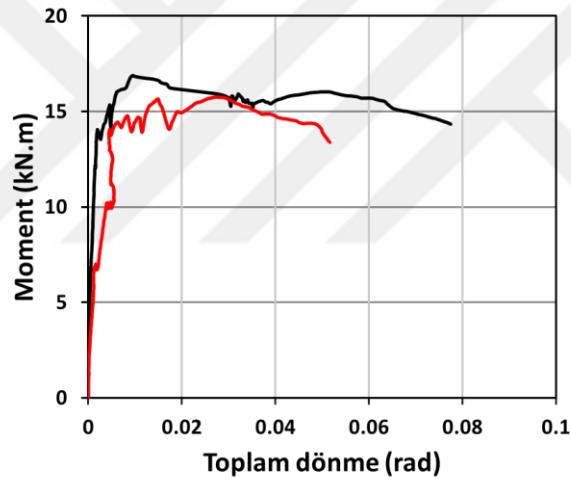
(b)



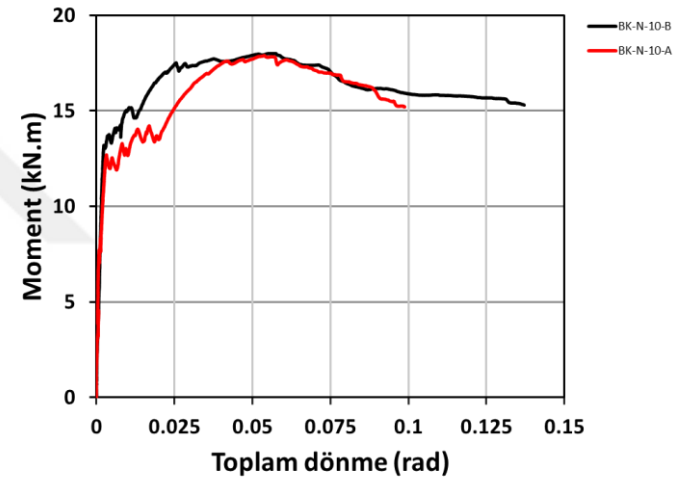
(c)



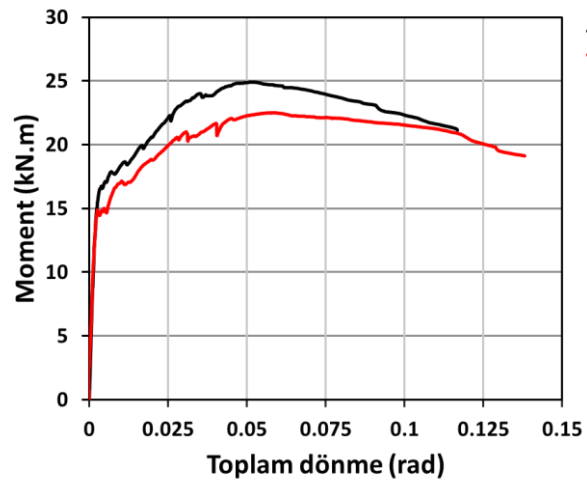
(d)



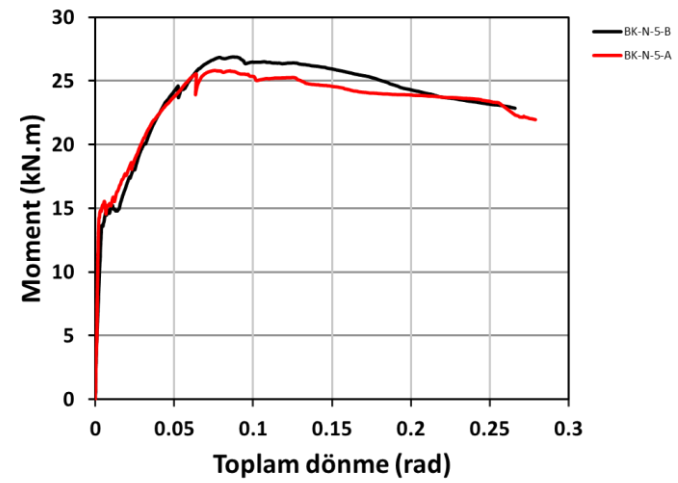
(e)



(f)

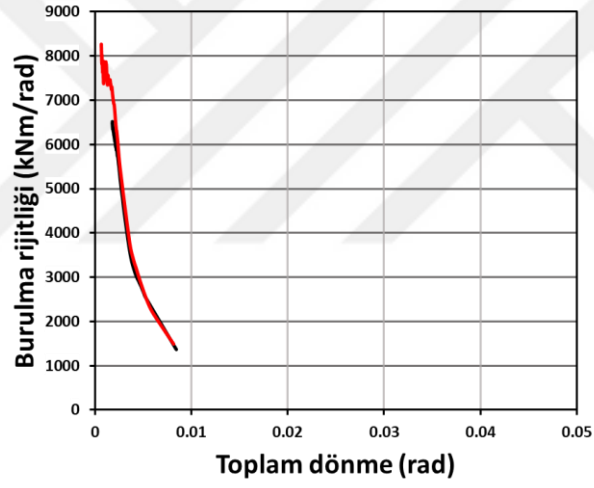


(g)

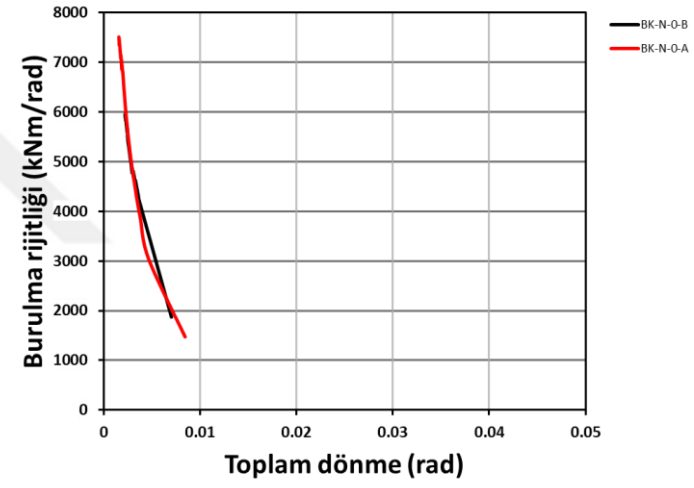


(h)

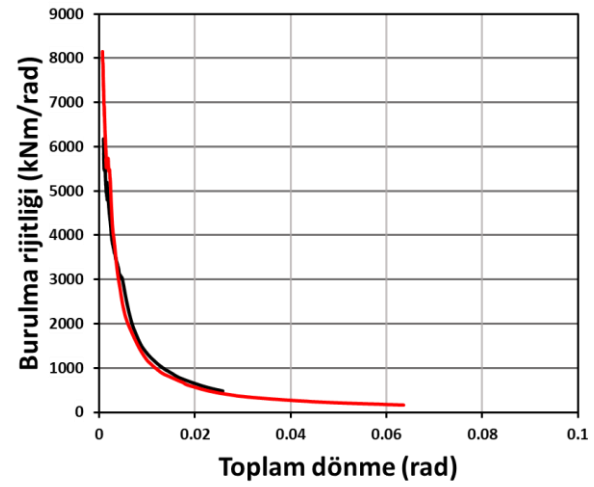
Şekil 4.124. Grup-3 için burulma momenti-toplam dönme grafiklerinin karşılaştırılması



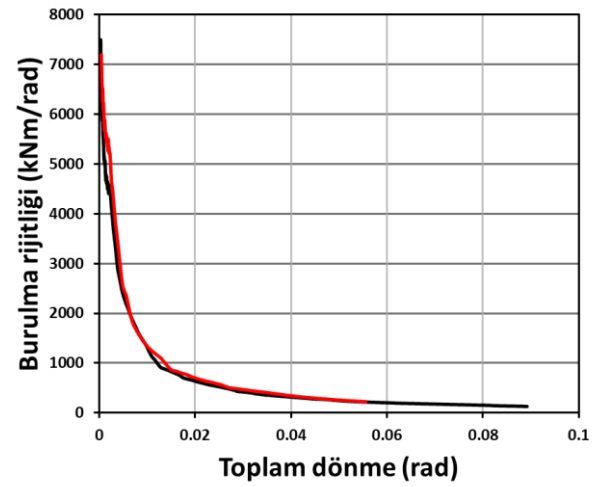
(a)



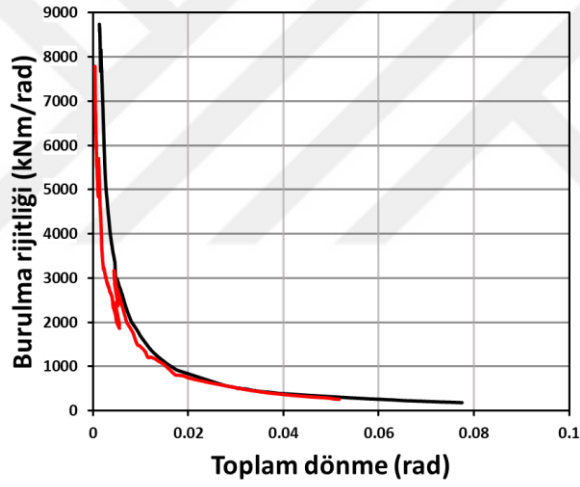
(b)



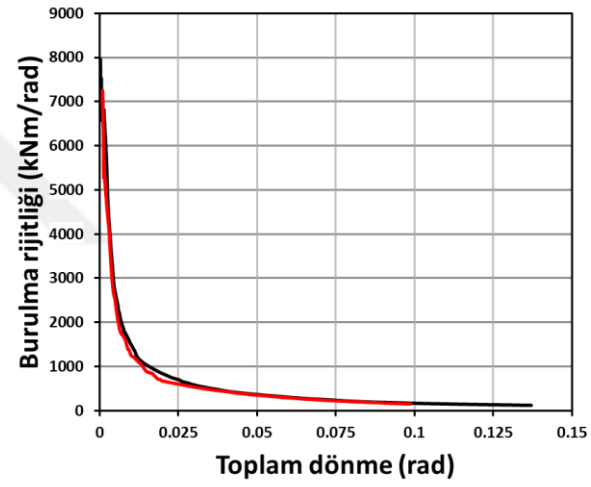
(c)



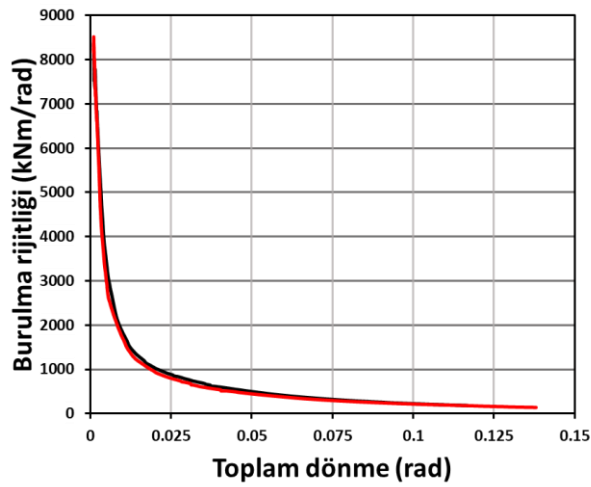
(d)



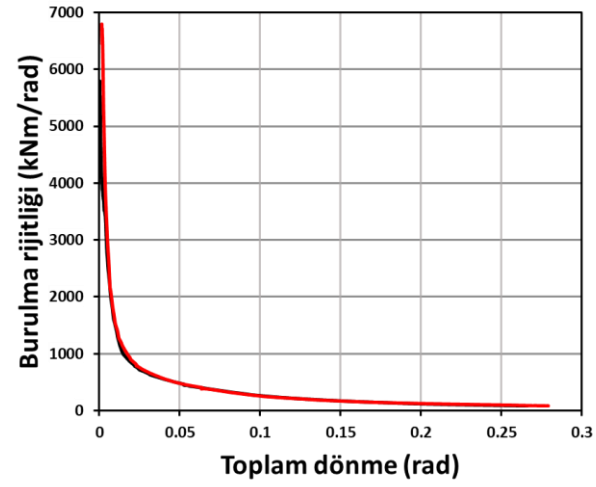
(e)



(f)

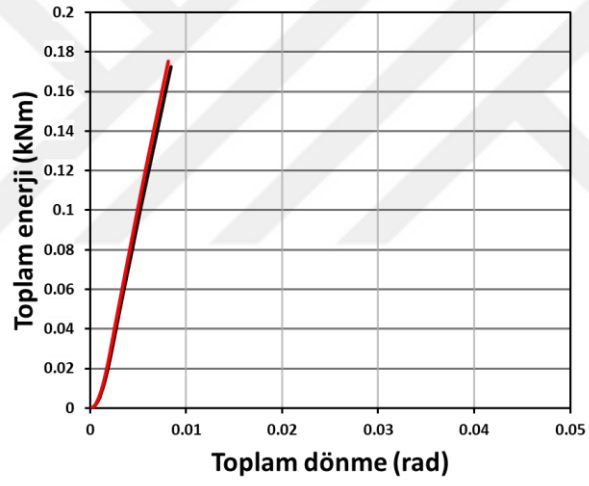


(g)

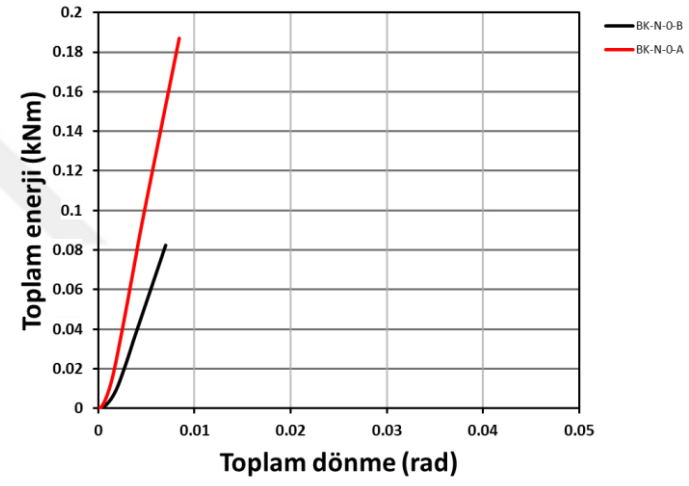


(h)

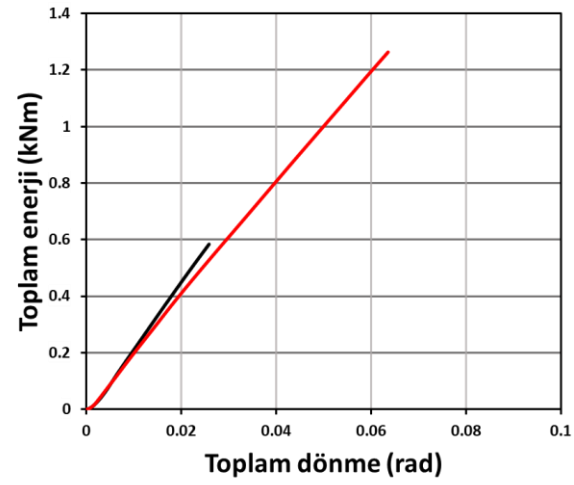
Şekil 4.125. Grup-3 için burulma rijitliği-toplam dönme grafiklerinin karşılaştırılması



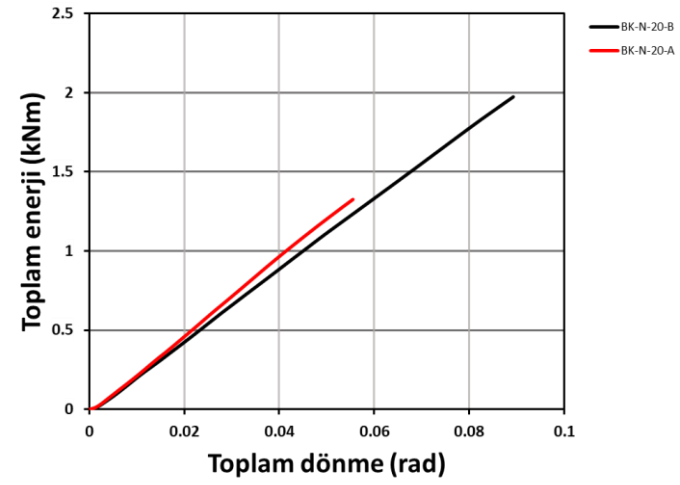
(a)



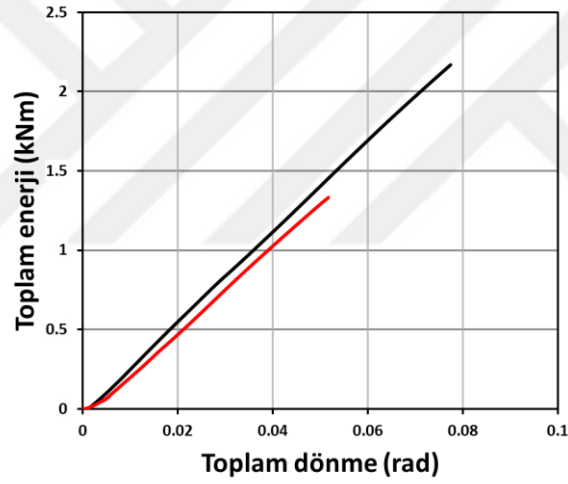
(b)



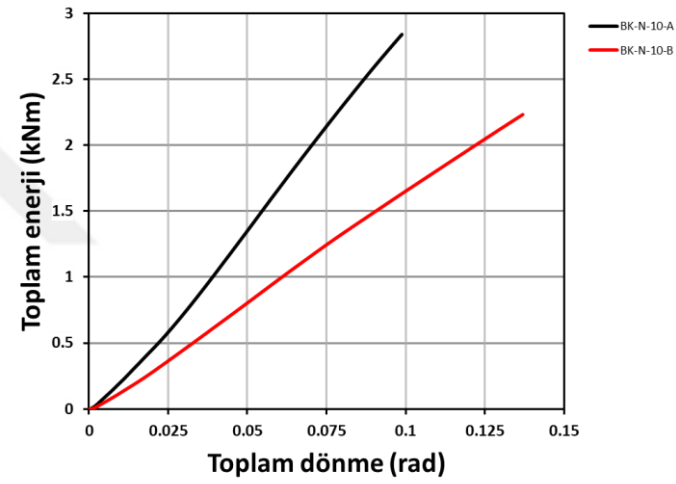
(c)



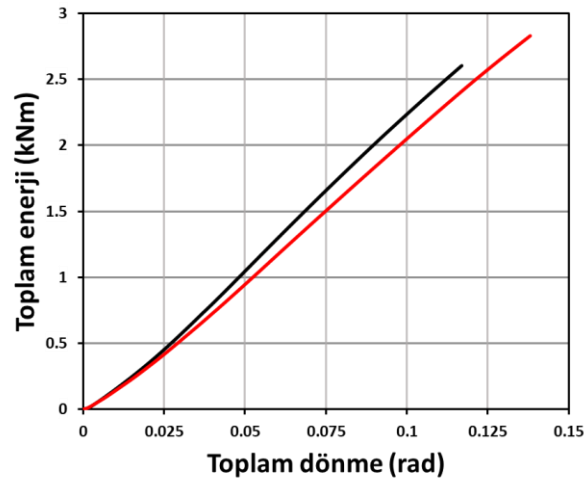
(d)



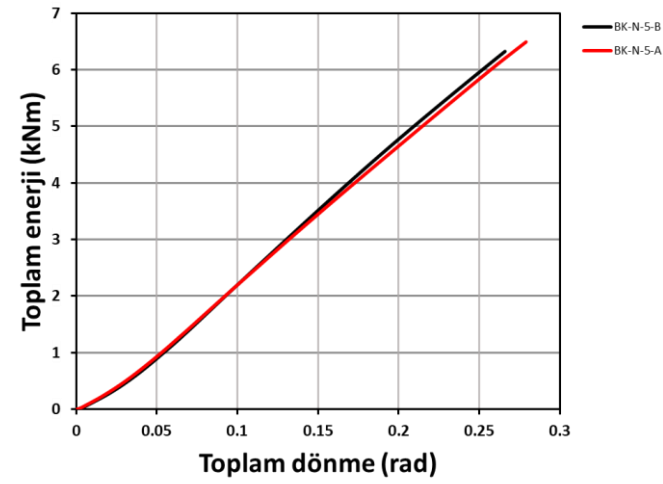
(e)



(f)



(g)



(h)

Şekil 4.126. Grup-3 için toplam enerji-toplam dönme grafiklerinin karşılaştırılması

4.2.3. Tüm verilerin karşılaştırılması

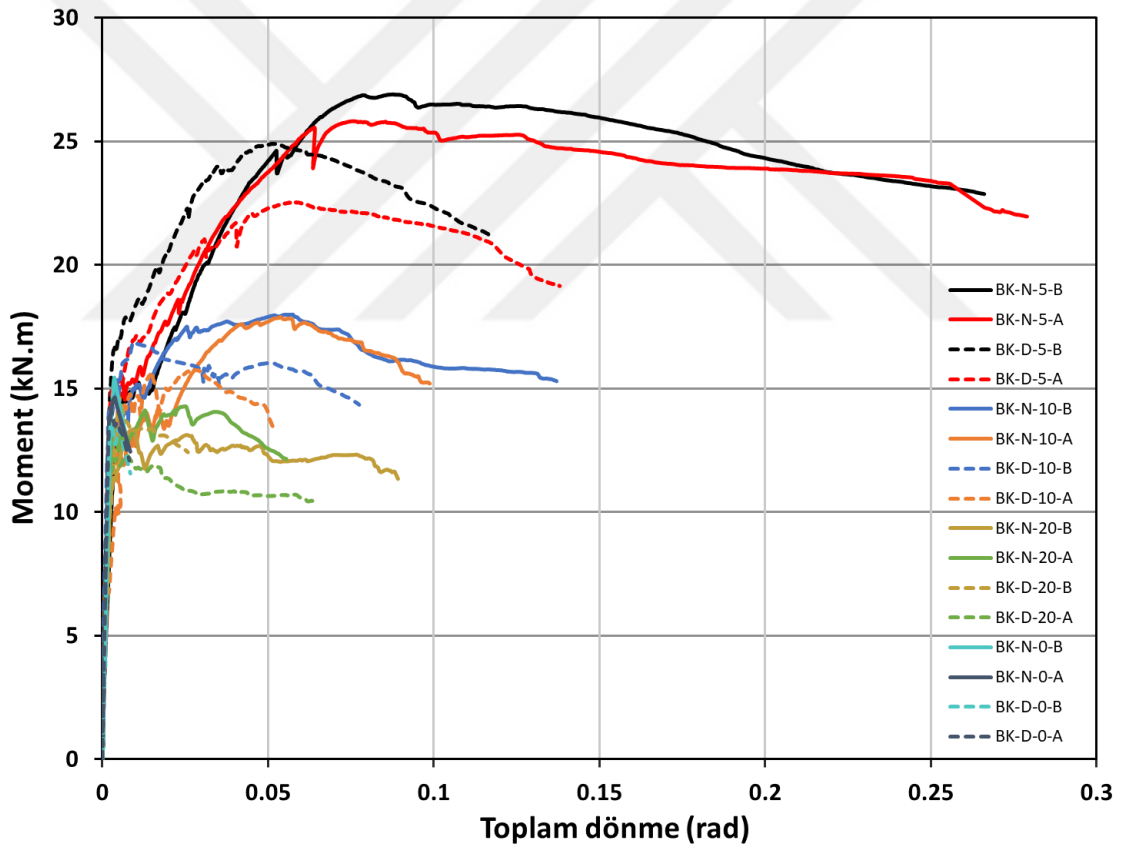
Deneysel çalışma kapsamında test edilen tüm numunelere ait burulma momenti–dönme grafiği Şekil 4.127’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, en yüksek burulma momenti kapasitesine 26,90 kNm ile BK-N-5-B numunesinin sahip olduğu görülmektedir. Bu numune, maksimum burulma momentinin %15 kapasite kaybı noktasına kadar olan süreçte $266,06 \times 10^{-3}$ radyan dönme değerine ulaşmıştır. Dönme kapasitesi en yüksek olan numune ise $279,02 \times 10^{-3}$ radyan ile BK-N-5-A’dır. Genel olarak, nervürlü donatı kullanılan numuneler, nervürsüz donatılı numunelere kıyasla hem daha yüksek burulma momenti kapasitesi hem de daha fazla dönme kapasitesi sergilemiştir. Etriye aralığı 5 cm ve 10 cm olan numunelerde 3 ϕ 12 donatılı olanlar daha yüksek burulma kapasitesi göstermiştir. Buna karşılık, etriyesiz numunelerde 2 ϕ 12 donatılı numuneler daha iyi performans sergilemiştir. Ancak 20 cm etriye aralığına sahip numunelerde, nervürsüz donatılı olanlarda 3 ϕ 12, nervürlü donatılı olanlarda ise 2 ϕ 12 donatılı numunelerin daha yüksek burulma kapasitesine ulaştığı belirlenmiştir. Dönme kapasitesi açısından değerlendirildiğinde, etriyesiz ve 5 cm etriye aralığına sahip numunelerde 2 ϕ 12 donatılı numuneler; 10 cm etriye aralığında 3 ϕ 12 donatılı numuneler; 20 cm etriye aralığına sahip nervürsüz numunelerde 3 ϕ 12 donatılı numuneler; nervürlü numunelerde ise 2 ϕ 12 donatılı numuneler daha yüksek dönme kapasitesi sergilemiştir.

Burulma rijitliği–dönme grafiği Şekil 4.128’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde ilk rijitlik değeri en büyük olan numenin BK-N-10-N olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak incelendiğinde BK-D-10-A, BK-D-5-A, BK-D-0-A, BK-D-5-B, BK-D-20-A ve BK-D-10-B isimli numunelerin başlangıç rijitlikleri diğerlerinden fazladır. Nervürsüz numunelerin ilk rijitlik değerlerinin, genel olarak nervürlü numunelere kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. İlk çatlakların oluşumunun ardından, etriyesiz numunelerde kesit rijitliğinde belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Buna karşın, etriye aralığı daha sık olan numunelerde, enine donatının etkisiyle rijitlik kaybı daha kontrollü bir şekilde gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, burulma kapasitesine ulaşıldığında tüm numunelerde rijitlik benzer seviyelere inmiş ve yapısal davranışlar birbirine yakınlaşmıştır.

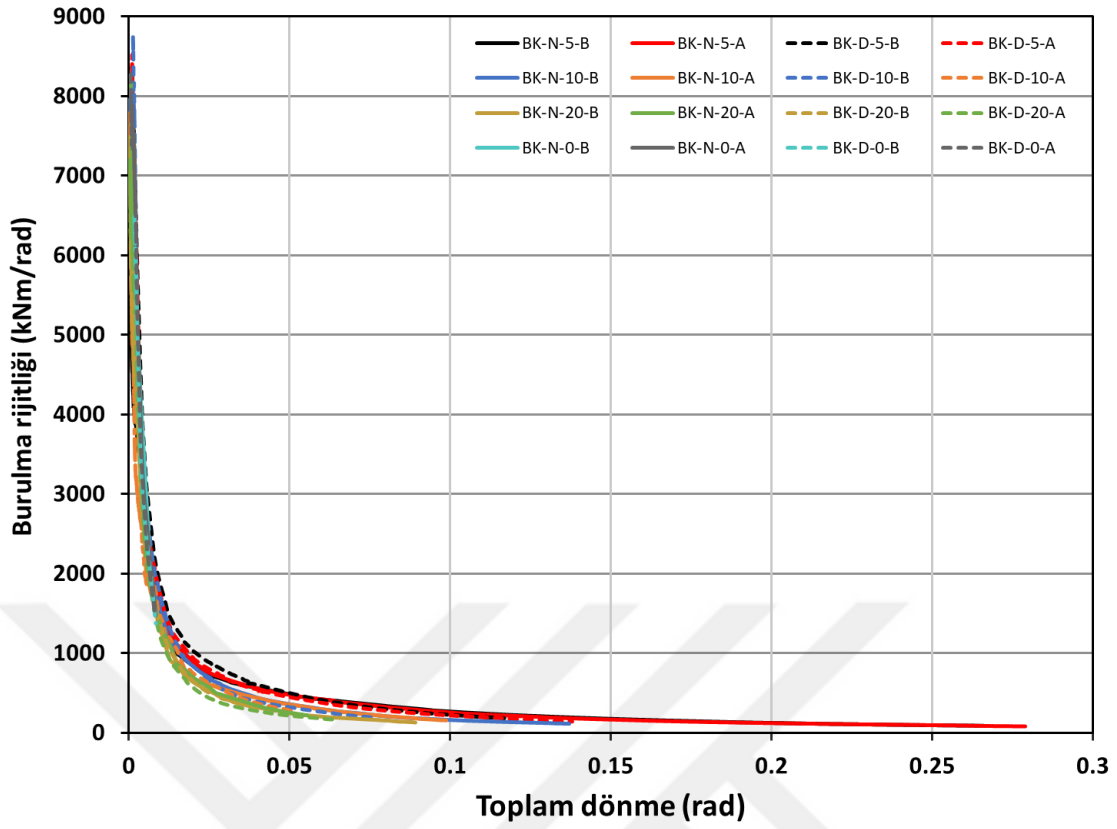
Toplam enerji–dönme grafiği Şekil 4.129’da verilmiştir. Grafik incelendiğinde, nervürlü donatıya sahip numunelerin genel olarak nervürsüz numunelere kıyasla daha fazla enerji tükettiği gözlemlenmiştir. Sadece etriyesiz numunelerden BK-D-0-B, nervürlü karşılığı BK-N-0-B’ye göre daha fazla enerji tüketmiştir. Etriye aralığının enerji tüketimine etkisi belirgin olup, 5 cm aralığa sahip numuneler en yüksek enerji tüketimini gösterirken,

etriyesiz numuneler en düşük değerleri sergilemiştir. Ayrıca, 10 cm etriye aralığına sahip numuneler, 20 cm aralıklı numunelere göre daha fazla enerji tüketmiştir. Boyuna donatı adetinin ($2\phi 12$ [A] ve $3\phi 12$ [B]) enerji tüketimi üzerindeki etkisi ise sabit değildir; 5 cm aralıkta A tipi, 10 cm aralıkta B tipi donatılı numuneler daha fazla enerji tüketmiştir. 20 cm etriye aralığında ise nervürsüz numunelerde A tipi, nervürlü numunelerde ise B tipi daha yüksek enerji tüketmiştir. Etriyesiz numunelerde de A tipi donatıya sahip numuneler daha fazla enerji tüketmiştir.

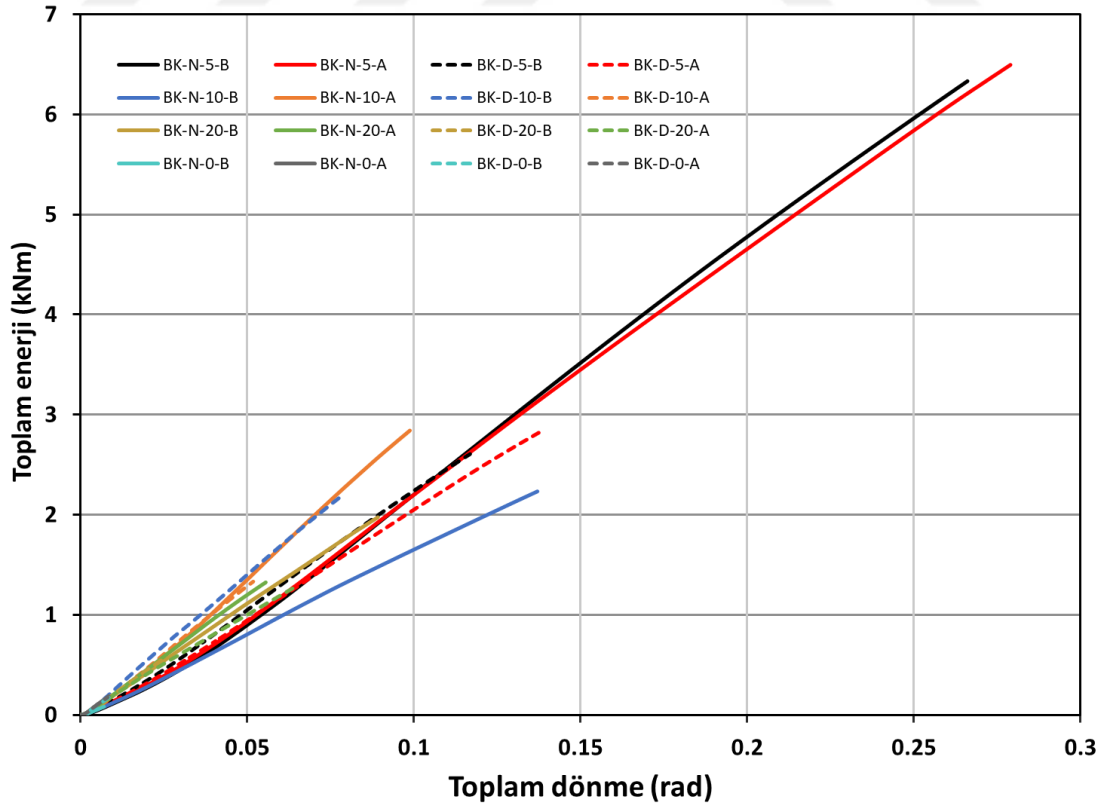
Çizelge 4.2’de tüm deneylerin ilk çatlak değerleri, akma değerleri, maksimum burulma momenti değerleri, maksimum burulma momenti değerinin %15 kapasite kaybına ulaştığında göçme kabul edildiği noktaya ait moment değerleri ve bu noktalardaki mevcut dönme açıları verilmiştir.



Şekil 4.127. Tüm numuneler için burulma momenti-toplam dönme grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 4.128. Tüm numuneler için burulma rijitliği-toplam dönme grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 4.129. Tüm numuneler için toplam enerji-toplam dönme grafiklerinin karşılaştırılması

Çizelge 4.2. Tüm numunelere ait deney sonuçları

NUMUNE ADI	İlk Çatlak Noktası		Akma Noktası		Maksimum Nokta		Göçme (Kopma) Noktası	
	T _{cr} (kNm)	θ _{cr} (rad)(x10 ⁻³)	T _y (kNm)	θ _y (rad)(x10 ⁻³)	T _{max} (kNm)	θ _{max} (rad)(x10 ⁻³)	T _u (kNm)	θ _u (rad)(x10 ⁻³)
BK-D-0-A	14,25	2,61	-	-	14,25	2,61	12,09	8,13
BK-D-0-B	13,60	2,73	-	-	13,60	2,73	11,56	8,44
BK-N-0-A	14,64	3,54	-	-	14,64	3,54	12,44	8,43
BK-N-0-B	15,43	3,59	-	-	15,43	3,59	13,11	7,03
BK-D-20-A	12,12	2,32	-	-	12,29	7,39	10,44	63,62
BK-D-20-B	14,62	5,20	-	-	14,62	5,20	12,42	25,84
BK-N-20-A	13,28	3,83	13,59	10,79	14,28	25,32	12,14	55,45
BK-N-20-B	11,31	3,43	12,42	5,72	13,35	9,56	11,34	89,19
BK-D-10-A	10,21	3,97	12,60	5,12	15,75	27,44	13,39	51,52
BK-D-10-B	14,05	3,08	13,50	1,74	16,88	10,00	14,35	77,49
BK-N-10-A	12,68	3,17	14,30	22,36	17,88	54,55	15,20	98,62
BK-N-10-B	13,03	2,76	14,38	8,17	17,98	55,11	15,29	137,04
BK-D-5-A	14,89	2,65	18,02	15,85	22,53	58,06	19,15	138,00
BK-D-5-B	16,31	3,11	20,37	18,99	24,89	51,07	21,15	116,84
BK-N-5-A	14,24	2,44	20,64	31,50	25,81	75,09	21,95	279,02
BK-N-5-B	13,48	4,01	21,52	36,52	26,90	87,69	22,86	266,06

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yürütülen bu tez çalışması kapsamında, betonarme kirişlerde donatı tipi, etriye aralığı ve boyuna donatı adetinin burulma davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında hazırlanan 16 adet kiriş numunesi, tasarlanan burulma deney düzeneğinde test edilmiştir. Deney düzeneğinin kurulumu ve çalıştırılması amacıyla 2 adet ön deney numunesi kullanılmıştır. Numunelerin üretimi ve deney düzeneğinin kurulmasının ardından testler gerçekleştirilmiştir.

Deneylerden elde edilen veriler bilgisayar ortamına aktarılmış; gerekli düzenlemeler ve hesaplamaların ardından veriler son haline getirilmiştir. Elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Kirişlerin burulma davranışının belirlenmesi amacıyla gözlemsel veriler kaydedilmiş ve analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen karşılaştırmalı değerlendirmeler sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

5.1. Sonuçlar

- Nervürlü donatı kullanılan kiriş numuneleri, nervürsüz donatı kullanılan numunelere kıyasla genel olarak daha yüksek burulma momenti kapasitesi, dönme kapasitesi ve enerji tüketimi göstermiştir. Bu numunelerde sünek ve kontrollü bir burulma davranışı sergilenmiştir.
- Nervürsüz donatı kullanılan numunelerde daha düşük dönme kapasitesi ve ani kapasite kayıpları ile birlikte daha kırılğan bir davranış gözlemlenmiştir. Ancak bu numuneler başlangıç rijitliği açısından genellikle daha yüksek değerlere sahip olmuş, örneğin BK-D-5-B numunesi BK-N-5-B'ye göre %47,83 daha fazla başlangıç rijitliği göstermiştir. Buna karşın çatlama sonrası rijitlikte hızlı bir düşüş yaşanmış ve nihai seviyelerde farklar azalmıştır.
- Etriye aralığı azaldıkça burulma kapasitesi, dönme dayanımı ve enerji tüketimi artmıştır. Özellikle 5 cm etriye aralığına sahip numuneler tüm seriler içinde en yüksek performansı göstermiştir. Etriyesiz veya geniş aralıklı etriyeler kullanıldığında ise burulma kapasitesinde belirgin düşüşler, rijitlikte ani kayıplar ve düşük enerji tüketimi gözlemlenmiştir. Etriyesiz numunelerde sünek davranış gelişmemiştir.

- Boyuna donatı adetinin artırılması ($2\phi 12$ 'den $3\phi 12$ 'ye) genel olarak burulma kapasitesini yükseltmiştir. Ancak bu artış, etriye aralığı ve donatı tipiyle birlikte değerlendirildiğinde farklı sonuçlar ortaya çıkmıştır. Örneğin, $3\phi 12$ donatı kullanılan numuneler 5 cm ve 10 cm etriye aralıklarında en yüksek kapasitelere ulaşırken; $2\phi 12$ donatılı numuneler, etriyesiz ve 20 cm etriye aralıklı durumlarda daha iyi performans sergilemiştir.
- Dönme kapasitesi açısından, bazı $2\phi 12$ donatılı numuneler $3\phi 12$ donatılı numunelere göre daha üstün performans göstermiştir. Bu durum, sünekliğe katkının sadece boyuna donatı adetine değil, donatı tipi ve etriye aralığı ile olan etkileşimine de bağlı olduğunu ortaya koymuştur.
- Enerji tüketimi, genel olarak nervürlü donatı ve sık etriye aralığına sahip numunelerde en yüksek seviyede gerçekleşmiştir. Ancak bazı durumlarda, örneğin BK-D-0-B numunesinde olduğu gibi, düz donatı kullanılan bir numunenin enerji tüketimi eşdeğer nervürlü donatı kullanılan numuneden (BK-N-0-B) daha yüksek olmuştur.
- Enerji tüketimi bakımından 5 cm etriye aralığında $2\phi 12$ donatılı numuneler, 10 cm'de ise $3\phi 12$ donatılı numuneler daha yüksek değerler göstermiştir. 20 cm etriye aralığında ise nervürsüz $2\phi 12$ donatılı numuneler, nervürlü $3\phi 12$ donatılı numunelere göre daha yüksek enerji tüketmiştir. Etriyesiz numunelerde ise her iki donatı tipi için de $2\phi 12$ donatılı numuneler daha fazla enerji absorbe etmiştir.
- En yüksek burulma momenti kapasitesine sahip numune BK-N-5-B (26,90 kNm), en yüksek dönme kapasitesine sahip numune ise BK-N-5-A ($277,02 \times 10^{-3}$ rad) olmuştur. Başlangıç rijitliği açısından en yüksek değere sahip numune ise BK-D-10-A olmuştur. Ancak tüm numunelerde çatlama sonrası rijitlikte düşüş yaşanmış, sonuçta nihai seviyelerdeki farklar azalmıştır.
- Nervürlü donatı kullanılan betonarme kirişlerde birim uzama değerleri, aynı koşullarda nervürsüz donatı kullanılan numunelere göre belirgin şekilde artış göstermiştir. Özellikle 5 cm etriye aralığına sahip BK-N-5-A numunesinde ölçülen 9,03 mm'lik birim uzama, nervürlü donatıların sünek davranış üzerindeki olumlu etkisini ve sismik performans açısından önemini ortaya koymaktadır.
- 5 cm etriye aralığı hem nervürlü hem nervürsüz numunelerde maksimum uzama değerleri sağlamıştır. Bu sonuç, beton sargı etkinliği ile donatı serbestliği arasındaki uygun dengeyi göstermektedir.

- Deney numunelerinde oluşan çatlaklar, burulma etkisi altında yaklaşık 45° açıyla gelişmiş ve numunelerin dört yüzeyine de yayılarak süreklilik göstermiştir.
- Etriye bulunmayan ve 20 cm aralıkla etriye yerleştirilen numunelerde çatlak sayısı oldukça az olmuş; burulma kapasitesine ulaşıldığında oluşan hâkim çatlak üzerinden ani göçme davranışı meydana gelmiştir.
- Buna karşılık, 5 cm ve 10 cm etriye aralığına sahip numunelerde çatlak sayısında belirgin bir artış gözlemlenmiş; çatlaklar daha yayılı ve çok noktalı olarak gelişmiş, ani göçme yerine daha kontrollü bir hasar oluşumu izlenmiştir.
- Aynı etriye aralığı grubunda, nervürlü donatı kullanılan ve boyuna donatı adedi 3φ12 olan numunelerde çatlak sayısının diğer numunelere kıyasla daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- Göçme anında bazı numunelerde kabuk betonda yer yer ayrılmalar ve beton örtüsünde lokal kopmalar meydana gelmiştir.

Tüm bu sonuçlar ışığında, etriye aralığı, donatı tipi ve boyuna donatı adetinin betonarme kirişlerin burulma kapasitesi, dönme dayanımı ve enerji tüketimi üzerinde önemli etkiler yarattığı görülmektedir. Nervürlü donatılar, nervürsüz donatılara kıyasla genellikle daha yüksek burulma kapasitesi ve sünek davranış sergilemiş, ancak düz donatılı numuneler başlangıç rijitliği açısından daha yüksek değerler göstermiştir. Boyuna donatı adetinin artırılması burulma kapasitesini artırmış, ancak etriye aralığı ve donatı tipinin etkileşimi bu artışın farklı performans seviyelerine yol açtığı gözlemlenmiştir. Özellikle 5 cm etriye aralığı, tüm serilerde en yüksek performansı göstererek beton sargı etkinliği ile donatı serbestliği arasındaki en uygun dengeyi sağlamıştır. Ayrıca, burulma etkisi altındaki numunelerde çatlaklar dört yüzeye yayılan 45°'lik açılarla oluşmuş; sık etriyeli numunelerde çatlak sayısı artarken, göçme mekanizması daha yayılı ve kontrollü şekilde gerçekleşmiştir. Etriye aralığı, donatı tipi ve boyuna donatı adetinin burulma davranışı üzerindeki etkileri birbirinden bağımsız olmayıp etkileşimlidir. Bu parametrelerin birlikte değerlendirilmesi, yapı elemanlarının hem burulma dayanımını hem de sünekliğini artırarak daha güvenli ve verimli bir tasarım elde edilmesine olanak tanıyacaktır.

5.2. Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen deneysel bulgular doğrultusunda, ileride yapılacak benzer çalışmalarda dikkate alınabilecek bazı öneriler aşağıda sunulmuştur:

- Gelecek çalışmalarda, her deney grubundan birden fazla numune kullanılarak istatistiksel analiz yapılması, sonuçların güvenilirliğini artıracaktır.
- Tam boyutlu (1/1 ölçekli) kiriş numuneleriyle yapılacak deneyler, boyut etkisinin burulma davranışına etkisini daha gerçekçi şekilde ortaya koyabilir.
- Kesit boyutları, donatı çapları ve beton dayanım sınıfı sabit tutulmuştur. Bu parametrelerin değişken olarak ele alındığı çalışmalar, davranışın daha kapsamlı analizine katkı sağlayacaktır.
- Sadece klasik etriye düzenleri değil, spiral etriye veya çift sıralı etriye gibi alternatif düzenlemelerin de burulma kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılabilir.
- Farklı yükleme tiplerinin (monotonik, tekrarlı, çevrimsel vb.) burulma davranışına etkisi incelenerek yapısal dayanım üzerine etkisi değerlendirilebilir.
- Sayısal modelleme ve sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizler, deneysel verilerle karşılaştırılarak tasarım yaklaşımı geliştirilebilir.
- Geliştirilmiş beton türleri (lifli beton, kendiliğinden yerleşen beton vb.) ile burulma davranışı arasındaki ilişki ayrı bir araştırma konusu olabilir.
- Özellikle nervürsüz donatı tipine sahip donatılar ile üretilmiş kiriş numuneleri üzerinde FRP sargı veya çelik levha kaplama gibi farklı güçlendirme yöntemleri uygulanarak, nervürlü donatı tipine sahip donatılar ile üretilmiş kiriş numuneleri ile karşılaştırmalı olarak analiz edilebilir.
- Süneklik ve enerji tüketimi açısından mevcut yönetmeliklerin yeterliliği test edilerek tasarım kriterleri yeniden değerlendirilebilir.

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.
- Bayrak, B., 2015, Betonarme Kirişlerde Etriyeye Alternatif Çelik Tel Uygulanması ve Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Berktaş, İ., 1995. Betonarme I-Taşıma Gücü ve Kesit Hesapları, İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul.
- Berto, L., Vitaliani, R., Saetta, A., and Simioni, P. 2009, Seismic assessment of existing RC structures affected by degradation phenomena, Structural Safety, 31(4), 284–297.
- Beyaz, A., 2021, Betonarme Kirişlerin Burulma Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N. İ., 1998, Betonarme Yapılar, Sema Matbaacılık.
- Cengiz, S., 2019, Kendiliğinden Yerleşen Beton ile Üretilmiş, Sabit Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kirişlerde Kesme ve Eğilme Davranışının İncelenmesi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Engin, S., 2005, Çelik Lif ile Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Burulma Davranışları, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ersoy, U., 1975, Betonarmede burulma: davranış mukavemet şartnameler hesap için öneriler, Güven Kitabevi.
- Ersoy, U., ve Özcebe, G., 2001. Betonarme, Geliştirilmiş Yeni Baskı, Evrim Yayınevi ve Bilg. San. Tic. Ltd. Şti., İstanbul.
- Ersoy, G. ve Özcebe, G., 2016, Betonarme/Temel İlkeler, İstanbul, 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, 2004, Design of structures for earthquake resistance - Part 1 : General rules, seismic actions and rules for buildings Brussels, Belgium: 1-229.
- İnan, M., 2001, Cisimlerin mukavemeti, İTÜ Vakfı.

- JSCE, J. S. o. C. E., 2010, JSCE Guidelines for Concrete No. 15: Standard Specifications for Concrete Structures—2007 “Design”.
- Kamanlı, M., 1993, Burulmaya Maruz Dikdörtgen Kesitli Yapı Elemanlarında Kayma Gerilmesi Dağılımının Sonlu Elemanlar Metodu ile Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kaplan, S. A., 2004, Betonarme Yapı Elemanları, İstanbul, Bilbeyki Yayınları, p.
- Kayan, İ., 1992, Cisimlerin Mukavemeti, İstanbul, İTÜ.
- Koutchoukali, N., Belarbi A., 1997, Effect of Concrete Strength on the behavior of RC Beams Subjected to Pure Torsion, High Strength Concrete First International Conference, July 1997, Hawaii, 38-51
- Öztekin, E., 2007, Farklı Şekilde Donatılmış Yüksek Performanslı Betonarme Kirişlerin Burulma Momenti Etkisindeki Davranışlarının Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Öztürk, O., 2007, FRP ile Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Burulma Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Rashidi, M. H., and Takhtfiroozeh, H., 2016, The Evaluation of Torsional Strength in Reinforced Concrete Beam, Mechanics, Materials Science & Engineering, Vol. 7, pp. 76-84.
- Solak, A., 2023, Betonarme Kolonların Eksenel Yük ve Burulma Etkisi Altındaki Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- TBDY, 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Tuna, M. E., 1992. Çözümlü Örneklerle Betonarme, 2. Baskı, Tuna Eğitim ve Kültür Vakfı, Ankara
- Turan, A. İ., 2019, Paslanmaya Maruz Kalmış Kirişlerin Burulma Dayanımı, Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- TS EN 12390-1:2021, Beton – Sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm 1: Deney numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 2021.
- TS EN 12390-3:2019, Beton – Sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 2019.
- TS500, 2000, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları,

- Ünal, A., 2016, Sabit Dikdörtgen Kesitli Kirişlerin Farklı Mesnet Koşullarında Kesme Kapasitesinin Araştırılması, Konya: Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi.
- Üstün, S., 2020, Betonarme Kirişlerde Etriye Açısının Kesme Davranışına Etkisinin Deneysel ve Teorik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Yang, I. H., Joh, C., Lee, J.W., and Kim, B-S., 2013, Torsional behavior of ultra-high performance concrete squared beams, *Engineering Structures*, 56, 372–383.

