

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çekme Donatı Oranının Düzenli
Kare Boşluklu Betonarme Kirişlerin
Eğilme Davranışına Etkisi

Ebru KAHRAMAN

EKİM 2018

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Ebru KAHRAMAN tarafından hazırlanan ÇEKME DONATI ORANININ DÜZENLİ KARE BOŞLUKLU BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞINA ETKİSİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. İlker KALKAN
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Doç. Dr. İlker KALKAN
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Mehmet Baran _____

Üye (Danışman) : Doç. Dr. İlker Kalkan _____

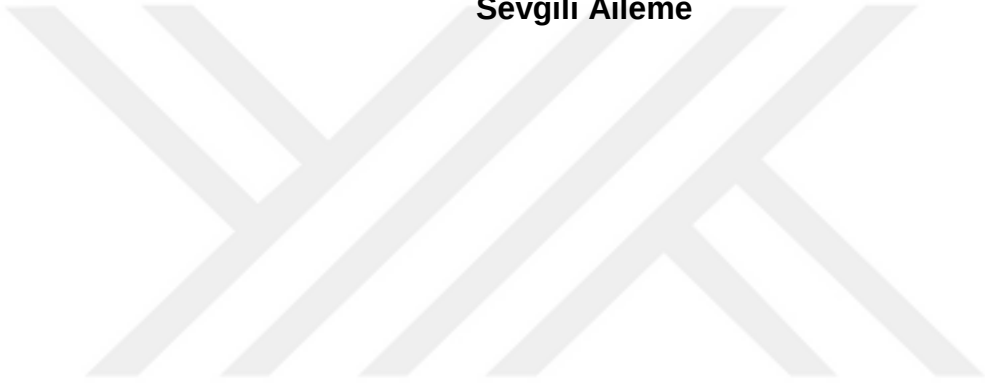
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Selçuk Baş _____

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Sevgili Aileme



ÖZET

ÇEKME DONATI ORANININ DÜZENLİ KARE BOŞLUKLU BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞINA ETKİSİ

KAHRAMAN, Ebru

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Doç. Dr. İlker Kalkan

Ekim 2018, 74 sayfa

Bu çalışma kapsamında, boyuna donatı oranının uzunluğu boyunca düzenli kare gövde boşluklarına sahip betonarme kirişlerin eğilme davranışları üzerindeki etkileri analitik ve nümerik olarak araştırılmıştır. Çalışmanın nümerik kısmında, literatürde test edilmiş olan orta ve yüksek boyuna donatı oranına sahip referans boşluksuz betonarme kirişler ile düzenli gövde boşluklu betonarme kirişlerin deneysel yük-sehim eğrileriyle mümkün olduğunca uyumlu eğrilere sahip nümerik modeller (sonlu eleman modelleri) teşkil edilmiştir. Daha sonra bu nümerik modeller kullanılarak, boyuna donatı oranındaki değişim sonucu boşluklar arasındaki dikmelerde yatay etriye ve çapraz donatı bulunduran ve bulundurmayan düzenli gövde boşluklu betonarme kirişlerin eğilme davranışları, yük taşıma kapasiteleri ve başlangıç rijitliklerinde meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Ayrıca, bu analiz sonuçları, düzenli gövde boşluklu betonarme kirişlerde artan boyuna donatı oranlarıyla beraber kullanım yükü deformasyonlarında ortaya çıkan değişimlerin araştırılmasına olanak sağlamış ve düzenli gövde boşluklu kirişlerde kullanım yükü sehim sınırlarının aşılması için gerekli boşluk çevresi eninde donatı düzenleri ve boyuna donatı oranı sınırları ile ilgili önemli çıkarımlar yapılmasını sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler : Düzenli Gövde Boşluğu, Betonarme Kiriş, Servis Yüğü
Deformasyonları, Eğilme Rijitliğı, Eğilme Kapasitesi.



ABSTRACT

INFLUENCE OF THE TENSION REINFORCEMENT RATIO ON FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH REGULAR SQUARE WEB OPENINGS

KAHRAMAN, Ebru

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineer, M. Sc. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İlker KALKAN

October 2018, 74 pages

The effects of the longitudinal reinforcement ratio on the flexural behavior of reinforced concrete beams with multiple regular web openings along the beam length were investigated both analytically and numerically within the scope of the present study. In the numerical part of the study, numerical (finite element) models, which yield to load-deflection curves in closest agreement with the experimental load-deflection curves of real moderately- and heavily-reinforced concrete beams with no web openings and regular square web openings in the literature, were established. Next, the variations in the bending behavior, load capacities and initial flexural rigidities of reinforced concrete beams in the presence of longitudinal transverse reinforcement and diagonal reinforcement in the posts between the openings was investigated for different amounts of longitudinal reinforcement with the help of these numerical models. Furthermore, these analysis results enabled the researchers to investigate the variations in the service-load deflections of these beams with varying longitudinal reinforcement ratio and reach important conclusions regarding the

transverse reinforcement schemes around the openings and longitudinal reinforcement limits not to exceed the service-load deflections limits in reinforced concrete beams with regular square web openings.

Key Words: Regular Web Openings , Reinforced Concrete Beam, Service-Load Deformations, Flexural Rigidity, Bending Capacity



TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımı esirgemeyen ve biz genç araştırmacılara büyük destek olan, bilimsel deney imkanlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine veren, tez yöneticisi hocam, Sayın Doç. Dr. İlker Kalkan 'a, tez çalışmalarım esnasında, bilimsel konularda daima yardımını gördüğüm hocam, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Selçuk Baş' a, bana destek olan arkadaşım Elif Yuca' a ve son olarak bana birçok konuda olduğu gibi, tezimi hazırlamam esnasında da yardımlarını esirgemeyen İnşaat Yüksek Mühendisi Rafet Özgür Ocaklı ' a teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca ellerinden gelen tüm imkanları bana sunan, beni yönlendiren ve yetiştiren çok kıymetli babam Vedat Kahraman ve çok kıymetli annem Sibel Kahraman' a sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
SİMGELER DİZİNİ.....	xi
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1.GİRİŞ	1
1.1. Kaynak Özetleri / Literatür Özetleri	5
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	8
2. NÜMERİK MODELLERİN OLUŞTURULMASI.....	10
2.1. Modellenen Kirişlerin Özellikleri	10
2.2. Modellerde Kullanılan Sonlu Eleman Tipleri	13
2.3. Kiriş Modellerinin Malzeme Tanımları	16
2.4. Deney Düzenineğinin Modellenmesi	23
2.5. Kiriş Modellerinin Hazırlanması	26
2.6. Analiz Detayları.....	35
3. DENEYSEL VE NÜMERİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	37
4. DÜZENLİ KARE GÖVDE BOŞLUKLU KİRİŞLERDE BOYUNA DONATININ EĞİLME DAVRANIŞINA ETKİSİ	54
4.1. Dikmelerinde Etriye Bulunmayan Kirişler (Grup 1).....	56

4.2. Dikmelerinde Etriye Bulunan Kirişler (Grup 2)	59
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR	65
EKLER	68
EK 1 Donatı Şekilleri.....	68



ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

Sayfa

1.1. Betonarme kirişlerde gövde boşluğu.....	1
2.1. Kare boşluklu kirişler	10
2.2. Solid 65 elemanının şematik gösterimi	13
2.3. Solid 185 elemanının şematik gösterimi	14
2.4. Link 180 elemanı şematik gösterimi.....	14
2.5. Hognestad beton modeli	18
2.6. Todeschini beton modeli	18
2.7. Betona ait elastisite ve poisson oranlarının tanımlanması	20
2.8. Betona ait gerilme ve birim deformasyon değerlerinin	20
2.9. Donatıya ait elastisite modülü ve poisson oranı tanımının yapılması	23
2.10. Yükleme düzeneği	25
2.11. Yükleme düzeneğinin model üzerinde gösterimi.....	26
2.12. Referans kiriş modeli	27
2.13. Gövde boşluklu kiriş modeli	28
2.14. z doğrultusunda oluşturulan düğüm noktaların görünüşü	29
2.15. Tüm düğüm noktalarının gösterilmesi	30
2.16. 50 mm'lik kiriş parçası.....	31
2.17. Kirişin bütünü oluşturulan sonlu elemanlar	31
2.18. Kare boşluk oluşturulan kirişin görünüşü.....	32
2.19. Kiriş üzerindeki mesnet noktaları ve boyuna donatılar	33
2.20. Kiriş üst ve alt kirişçik etriyelerinin gösterimi	33
2.21. Dikme etriyelerinin gösterimi.....	34
2.22. Boşluk kenarı düşey etriyelerin gösterimi.....	34
3.1. RBn elemanının nümerik ve deneysel yük-deplasman eğrileri	37
3.2. RBb elemanının nümerik ve deneysel yük-deplasman eğrileri.....	38
3.3. RRxn elemanının nümerik ve deneysel yük-deplasman eğrileri.....	38
3.4. RRxcn elemanının nümerik ve deneysel yük-deplasman eğrileri.....	39
3.5. RRxb elemanının nümerik ve deneysel yük-deplasman eğrileri.....	39

3.6. RRxcb elemanın nümerik ve deneysel yük-deplasman eğrileri.....	40
3.7. RBn elemanın deneysel göçme modu ..	42
3.8. RBn elemanın maksimum yükte birim deformasyon dağılımı	43
3.9. RBn elemanın maksimum yükte gerilme (MPa) dağılımı	43
3.10. RBb elemanın deneysel göçme modu	44
3.11. RBb elemanın maksimum yükte birim deformasyon dağılımı	45
3.12. RBb elemanın maksimum yükte gerilme (MPa) dağılımı	45
3.13. RRxn elemanın deneysel göçme modu	46
3.14. RRxn elemanın maksimum yükte birim deformasyon dağılımı	47
3.15. RRxn elemanın maksimum yükte gerilme (MPa) dağılımı	47
3.16. RRxcn elemanın deneysel göçme modu	48
3.17. RRxcn elemanın maksimum yükte birim deformasyon dağılımı.....	49
3.18. RRxcn elemanın maksimum yükte gerilme (MPa) dağılımı.....	49
3.19. RRxb elemanın deneysel göçme modu	50
3.20. RRxb elemanın maksimum yükte birim deformasyon dağılımı	51
3.21. RRxb elemanın maksimum yükte gerilme (MPa) dağılımı	51
3.22. RRxcb elemanın deneysel göçme modu	52
3.23. RRxcb elemanın maksimum yükte birim deformasyon dağılımı.....	53
3.24. RRxcb elemanın maksimum yükte gerilme (MPa) dağılımı.....	53
4.1. Rijitlik tanımları	55
4.2. Grup 1 elemanlarına ait yük- deplasman grafikleri.....	57
4.3. Grup 2 elemanlarına ait yük- deplasman grafikleri.....	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

2.1. Deney elemanlarının beton silindir basınç dayanımı değerleri ve hesaplanan elastisite modülü değerleri (Mpa)	16
2.2. Gerilme-Birim Deformasyon Eğrisi Değerleri	19
2.3. Donatı numunelerinin deney sonuçları	22
4.1. Analiz edilen kiriş donatı oranları.	56
4.2. Birinci grup kirişlerinin analiz sonuçları	57
4.3. Birinci grup kirişlerinin kullanım yükü sehimleri	58
4.4. İkinci grup kirişlerinin analiz sonuçları	60
4.5. İkinci grup kirişlerinin kullanım yükü sehimleri.....	60

SİMGELER DİZİNİ

$\emptyset$	Donatı Çapı
f_{ckj}	j Günlük Betonun Karakteristik Basınç Dayanımı
σ	Gerilme
E	Elastisite Modülü
ϵ	Birim şekil değiştirme
ϵ_{co}	Maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalma
σ_c	Beton gerilmesi
ϵ_c	Betonun birim şekil değiştirmesi
f_c	Deney numuneleri beton basınç dayanımı
ρ	Kiriş çekme donatısı oranı
ρ'	Kiriş basınç donatısı oranı
ρ_b	Kiriş dengeli donatı oranı
ρ_{max}	Kiriş izin verilen maksimum boyuna donatı oranı
ρ_b	Kiriş izin verilen minimum boyuna donatı oranı

KISALTMALAR DİZİNİ

TS500	Türk Standardı 500
ACI	Amerika Beton Enstitüsü
LVDT	Elektronik deplasman ölçerler

1.GİRİŞ

İnşaat yapılarında yer alan elektrik ve mekanik tesisat; kablolar, borular, kanallar, vs. vasıtasıyla yapı boyunca iletilir. Yapılarda genellikle asma tavan uygulaması ile bu mekanik ve elektrik donanımın mimari ve görsel açılardan sorun teşkil etmemesi sağlanmaktadır. Bu kablo, boru ve kanalların kat kirişlerinin altından geçirilmesi, kullanılabilir kat yüksekliklerinin azalmasına ve dolayısıyla aynı kullanılabilir yapı hacmine ulaşmak için daha yüksek yapıların yapılmasına sebep olmaktadır. Yapının genel yüksekliğinin artması, yapının zati ağırlığının ve dolayısıyla yapısal elemanlarda taşınan ve temele iletilen yüklerin artmasına yol açmaktadır. Bu artış ile asma tavan imalatı, yapının genel maliyetini artırarak, ülke ekonomisine olumsuz olarak yansımaktadır. Bu olumsuz durumun önüne geçmek amacıyla kullanılan en yaygın yöntemlerden biri de, elektrik ve mekanik tesisatın kiriş gövdesinde yapım aşamasında bırakılan veya sonradan oluşturulan boşluklardan geçirilmesidir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Betonarme kirişlerde gövde boşluğu

Gövde boşlukları, özellikle yapısal çelik kirişlerde sıklıkla kullanılan bir tasarım şeklidir. Düzenli altıgen veya sekizgen gövde boşluklu petek kirişler (castellated beam) ve düzenli dairesel boşluklu hücresel kirişler (cellular beam), çelik veya çelik-betonarme kompozit yapılarda sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak, önüretimli (prekast) ve yerinde dökülen betonarme veya öngerilmeli beton kirişlerde gövde boşluğu bırakılması, henüz yeterince yaygınlık kazanmamış bir tasarım şeklidir. Üstelik, çelik kirişlerin aksine betonarme veya öngerilmeli beton kirişlerde sonradan gövde boşluğu oluşturulması, ciddi çatlama riski ve ilave gerilme birikimleri gibi sebeplerle tercih edilemeyecek bir alternatif çözümdür.

Betonarme kirişlerde bırakılacak gövde boşluklarıyla ilgili birçok çalışma yapılmış olup, bu çalışmaların birçoğunda göçmenin gevrek bir şekilde kritik bölge olan delik çevresinde ortaya çıktığı belirlenmiştir. Yani gövde boşluklu betonarme kirişler, genelde eğilme dayanımı yetersizliğinden ziyade kesme dayanımı yetersizliğinden göçmeye ulaşmıştır. Bölgesel delikleri bulunan kirişler üzerinde yapılan çalışmalar incelendiğinde kirişin davranışının, boşluk yeri, boyutu ve geometrisine göre değiştiği görülmüştür. Boşluklu betonarme kirişlerde gevrek kesme kırılmasının önüne geçmek amacıyla, nispeten daha sünek davranış gösterebilecek ve eğilme etkisinde çalışabilecek bir boşluklu kiriş tasarım şekli ön plana çıkmıştır. Bu tasarım şeklinde, kirişin kesme açıklıklarında bırakılan bir tane veya bir çift gövde boşluğu yerine kiriş uzunluğu boyunca bırakılan çok sayıda düzenli gövde boşlukları tercih edilmektedir. Bu tasarım şeklinin iki temel amacı vardır:

1. Kirişte kesme kuvvetlerinin önem kazandığı mesnet bölgelerinin yanı sıra eğilme momentlerinin önem kazandığı kiriş orta bölgesinde de bulunan gövde boşlukları sayesinde, kiriş göçme modunun gevrek bir göçme şekli olan kesme kırılmasından sünek bir göçme şekli olan eğilme kırılmasına geçişi amaçlanmaktadır.

2. Açıklık boyunca yer alan gövde boşlukları sayesinde, delik çevresinde ortaya çıkan gerilme birikmelerinin sadece kesme açıklıklarına değil, bütün kiriş açıklığına yayılması hedeflenmiştir.

Bu amaçla daha önce düzenli gövde boşluklu betonarme kirişler üzerine yapılan deneysel çalışmalarda [1-3], delik çevresinde farklı donatı düzenlerinin ve farklı boşluk geometrilerinin kirişin eğilme davranışı ve göçme şekline olan etkileri araştırılmış ve uygun donatı detaylandırması sayesinde düzenli gövde boşluklu kirişlerin de boşluksuz kirişler gibi sünek bir eğilme davranışına sahip olabileceği gösterilmiştir.

Düzenli gövde boşluklu betonarme kirişlerde araştırma konusu olmuş en önemli unsurlardan biri de kullanım yükleri altındaki deformasyonlardır. Gövde boşlukları sebebiyle kiriş eğilme rijitliğinde ortaya çıkan azalmalar, kiriş deformasyonlarını attırmakta ve kullanılabilirlik sınır durumlarını daha kritik hale getirmektedir. Klasik derin olmayan boşluksuz betonarme kirişlerde genellikle kesme kuvvetlerinin etkisiyle ortaya çıkan deformasyon ve sehimler, eğilme etkisiyle ortaya çıkan deformasyon ve sehimlere göre ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bu durum, klasik Euler-Bernoulli kiriş eğilme teorisinin de en önemli varsayımlarından birini teşkil eder. Ancak, özellikle büyük kayma gerilmelerinin ortaya çıktığı ve kesme kuvvetlerinin taşınmasına büyük katkısı olan kiriş gövdesinde boşluklar bulunması, gövde boşluklu betonarme kirişlerde kesme etkisiyle ortaya çıkan deformasyonların da eğilme deformasyonları kadar önem kazanmasına yol açmaktadır. Üstelik, gövde boşluklu betonarme kirişlerde Vierendeel panel davranışı gibi farklı göçme modlarının ortaya çıkması da kesme deformasyonlarının ihmal edilemeyecek seviyelere ulaşmasına yol açmaktadır. Geçmiş deneysel çalışmaların [1-3] en önemli amaçlarından biri de, boşluk çevresi donatı düzenlemeleri vasıtasıyla bu kesme deformasyonlarının önemsiz seviyelere çekilmesi ve kirişin salt eğilme davranışına yaklaştırılması olmuştur. Bu sayede, kesme etkisiyle ortaya çıkan deformasyonlar azaltılarak, kullanılabilirlik sınır durumlarının kritikliğinin azaltılması amaçlanmıştır. Kalkan [4] ve Ceylan [5], yaptıkları

Çalışmalarda çok sayıda düzenli gövde boşluğu içeren farklı donatı düzenlemelerine sahip betonarme kirişlerin kullanım yükleri altında gösterdiği deformasyonların analitik olarak tahmin edilmesinde kullanılacak bağıntılar geliştirmiş ve bu bağıntıların mevcut deney verileri [1-3] ile son derece uyumlu olduğunu göstermiştir.

Düzenli gövde boşluklu betonarme kirişlerin eğilme davranışlarını ve kullanım yükü deformasyonlarını etkileyen en önemli değişkenlerden biri de kiriş boyuna donatı oranıdır. Özellikle kirişteki çekme donatısı arttıkça, eğilme moment kapasitesi de artacak ve kirişin bu moment seviyelerine ulaşıncaya kadar kayma deformasyonlarını sınırlı tutması gereken boşluk çevresi kesme donatısının yeterliliği de önem kazanacaktır. Bu çalışmada, kiriş çekme donatı oranının farklı boşluk çevresi donatı düzenlerine sahip düzenli gövde boşluklu betonarme kirişlerin eğilme davranışlarını ve kullanım yükü sehimlerini nasıl etkilediği nümerik ve analitik olarak araştırılacaktır. Literatürde Dündar [1], tarafından yapılan deneylerin verileri kullanarak, ANSYS sonlu elemanlar programında teşkil edilen nümerik modellerin gerçeğe yakın sonuçlar verecek şekilde düzenlemesi yapılacak ve gerekli kalibrasyonlardan sonra kirişlerin donatı oranlarının eğilme davranışı üzerindeki etkileri araştırılacaktır. Analiz edilen kirişlerin tümü, düzenli kare gövde boşlukludur.

1.1. Kaynak Özetleri / Literatür Özetleri

Geçmişte gövde boşluklu betonarme kirişler üzerine yapılan çalışmaların büyük bir kısmı, bütün açıklığında yalnızca bir boşluk veya her kesme açıklığında bir adet (toplamda iki adet) gövde boşluğu bulunduran betonarme kirişler üzerine yapılmıştır. Son yıllarda, çok sayıda düzenli gövde boşluğu içeren betonarme kirişler üzerine yapılan çalışmaların sayısında da artış olmuştur.

Mansur ve diğ. [6], aynı boyuna donatı oranına sahip gövde boşluklu ve referans boşluksuz betonarme kirişlerin davranışlarını incelemiştir. Gövde boşluklarının sayısı, boyutu ve konumu, deney değişkenleri olarak seçilmiştir. Bu çalışmada, boşluklu betonarme kirişlerin basit eğilme davranışı gösteremediği gözlemlenmiştir. Boşluğun yüksekliğinin ve uzunluğunun artmasıyla göçme yükünün ve eğilme rijitliğinin azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, plastik mafsalların boşluk kenarlarında olduğu ve kiriş çatlama momentinin boşluğun konumundan çok az etkilendiği belirlenmiştir. Boşluklar, açıklıkta momentlerin daha büyük olduğu bölgelere yaklaştıkça, deformasyonların arttığı ve göçme yüklerinin küçüldüğü sonuçlarına varılmıştır.

Tan ve diğ. [7], Amerikan ACI 318 [8] yönetmeliğinin öngördüğü kesme dayanımı yaklaşımının dairesel gövde boşluklu betonarme kirişler için güvenli sonuçlar verip vermediğini araştırmış ve dairesel boşluklu T-kesitli betonarme kirişler üzerine deneyler yapmıştır. Negatif moment bölgelerinde yer alan boşlukların etkisini de incelemek amacıyla, deney kirişleri ters çevrilerek yüklenmiştir. Deney sonuçları, dairesel boşluk bulunduran kirişlerin kesme hesaplarının ACI yönetmeliğine göre yapılabileceğini ve boşluk çevresinde yer alan çapraz donatıların kesme çatlaklarının genişlemesine engel olduğunu göstermiştir. Yeterli miktarda çapraz donatı içeren boşluklu kirişlerde kesme kuvvetlerinin, üst ve alt kirişçikler arasında kesit alanları ile orantılı olarak dağıtıldığı belirlenmiştir.

Mansur ve diğ. [9], dairesel boşluklu betonarme kirişlerde boşluk konumu ve boyutunun kiriş davranışı üzerindeki etkilerini araştırmış ve boşluğun mesnet bölgelerine yaklaşmasının göçmenin daha erken olmasına neden olduğunu ve kiriş rijitliğini olumsuz etkilediğini belirlemiştir. Boşlukların sonradan oluşturulduğu betonarme kirişlerde boşluk açma işleminin etriyelere zarar vermemesi halinde, kiriş rijitliğinin asgari düzeyde etkilendiği görülmüş ve boşluğun tekrar doldurulmasıyla kiriş rijitliğinin eski seviyelerine ulaşamadığı sonucuna varılmıştır.

Tan ve diğ. [10], bir kısmı pozitif ve bir kısmı negatif momente maruz kalan gövde boşluklu T-kesitli kirişler üzerine bir çalışma yapmıştır. Birden fazla boşluk bulunan kirişlerin dayanımın tek gövde boşluklu kirişlere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre, boşluklu kirişlerde erken göçme olmaması için komşu iki boşluğun arasındaki dikmenin kalınlığının kiriş derinliğinin bir buçuk katından daha az olmaması ve dikmelerde yeteri miktarda donatı bulunması gereklidir.

Mansur ve Paramasivam [11] tarafından yapılan çalışmada, küçük enine açıklık içeren, eğilme ve burulma tesirlerine maruz kalan betonarme bir kirişin dayanımının belirlenmesinde kullanılacak bir metod önerilmiştir. Dikmelerinde uygun donatı düzenlerine sahip betonarme kirişlerin farklı göçme modlarına göre dayanımlarının belirlenmesinde kullanılacak denklemler geliştirilmiş ve bu denklemlerden elde edilen sonuçların deneysel değerlerle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Ashour ve Rishi [12], gövde boşluğu bulunduran iki açıklıklı betonarme kiriş deneyleri yapmıştır. Boşluğun boyutu, konumu ve çevresindeki donatıların etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, kirişte boyut, boşluk çevresindeki donatı miktarı ve tipi sabit tutulduğunda boşluğun konumuna bağlı olarak iki farklı göçme modu gerçekleştiği görülmüştür. Mesnet reaksiyonları, boşluğun boyut ve konumuna bağlı olarak değişmektedir. Boşluk çevresindeki düşey donatılar,

yatay donatılara göre kirişin kesme kapasitesine daha büyük katkılarda bulunmaktadır.

Mansur ve diğ. [13] tarafından yapılan çalışmada, boşlukların derinliği, konumu ve uzunluğu ile köşe donatılarının miktarı, dizilişi ve uzunluğu gibi deney değişkenleri ele alınmıştır. Deneylerde kirişlere tek noktalı yükleme yapılmıştır. Köşe donatısı olarak kullanılan çapraz donatıların çatlak genişliği kontrolünde düşey etriyelere göre daha etkin olduğu görülmüştür. Boşluklu kirişlerde kesme dayanımının %75'inin çapraz donatılar tarafından sağlandığı belirlenmiştir. Diyagonal donatıların taşıma gücüne sağladığı katkılara da değinilmiş ve simetrik donatı düzenlemelerinde kirişçiklerde eğriliğin değiştiği noktanın tam kirişçik ortasında olduğu gözlemlenmiştir.

Mansur ve Tan [14] tarafından yapılan çalışmada düzenli boşluk düzenine sahip kirişler üzerine boşluk düzenine uygun olacak şekilde geliştirilmiş olan formüllerden elde edilen analitik değerler ve eğriler karşılaştırılmıştır. Sonuçlar ile kirişlerin kullanılabilirlik sınırlarının geliştirilmesi istenmiştir.

Dündar [1], Aykaç ve Yılmaz [2] ve Aykaç ve diğ. [3] yaptıkları çalışmalarda, çok sayıda düzenli dairesel, üçgen ve dikdörtgen gövde boşluklarına sahip betonarme kirişlerin davranışlarını incelemiştir. Bu çalışmalarda sürekli boşluklar sayesinde boşluk çevresi gerilme birikmelerinin tüm kirişe yayılacağı düşünülmüştür. Sürekli boşluklar yardımıyla, kirişlerin gevrek kesme kırılması yerine, sünek eğilme davranışı sergilemesi hedeflenmiştir. Ayrıca, farklı boşluk geometrilerinin kiriş davranışını nasıl etkileyeceği araştırılmıştır. Dündar [1], farklı boyuna donatı oranlarına sahip boşluklu betonarme kirişler test ederek, boyuna donatı oranının kiriş davranışına etkilerini araştırmış ve donatı oranı yüksek olan kirişler haricinde kalan gövde boşluklu kirişlerde gerekli boşluk çevresi donatı düzenleri yardımıyla referans kirişlerden bile daha sünek (1.5-2 kat) eğilme davranışlarına ulaşmayı başarmıştır. Kare boşluklu elamanların dikmelerinde etriye kullanılmadığı takdirde dikmelerde kesme çatlaklarının olduğu gözlemlenmiştir. Kiriş üzerinde sürekli boşlukların bırakılması ile

kırılmanın kesmeden eğilmeye değiştiği gösterilmiştir. Daire boşluklu elemanların kare boşluklu elemanlara göre daha yüksek süneklik, dayanım ve rijitlik değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Etriyeli ve etriyesiz daire boşluklu elemanların dikmelerinde kare boşluklu elemanlara göre daha az hasar olduğu, dikmelerde etriye kullanımının süneklik kapasitesi üzerinde olumsuz etkisinin olmadığını gösterilmiştir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının temel amacı, açıklığı boyunca düzenli gövde boşluklarına sahip betonarme kirişlerde değişen çekme donatısı oranının kirişlerin eğilme davranışlarına, yük taşıma kapasitelerine, rijitliklerine ve kullanım yükleri altındaki sehimlerine olan etkisini belirlemektir. Çalışmanın birinci kısmında, sonlu eleman analizleri yapılarak, mevcut deneysel verilerle uyumlu nümerik sonuçlar verilen modeller elde edilmiştir. Sonlu eleman modellerinin gerçeğe ne kadar yakın sonuçlar verdiğinin saptanmasında, daha önce Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Mekaniği Laboratuvarında DüNDAR [1] tarafından gerçekleştirilen 6 adet düzenli kare gövde boşluklu betonarme kirişin deney verileri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında dairesel gövde boşluk geometrisi göz önüne alınmamıştır. Bilindiği üzere, kare gövde boşlukları, boşlukların sivri kenarlarında oluşan gerilme birikmelerinin kiriş davranışı üzerindeki olumsuz etkileri sebebiyle dairesel gövde boşluklarına nazaran daha kritik bir boşluk geometrisine sahiptir. Dolayısıyla, kare gövde boşlukları ile ilgili elde edilen sonuçlar, dairesel gövde boşluklu kirişlere de güvenle uygulanabilir.

Çalışmanın ikinci kısmında, deneysel verilerle uyumlu olacak şekilde düzenlenmiş nümerik modellerde boyuna donatı oranı değiştirilerek, bu değişkenin kiriş eğilme davranışı üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Bu bağlamda, iki farklı boşluk çevresi kesme donatı düzeni göz önüne alınmıştır. Birinci grup kirişlerde boşluklar arasında yer alan dikmelerde etriye

bulunmamakta ve sadece dikmelerde çapraz donatı ile boşluk altı ve üstü kirişçiklerde kısa etriyeler bulunmaktadır. İkinci grup kirişlerde ise çapraz donatı ve kirişçik etriyelerine ek olarak, dikmelerde de etriyeler bulunmaktadır.

Düzenli gövde boşluklu kirişlerde, boşluklar kirişin eğilme rijitliğini azaltır ve deformasyonları artırır. Klasik Euler-Bernoulli kiriş teorisine göre, kiriş sehimlerinin çok önemli bir bölümü eğilme kaynaklı olup, kesme kuvvetlerinin düşey deplasmanlar üzerindeki etkisi ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Ancak, boşluklu kirişlerde ortaya çıkan boşluk çevresi kayma gerilmeleri, kesme kaynaklı deformasyonların da artmasına ve önem kazanmasına neden olmaktadır. Üstelik, farklı donatı düzenleri vasıtasıyla boşlukları çevreleyen dikmeler ve kirişçikler arasında yeterli bir bütünlük sağlanamazsa, kirişler eğilme göçme moduna ulaşmadan Vierendeel panel davranışı sebebiyle erken göçebilir. Bu durumda, kiriş sehimleri eğilme kaynaklı deformasyonların çok üstünde değere ulaşabilir. Mevcut çalışmanın en önemli amaçlarından biri de, farklı boyuna donatı oranlarına ve farklı boşluk çevresi donatı düzenlerine sahip betonarme kirişlerde kullanım yükü sehimlerinin değelerini araştırmak ve sehim sınırlarının aşılp aşılmadığını belirlemektir. Analizlerde göz önüne alınan temel değışkenler aşığıdaki gibidir:

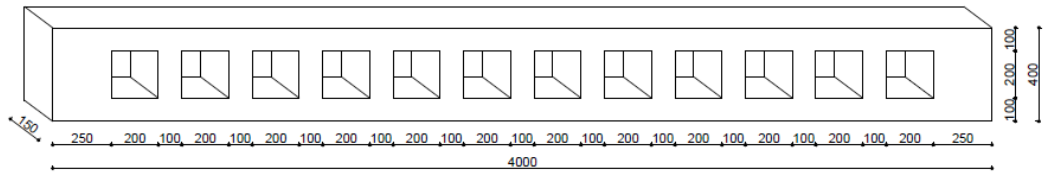
- a. Kirişlerin kare boşluklu veya boşluksuz oluşu,
- b. Kiriş boyuna donatı oranları,
- c. Dikmelerin etriyeli veya etriyesiz oluşu,

2. NÜMERİK MODELLERİN OLUŞTURULMASI

2.1. Modellenen Kirişlerin Özellikleri

Bu tez çalışmasının ilk aşamasında, Dünder [1] tarafından Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Mekaniği Laboratuvarında deneyleri gerçekleştirilen 6 adet düzenli gövde boşluklu ve referans boşluksuz betonarme kirişin (RBn, RBb, RRxn, RRxcn, RRxb, RRxcb) nümerik modelleri hazırlanmıştır. Bu kirişlerin özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- Kirişler, 1/2 geometrik ölçekte üretilmiştir.
- 2 adet referans kiriş ve 4 adet kare gövde boşluklu deney kirişi bulunmaktadır. Referans kirişler, boşluk içermemektedir. Referans kirişlerde (RBn ve RBb) gövde boşluğu bulunmamaktadır. Boşluklu kirişlerde (RRxn, RRxcn, RRxb ve RRxcb) ise kiriş açıklığı boyunca her biri 200x200 mm boyutunda 12 adet kare boşluk bulunmaktadır (Şekil 2.1). Boşluklar, merkez noktaları kiriş yüksekliğinin ortasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Boşluklar kirişin sağ ve sol serbest ucundan 250 mm ötede başlayıp, aralarında 100 mm mesafe kalacak şekilde yerleşmişlerdir.



Şekil 2.1. Kare boşluklu kirişler

- Tüm kirişler, 150x400 mm dikdörtgen kesite ve 4 m toplam uzunluğa sahiptir.
- Boyuna çekme donatısı miktarının davranış ve dayanım üzerindeki etkilerini belirlemek üzere deneylerde çok ve normal donatılı olmak üzere 2 tip donatı oranı kullanılmıştır. Çok donatılı kirişlerde donatı oranı 0.0094, normal donatılı kirişlerde 0.0052' dir.
- Boşluklar arasındaki dikmelerde etriye olup olmamasının davranış ve dayanım üzerine etkileri araştırılmıştır.
- Beton dayanımı ve donatı türü tüm kirişlerde sabit tutulup, deney değişik dahil edilmemiştir.
- Modellenen tüm boşluklu deney kirişleri çapraz donatı içermektedir. Ancak, nümerik modellerde karşılaşılan bazı zorluklar sebebiyle, bu çapraz donatılar modellere dahil edilmemiştir. Çapraz donatıların ihmal edilmesi deformasyonları attıracağı için, nümerik modellere bu donatıların katılmaması daha güvenli tarafta kalan sonuçlar vermektedir.

Analitik çalışmada göz önüne alınan kirişler ve özellikleri aşağıdaki gibidir:

- RBn – Normal boyuna donatı oranlı, boşluksuz referans kiriş
- RBb – Yüksek boyuna donatı oranlı, boşluksuz referans kiriş
- RRxn – Normal boyuna donatı oranlı, düzenli kare boşluklu, dikmelerde çapraz donatı bulunduran ve dikmelerde etriyesi bulunmayan kiriş
- RRxcn – Normal boyuna donatı oranlı, düzenli kare boşluklu, dikmelerde çapraz donatı ve etriye bulunduran kiriş
- RRxb – Yüksek boyuna donatı oranlı, düzenli kare boşluklu, dikmelerde çapraz donatı bulunduran ve dikmelerde etriyesi bulunmayan kiriş
- RRxcb – Yüksek boyuna donatı oranlı, düzenli kare boşluklu, dikmelerde çapraz donatı ve etriye bulunduran kiriş

Modellenen iki deney kirişi grubunun (normal ve yüksek boyuna donatı oranlı) boyuna donatı detayları, aşağıda kısaca özetlenmiştir:

Normal donatılı kirişler

En dış basınç donatı katmanında, kiriş boyunca uzanan 2Ø10 donatı kullanılmıştır. Kiriş kesme bölgelerinde (kirişin uç kısımlarında 1.5 metre uzunluğundaki bölgeler) en dış basınç donatı katmanında 2Ø10 donatıya ilave olarak 2Ø10 donatı daha kullanılmıştır. Boşlukların hemen altında ve üstünde ise kesme bölgelerinde toplam 4Ø10 ve kirişin geri kalan kısmında toplam 2Ø10 boyuna donatı kullanılmıştır. En dış çekme katmanında ise kirişin tüm uzunluğu boyunca uzanan 4Ø10 donatı mevcuttur. Boşluklu kirişlerde kiriş boyunca Ø10 çapraz donatı kullanılmıştır. RRxcn kirişinde dikmelerde Ø4/40 mm yatay etriyeler kullanılmıştır. RRxn kirişinde dikmelerde yatay etriye bulunmamaktadır. Referans RBn kirişinde, sıklaştırma bölgesinde (kiriş ucundan 800 mm içeri uzanan mesnet bölgesi) Ø4/40 mm ve açıklıkta ise Ø4/80 mm etriyeler kullanılmıştır.

Çok donatılı kirişler

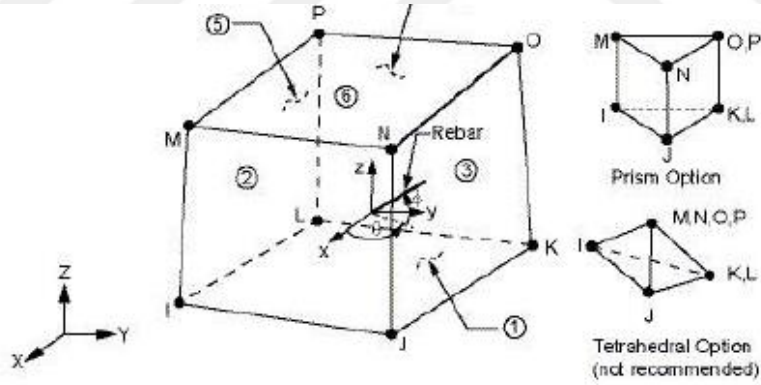
En dış basınç donatı katmanında, kiriş boyunca uzanan 2Ø12 donatı kullanılmıştır. Kiriş kesme bölgelerinde (kirişin uç kısımlarında 1.5 metre uzunluğundaki bölgeler) en dış basınç donatı katmanında 2Ø12 donatıya ilave olarak 3Ø12 donatı daha kullanılmıştır. Boşlukların hemen altında ve üstünde ise kesme bölgelerinde toplam 5Ø12 ve kirişin geri kalan kısmında toplam 2Ø12 boyuna donatı kullanılmıştır. En dış çekme katmanında ise kirişin tüm uzunluğu boyunca uzanan 5Ø12 donatı mevcuttur. Boşluklu kirişlerde kiriş boyunca Ø10 çapraz donatı kullanılmıştır. RRxcb kirişinde dikmelerde Ø4/40 mm yatay etriyeler kullanılmıştır. RRxb kirişinde dikmelerde yatay etriye bulunmamaktadır. Referans RBb kirişinde, sıklaştırma bölgesinde (kiriş ucundan 800 mm içeri uzanan mesnet bölgesi) Ø4/40 mm ve açıklıkta ise Ø4/80 mm etriyeler kullanılmıştır.

Bu detayların yanı sıra, tüm boşluklu kirişlerde üst ve alt kirişçiklerin uzunluğu boyunca Ø4/40 mm düşey kısa etriyeler kullanılmıştır. Ayrıca, boşluklu

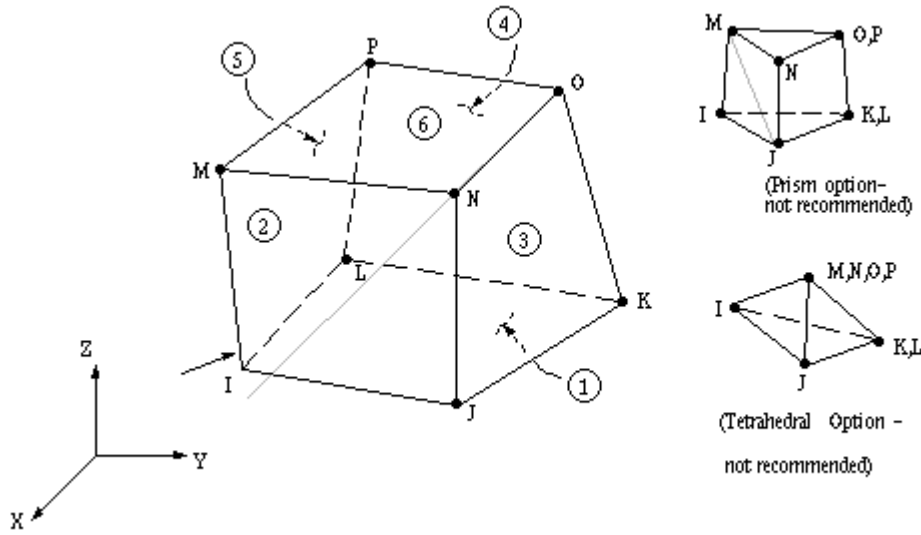
kirişlerde her boşluğun sağında ve solunda toplam 4Ø10 tam düşey etriye kullanılarak, boşluk çevresi kesme güvenliği artırılmıştır. Tüm boşluklu kirişlerde en son boşluk ile kiriş ucu arasında kalan boşluksuz bölgede iki ayaklı toplam 6Ø12 tam etriye kullanılmıştır. Tüm deney kirişlerinin donatı planı, kesitleri ve donatı pozları EK 1’de sunulmuştur [1].

2.2. Modellerde Kullanılan Sonlu Eleman Tipleri

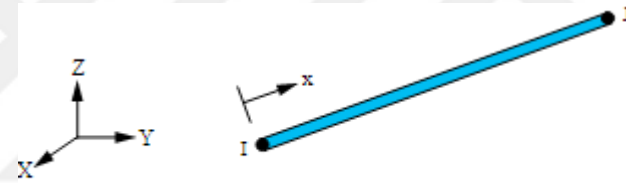
Bu tez çalışmasında analizler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Kirişlerin analizinde, genel amaçlı sonlu elemanlar paket programı olan ve mekanik problemlerin nümerik çözümünde kullanılan ANSYS sonlu elemanlar programı [15] kullanılmıştır. Modellerde, kirişler “Solid65” tipi elemanlarla (Şekil 2.2), kiriş yük takozları “Solid185” tipi elemanlarla (Şekil 2.3) ve donatılar “Link180” tipi elemanlarla (Şekil 2.4) modellenmiştir.



Şekil 2.2. Solid 65 elemanının şematik gösterimi



Şekil 2.3. Solid 185 elemanın şematik gösterimi



Şekil 2.4. Link 180 elemanı şematik gösterimi

ANSYS tarafında beton elemanların modellenmesi için “Solid65” elemanı geliştirmiştir. Bu eleman, 8 düğümlü hacimsel eleman olarak tanımlanmıştır. Bu elemanın x, y ve z olmak üzere üç ekseninde üç adet serbestlik derecesi bulunmaktadır. Bu eleman, plastik deformasyon, ezilme, kırılma, sünme gibi özelliklere sahip olduğu gibi, elemanın içerisine donatı ve üç farklı malzeme tanımlı yapılabilir. ANSYS’te seçilen her elemana ait bazı sınırlamalar ve kabuller bulunmaktadır. “Solid65” elemanının temel kabulleri aşağıdaki gibidir:

- Beton başlangıçta izotropik varsayılmıştır.
- Her bir düğüm noktasında birbirine dik üç eksenle çatlamaya izin verilmektedir [16].

“Solid 185” elemanı ise aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- Bu eleman sekiz düğüm ve ortotropik malzeme özellikleriyle tanımlanmaktadır.
- Düğümlerin her birinde üç serbestlik derecesi (x, y, z) bulunmaktadır.
- Plastisite, hiperelastisite, büzülme, yüksek deformasyon ve uzama kapasitelerine sahiptir [17].

Son olarak, “Link 180” elemanının temel özellikleri aşağıda verilmiştir:

- Her düğümde üç serbestlik derecesine sahip tek eksenli bir elemandır.
- Elemanın eğilmesi dikkate alınmaz.
- Plastisite, sünme, dönme, yüksek gerilme özellikleri bulunmaktadır.
- Elemanın uzunluğu sıfırdan büyük olmalıdır, bu yüzden I ve J düğümlerinde çakışma olmamalıdır.
- Kesit alanı sıfırdan büyük olmalıdır.
- Sıcaklığın eleman boyunca doğrusal olarak değiştiği varsayılmaktadır [18].

Modellerde, elastisite modülü, Poisson oranı, yoğunluk gibi malzeme özelliklerinin girilmesi gerekmektedir. Her malzeme modeline bir numara verilmiştir. Malzeme özelliklerinin girilmesi, seçilen malzemenin lineer ya da nonlineer olmasına bağlıdır. Lineer malzeme özelliklerinde malzemeye ait girilen değerler sabit ya da sıcaklığa bağlı olarak girilmektedir. Nonlineer malzeme özellikleri ise genelde çizelge şeklinde ve plastisite, sünme, genleşme, hiperelastik malzeme verileri olarak girilmektedir.

2.3. Kiriş Modellerinin Malzeme Tanımları

Kirişlerin nümerik modellerinde, DüNDAR [1] tarafından elde edilen deneysel malzeme dayanım değerleri kullanılmıştır. DüNDAR [1] tarafından yürütülen deneysel çalışmada, her dökümden alınan beton silindir numuneleri tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuş ve Çizelge 2.1’de verilen dayanım değerlerine ulaşılmıştır.

Çizelge 2.1. Deney elemanlarının beton silindir basınç dayanımı değerleri ve hesaplanan elastisite modülü değerleri (Mpa) [1]

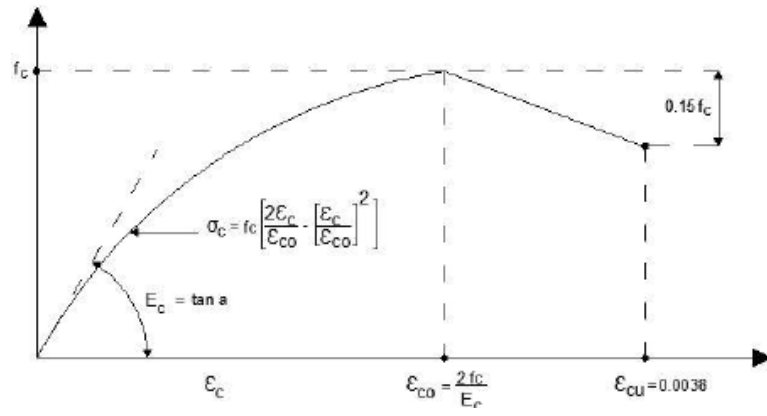
Deney Numarası	Deney Elemanı		
	RBn, RRxb, RRxcb	RRxn, RRxcn	RBb
1	29,48	30,39	32,54
2	24,16	24,05	32,54
3	26,94	23,77	35,08
4	28,86	28,75	28,69
5	20,71	25,69	33,95
6	21,45	30,84	-
7	29,71	30,39	-
8	25,86	21,73	-
9	27,78	-	-
10	30,61	-	-
Ortalama Basınç Day. (MPa)	26,56	26,95	32,56
Elastisite Modülü (MPa)	30750	30872	32546

Silindir deneyleri sonucu belirlenen beton ortalama basınç dayanımı değerlerinin TS 500’de [19] verilen aşağıdaki formülde kullanılmasıyla, beton elastisite modülü (E_c) değerleri elde edilmiştir:

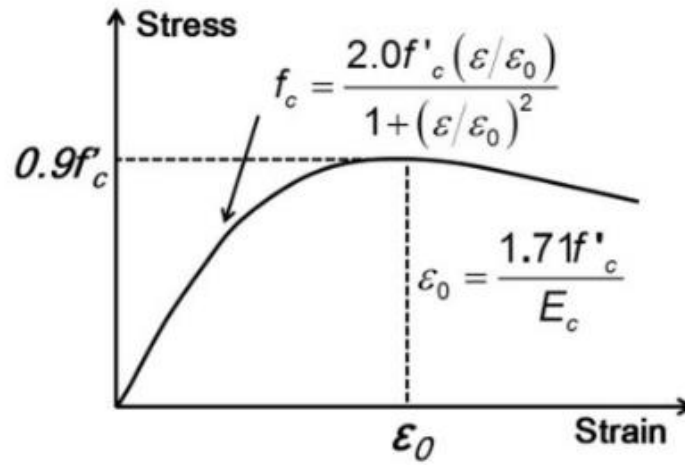
$$E_c = 3250 \cdot \sqrt{f_{ckj}} + 14000 \text{ MPa} \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte f_{ckj} , MPa cinsinden j günlük betonun basınç dayanımını göstermektedir. Betonun poisson oranı TS500 [19] Bölüm 3.3.3.2 e göre 0.20 kabul edilmiştir. Bu çalışmada, Hognestad beton modeli (Şekil 2.5) kullanılmıştır [20]. Bu modelin ilk kısmı (artan bölüm), ikinci derece bir parabolüdür. Maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalma ($\epsilon_{co}=2f_c/E_c$), normal dayanımlı betonda yaklaşık olarak $\epsilon_{co}=0,002$ alınabilmektedir. Şekil 2.5'te de görüldüğü gibi gerilme-birim deformasyon eğrisinin artan kısmında gerilme ile birim deformasyon arasında parabolik artan ve eğrinin azalan kısmında doğrusal azalan bir ilişki bulunmaktadır. Hognestad beton modelinin denklemlerini kullanarak, Çizelge 2.1'de verilen üç farklı beton dökümü grubu için Çizelge 2.2'de verilen gerilme-birim deformasyon eğrisi değerleri elde edilmiştir. Bu çizelgelerde de görüleceği üzere, ϵ_{co} birim deformasyon değerinin ötesinde Hognestad eğrisinin doğrusal azalan kısmını ifade eden bağıntı kullanılmamış, bunun yerine gerilmenin sabit kaldığı varsayılmıştır. Bu eğrinin azalan kısmının sonlu eleman analizlerinde kullanılması durumunda program hata verdiği için, bu kısmın modellerde kullanılması mümkün olmamaktadır. Bu sebeple, elemanların yük-deplasman eğrilerinin azalan kuyruk kısımları nümerik olarak elde edilememekte ve nümerik eğriler maksimum yük değerinde sona ermektedir.

Betona ait özellikler, “linear isotropic” bölümünden betonun elastisite modülü ve poisson oranı, “multilinear isotropic” bölümünden gerilme şekil değiştirme değerleri, “concrete” bölümünden ise betona ait karakteristik özellikler olacak şekilde tanımlanmıştır (Şekil 2.7 ve 2.8).



Şekil 2.5. Hognestad beton modeli [20]



Şekil 2.6. Todeschini beton modeli [21]

Çizelge 2.2. Gerilme-Birim Deformasyon Eğrisi Değerleri

Kiriş Grubu	E_c (Mpa)	ϵ	σ (MPa)
RBn, RRxb, RRxcb	30750	0,0005	15,375
		0,0010	19,917
		0,0015	24,896
		0,0020	26,556
		0,0025	26,556
		0,0030	26,556
		0,0035	26,556
RRxn, RRxcn	30872	0,0005	15,4361
		0,0010	20,2134
		0,0015	25,2668
		0,0020	26,9513
		0,0025	26,9513
		0,0030	26,9513
		0,0035	26,9513
RBb	32546	0,0005	16,2732
		0,0010	24,4238
		0,0015	30,5297
		0,0020	32,5650
		0,0025	32,5650
		0,0030	32,5650
		0,0035	32,5650

Betonun davranışını tanımlamak için ANSYS içerisinde bulunan Willam - Warnke modeli kullanılmıştır. Bu modelde betonun davranışını etkileyen 4 önemli parametre bulunmaktadır. Bu parametreler ve anlamları aşağıda verilmektedir:

- Open Shear Transfer Coefficient: Açık çatlak için kayma transfer katsayısı

Linear Isotropic Properties for Material Number 3

Linear Isotropic Material Properties for Material Number 3

	T1
Temperatures	0
EX	32546
PRXY	0.2

Add Temperature Delete Temperature Graph

OK Cancel Help

Şekil 2.7. Betona ait elastisite ve poisson oranlarının tanımlanması

Multilinear Isotropic Hardening for Material Number 3

Multilinear Isotropic Hardening for Material Number 3

Stress-Strain Options Stress versus Total Strain

	T1	0
	STRAIN	STRESS
1	0.0005	16.273
2	0.001	24.424
3	0.0015	30.529
4	0.002	32.565
5	0.0035	32.565

Add Temperature Delete Temperature Add Point Delete Point Graph

OK Cancel Help

Şekil 2.8. Betona ait gerilme ve birim deformasyon değerlerinin tanımlanması

- Closed Shear Transfer Coefficient: Kapalı çatlak için kayma transfer katsayısı
- Uniaxial Craking Stress: Tek eksenli çekme dayanımı
- Uniaxial Crushing Stress: Tek eksenli basınç dayanımı

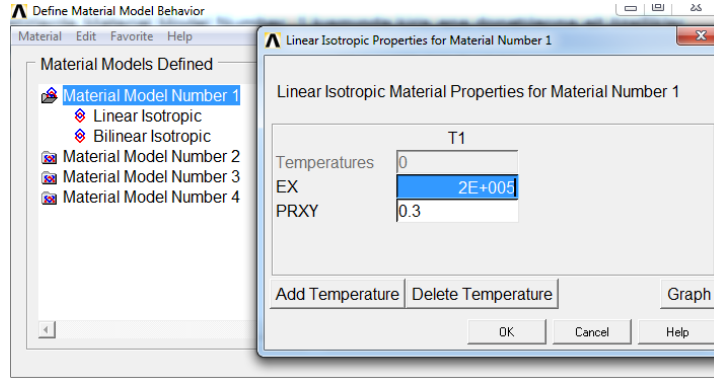
Açık ve kapalı çatlak için kayma transfer katsayısı, 0 - 1 arasında değişen değerler alabilir. Katsayının 0 olması, çatlağın düzgün yüzeyli bir çatlak olduğunu ve yüzeyler arasında bir transfer olmayacağını belirtir. Katsayının 1 olması durumunda ise, pürüzlü bir çatlak olduğu ve yüzeyler arasında tam bir iletimin ortaya çıktığı anlaşılır. Bu tez çalışmasında, modellenen kirişlerde açık kayma transfer katsayısı 0.25 ve kapalı transfer kayma katsayısı 1 olarak kabul edilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı değeri yakınsama hatalarının engellenmesi için “-1” olarak girilmiştir.

Deney elemanlarında Ø12, Ø10, Ø6 ve Ø4 donatılar kullanılmıştır. Ø12 ve Ø10 donatılar, S420 nervürlü donatılardır. Ø6 ve Ø4 donatıları ise, S220 düz yüzeyli donatılardır. Donatılar çekme deneyine tabi tutulup dayanımları elde edilmiştir. Bu çekme deneylerinin sonuçları, Çizelge 2.3'te sunulmuştur.

Çizelge 2.3. Donatı numunelerinin deney sonuçları

Numune Donatı Çapı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Ø10	473	692
Ø10	471	689
Ø10	479	700
Ø10	488	704
Ø10	460	688
Ø10	485	710
Ø12	557	652
Ø12	547	644
Ø12	551	644
Ø12	548	643
Ø12	551	646
Ø12	549	647

Çeliğin elastisite modülü TS500 [19] Bölüm 3.2'ye göre, 2×10^5 MPa alınmıştır. Çeliğin poisson oranı 0.3 alınmıştır (Şekil 2.9). Donatıların akma dayanımı, yapılan çekme deneyinden elde edilen sonuçların ortalama değerinden elde edilmiştir. Etriyeler düz yüzeyli olduklarından ve düz yüzeyli donatılar için elde numune deney sonuçları bulunmadığından [1], bu donatıların akma dayanımı 220 MPa alınmıştır.



Şekil 2.9. Donatıya ait elastisite modülü ve poisson oranı tanımının yapılması

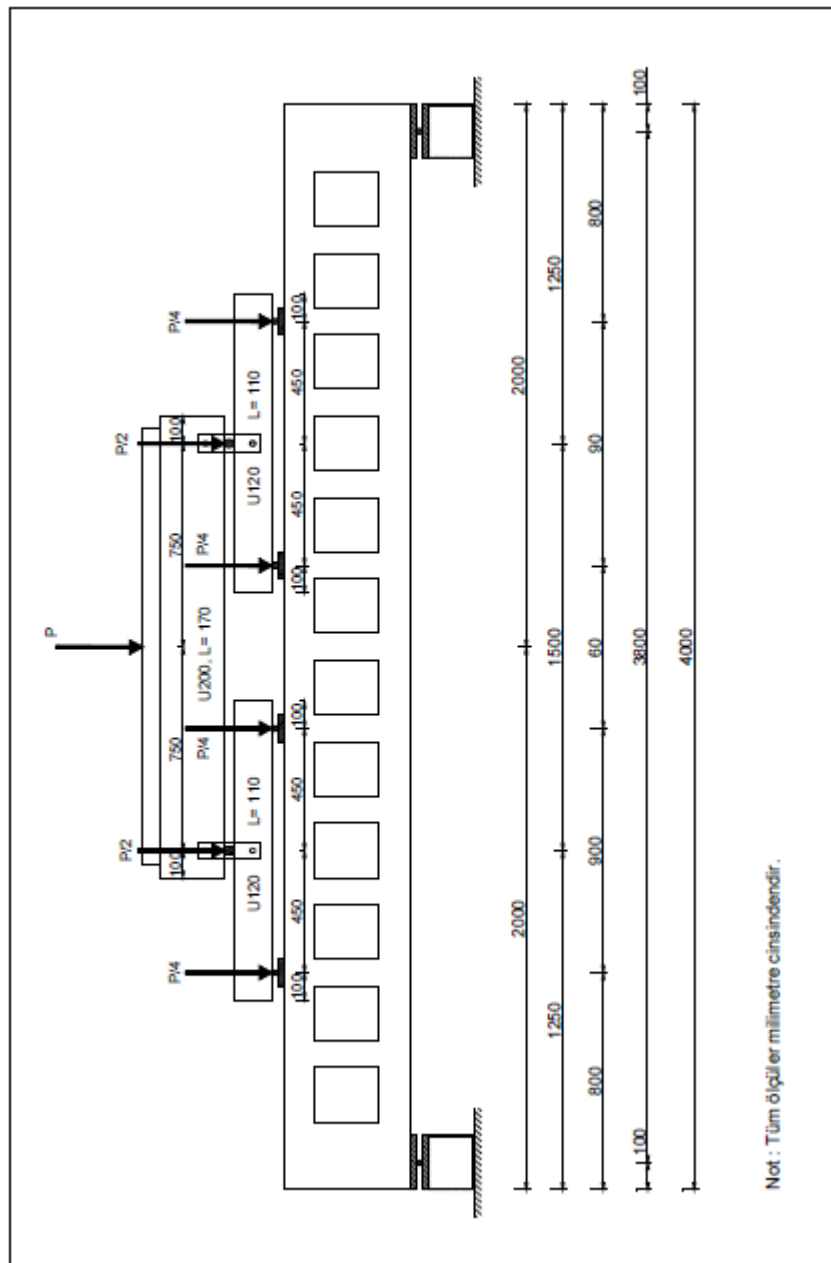
Donatı malzemesinin tanımı için tek doğrulu izotropik (“Linear Isotropic”) ve iki doğrultulu izotropik (“Bilinear Isotropic Hardening”) malzeme modelleri kullanılmıştır. Tek doğrulu izotropik malzeme tanımı için girilen elastisite modülünün, iki doğrulu izotropik malzeme tanımı için girilen gerilme – şekil değiştirme eğrisinin ilk eğimi ile aynı olması gerekmektedir. Deney sisteminde yükleme noktalarında betonun aniden ezilmesini önlemek amacıyla kullanılan 1700 mm uzunluğundaki kutu profiller de modelde tanımlanmıştır. Bu profillerin elastisite modülü 2×10^5 Mpa ve poisson oranı ise 0.3 alınmıştır.

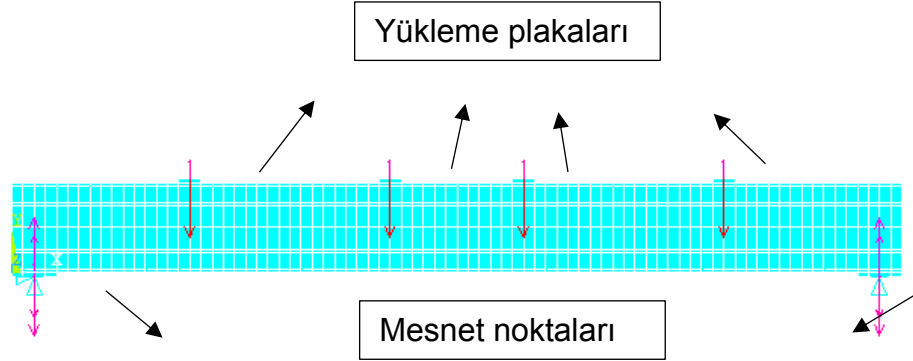
2.4. Deney Düzeneğinin Modellenmesi

Deney düzeneğinde yükleme sistemi tasarlanırken iki ucundan basit kiriş gibi düşünülüp kirişte basit eğilme etkisinin yaratılması amaçlanmıştır. Deney elemanında profillerin orta noktasından yükleme yapılmış olup, hareketli ve sabit mesnetler yardımıyla yük hidrolik silindirden kirişe dört noktada iletilecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 2.10). Bu şekilde kirişler, dört noktalı yüklemeye (altı noktalı eğilmeye) maruz bırakılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde de, yük kirişe dört noktada (kiriş sol ve sağ ucundan 800 ve 900’ar mm uzaklıkta noktalarda) uygulanmıştır (Şekil 2.11). Dündar [1], bu yük uygulama noktalarını seçerken, kirişte bu yükleme düzeni altında ortaya çıkan eğilme

momenti diyagramının açıklık boyunca düzgün yayılı yükleme altında ortaya çıkan eğilme momenti diyagramına olabildiğince yakın olması esasına göre hareket etmiştir.



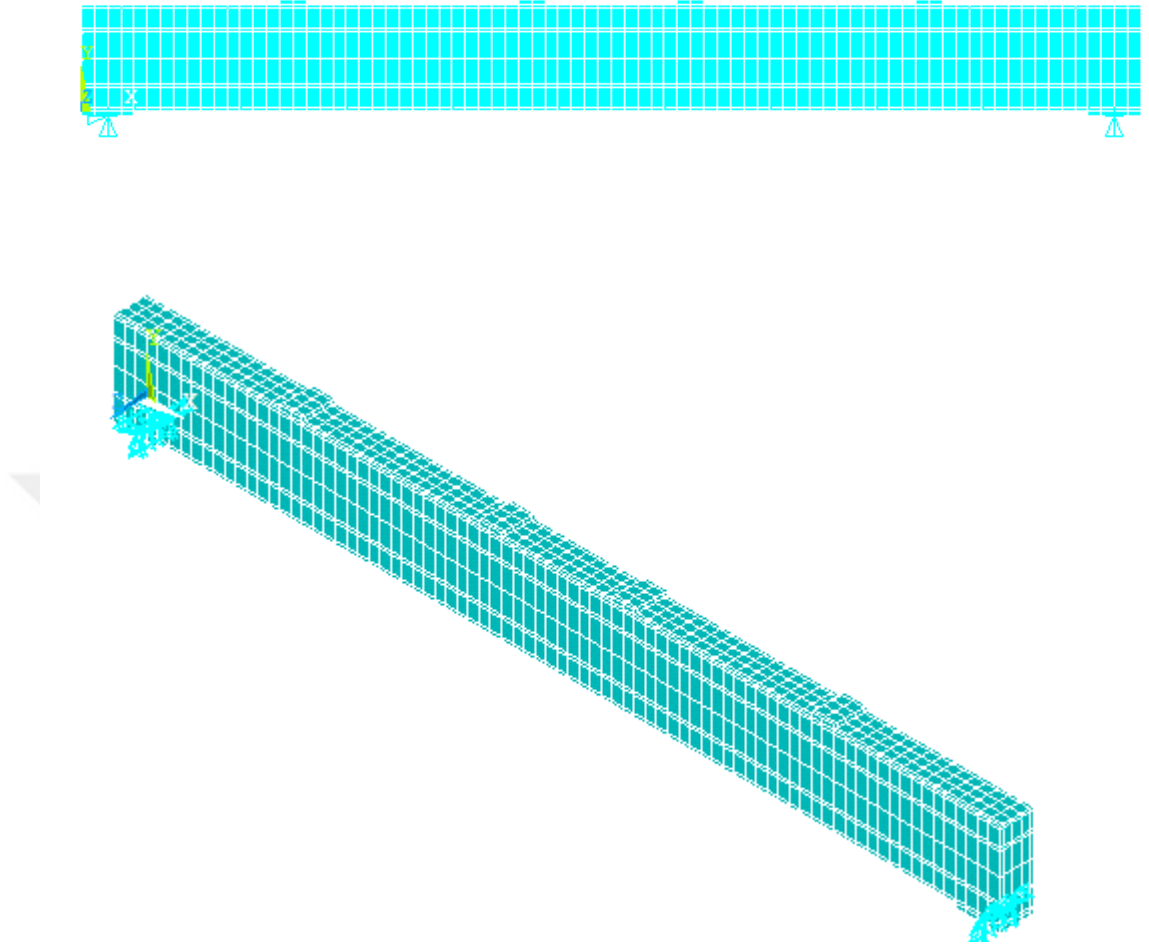




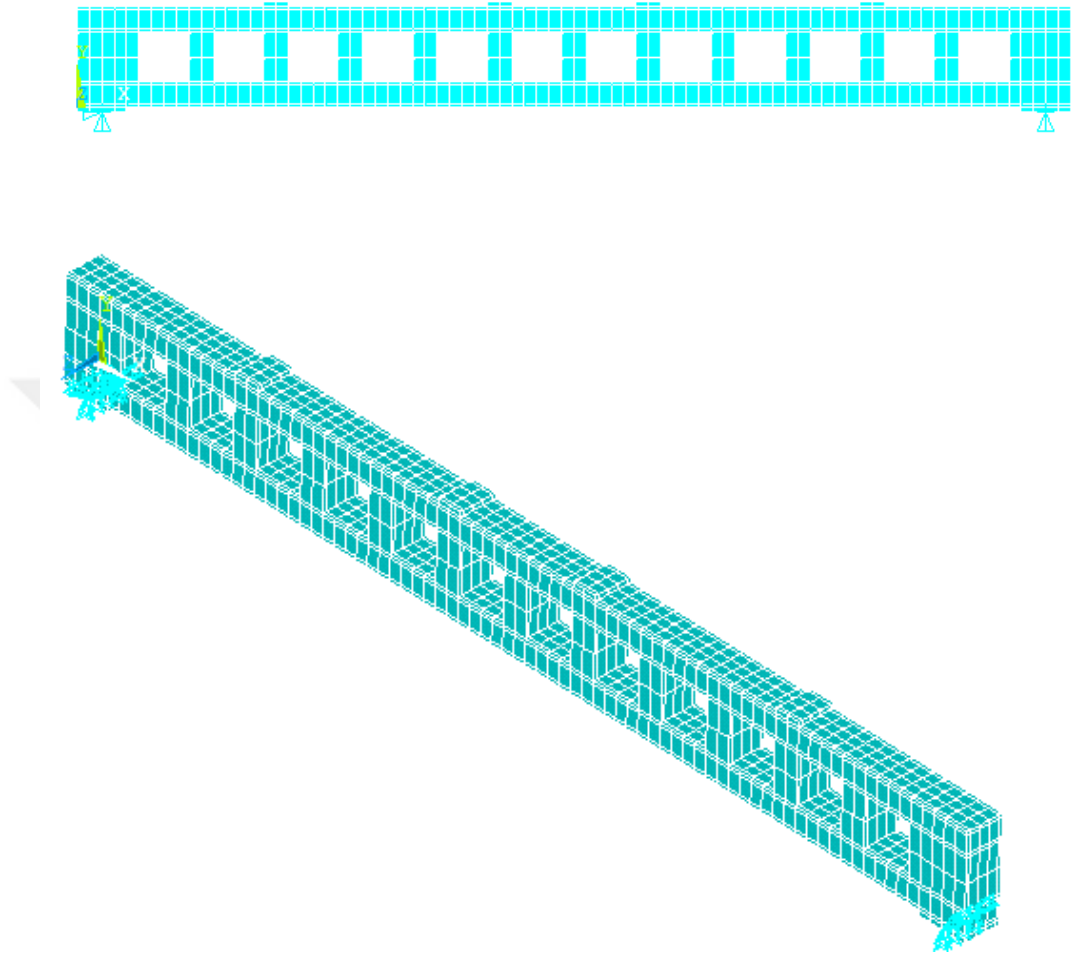
Şekil 2.11. Yükleme düzeneğinin model üzerinde gösterimi

2.5. Kiriş Modellerinin Hazırlanması

Geometrik modelleme aşamasında ilk adım olarak kilit noktaları (key points) tanımlanmıştır. Daha sonra, bu noktalar yardımıyla çubuk elemanlar oluşturulmuştur. Çubuk elemanlar yardımıyla alanlar elde edilip ve bu alanlar yardımıyla da hacimler belirlenmektedir. Mevcut çalışmada, donatı yerleşimleri ve adetleri baz alınarak dikdörtgen prizmaları oluşturulmuştur. Boşluksuz referans kirişler için toplamda 4506 düğüm noktası x, y, z yönleriyle tanımlanmıştır. Bu düğüm noktaları birleştirilerek katı kiriş modeli oluşmuştur. Kare boşluklu kirişler ise, referans kirişlerden (Şekil 2.12) eleman silinmesiyle (boşluklar) oluşturulmuştur (Şekil 2.13).



Şekil 2.12. Referans kiriş modeli

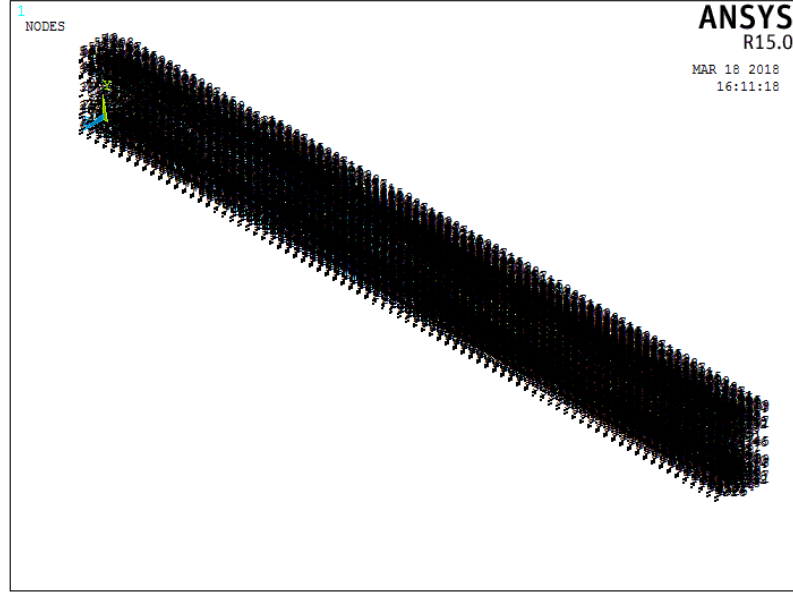


Şekil 2.13. Gövde boşluklu kiriş modeli

4000 mm uzunluğunda, 400x150 mm kesitinde bir kirişi oluşturmak amacıyla başlangıçta 6 adet düğüm noktası oluşturulmuştur (Şekil 2.14). z doğrultusundaki 150 mm'lik düğüm sistemi elde edildikten sonra, bu noktalar kopyalanarak y doğrultusundaki 400 mm'lik sistem elde edilmiştir.

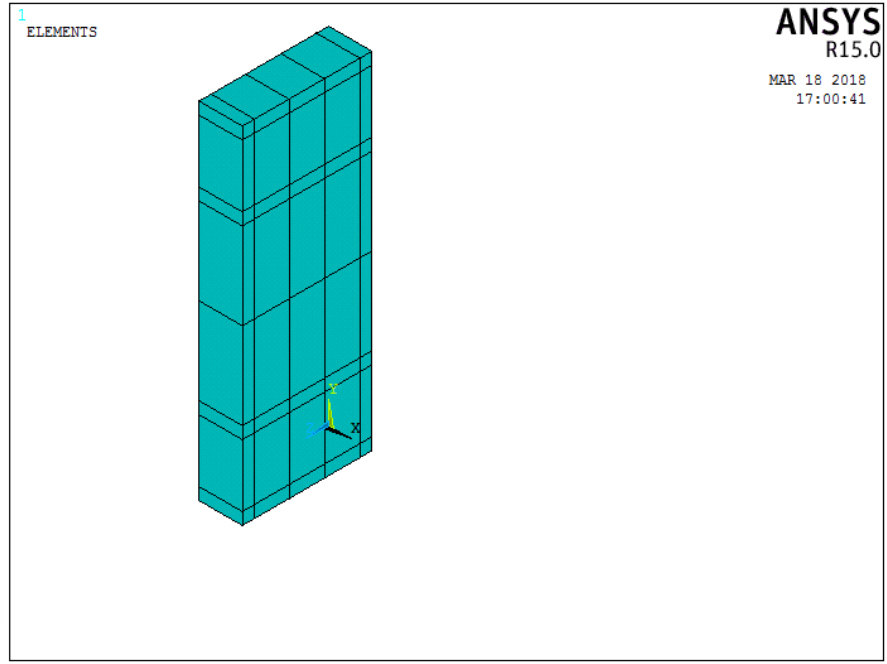


Şekil 2.14. z doğrultusunda oluşturulan düğüm noktalarının görünüşü

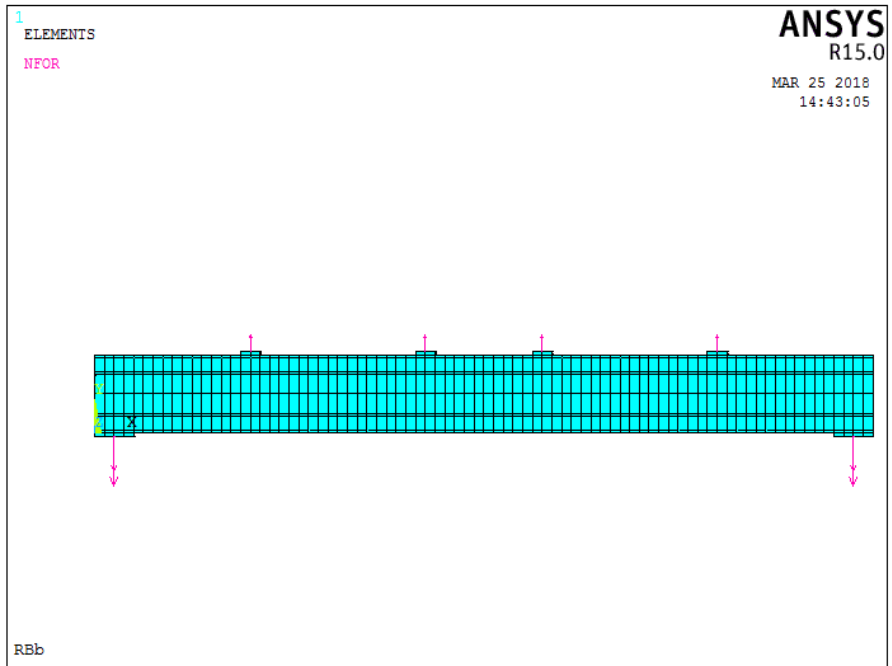


Şekil 2.15. Tüm düğüm noktalarının gösterilmesi

Noktalar oluşturulduktan sonra, belirli bir yön kabulü ile her 8 düğüm noktası birleştirilerek, beton elemanı tipiyle 50 mm uzunluğundaki bir kiriş parçası oluşturulmuştur. Daha sonra, elemanlar kopyalanarak 4000 mm uzunluğundaki kirişin bütünü teşkil edilmiştir (Şekil 2.15).

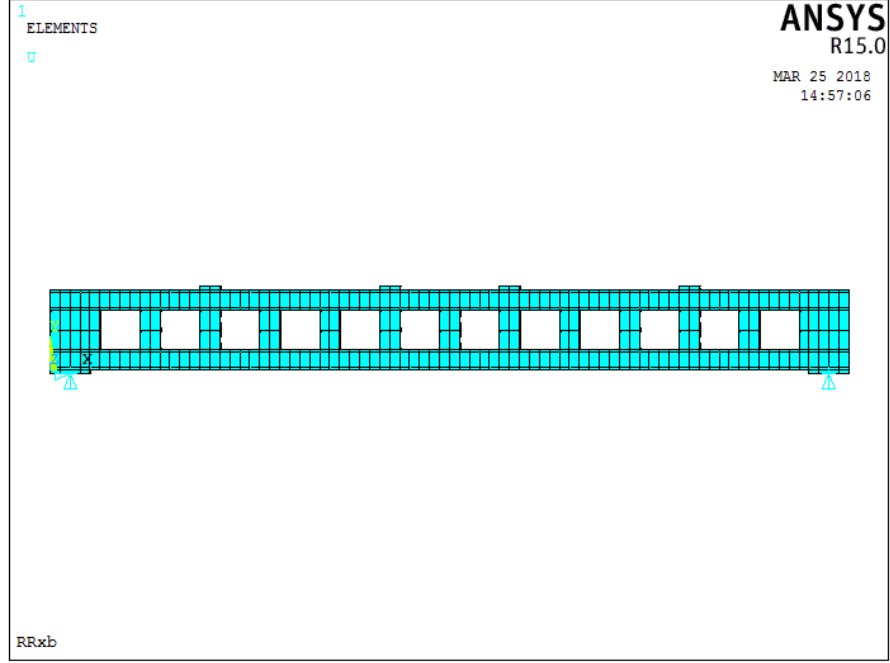


Şekil 2.16. 50 mm'lik kiriş parçası

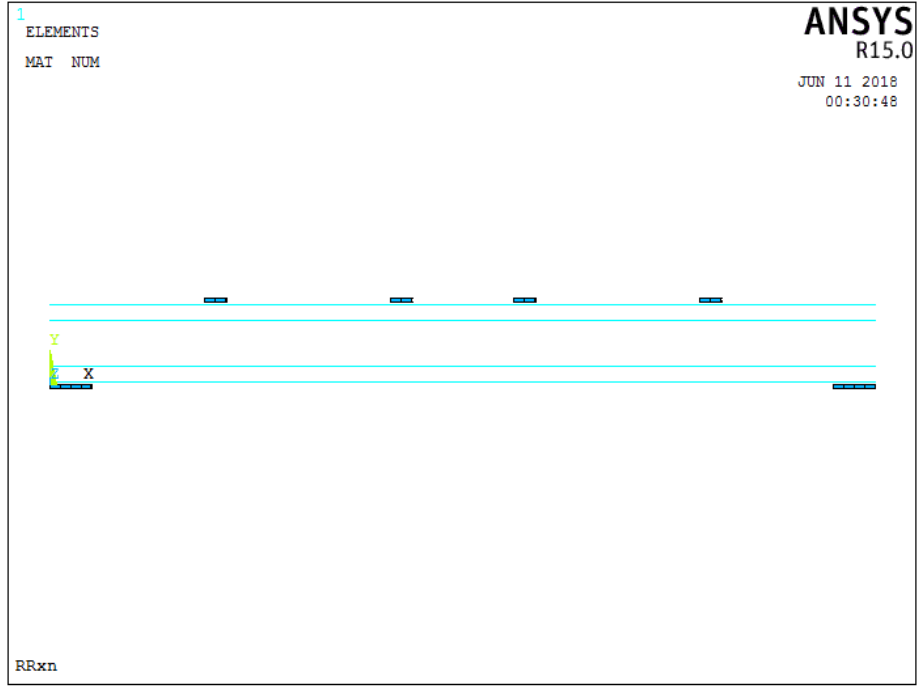


Şekil 2.17. Kirişin bütünü oluşturulan sonlu elemanlar

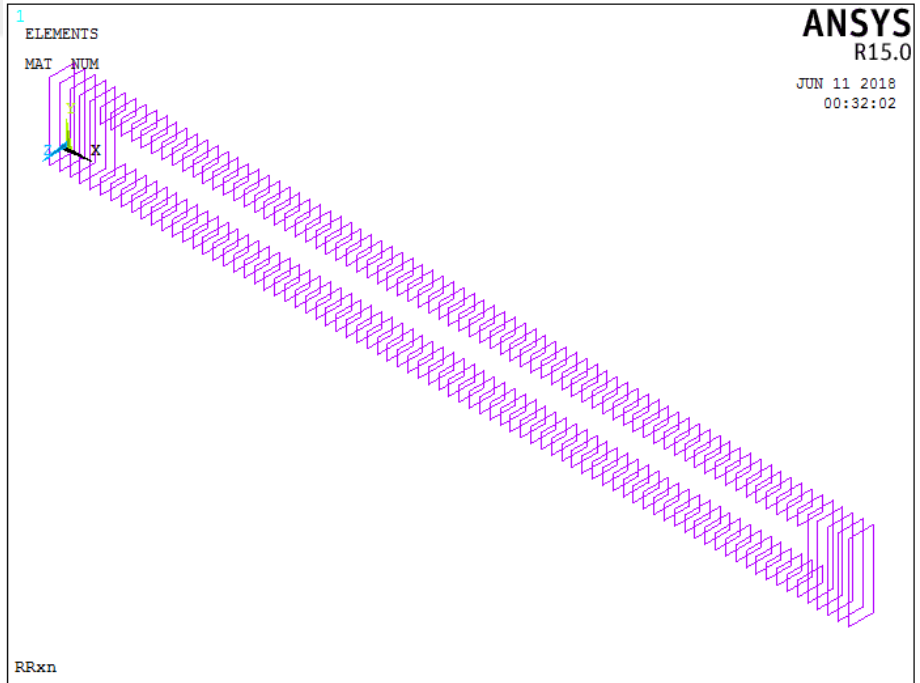
Gövde boşluklu kirişler de, dolu gövde kirişlerden 200 x 200 mm kesitinde boşluklar içerisinde kalan elemanların silinmesiyle elde edilmiştir (Şekil 2.18). Kirişler oluşturulduktan sonra, kiriş üzerinde sabit ve kayıcı mesnetler ile kiriş boyuna donatıları (Şekil 2.19) ve etriyeleri (Şekil 2.20-2.22) tanımlanmıştır.



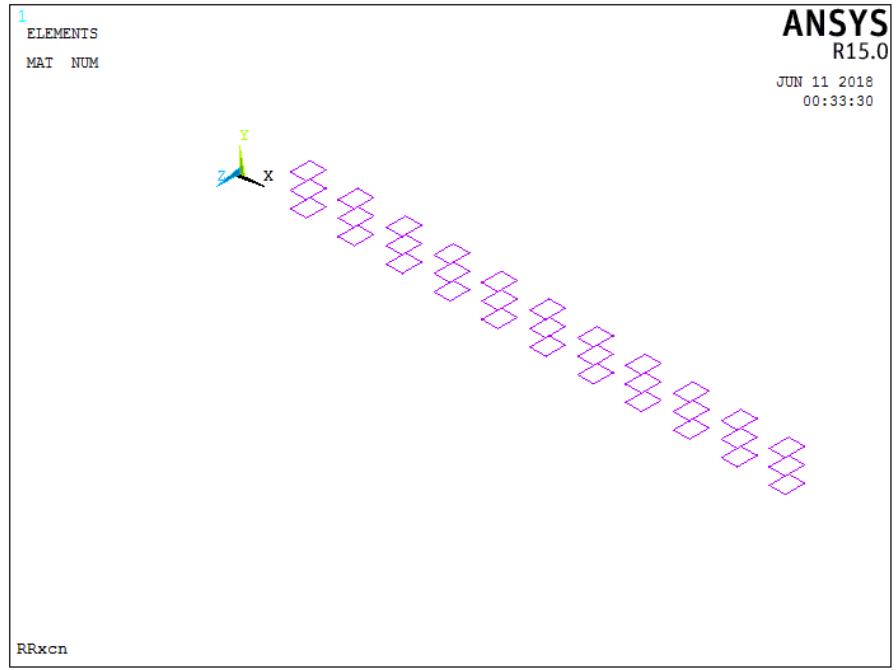
Şekil 2.18. Kare boşluk oluşturulan kirişin görünüşü



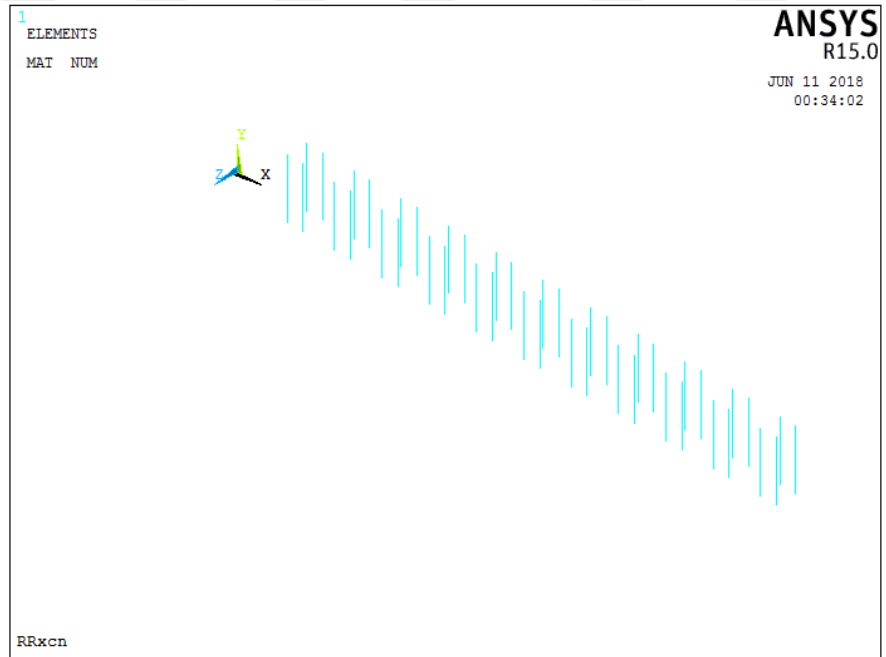
Şekil 2.19. Kiriş üzerindeki mesnet noktaları ve boyuna donatılar



Şekil 2. 20. Kiriş üst ve alt kirişçik etriyelerinin gösterimi



Şekil 2.21. Dikme etriyelerinin gösterimi



Şekil 2.22. Boşluk kenarı düşey etriyelerin gösterimi

2.6. Analiz Detayları

ANSYS [15] sonlu elemanlar programı aşağıdaki farklı analiz çeşitlerinin yapılmasına olanak sağlamaktadır:

1-) Statik Analiz: Doğrusal veya doğrusal olmayan analizler yapılarak, statik yüklemeler altında gerilme ve yer değiştirmelerin hesaplandığı yöntemdir.

2-) Modal Analiz: Bir yapının titreşim karakteristiklerini belirlemek için kullanılır.

3-) Harmonik Analiz: Bir yapının ayrı zaman-yük durumlarındaki harmonik davranışı hesaplanmaktadır.

4-) Davranış Spektrumu Analizi (Response-spectrum Analysis): Yapının deprem, rüzgar yükü gibi zamana bağlı yükler altında nasıl tepki vereceğini belirlemek için kullanılır.

5-) Süreksiz (Transient) Analiz: Tasarımın zamana bağlı değişen yüklere verdiği yanıtı hesaplamak için kullanılır. Yapının istenilen sürede ve değişen yük durumlarındaki davranış hesaplanmaktadır.

6-) Özdeğer Burkulma Analizi (Eigenvalue Buckling Analysis): İdeal bir elastik yapının teorik burkulma kuvvetini tahmin eder. Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan burkulma analizi yapar.

Bu çalışma kapsamında transient analiz yapılarak, kirişlerin deneysel yük-deplasman eğrilerinin maksimum yüke kadar olan artan bölümleri nümerik olarak tahmin edilmeye çalışılmıştır.

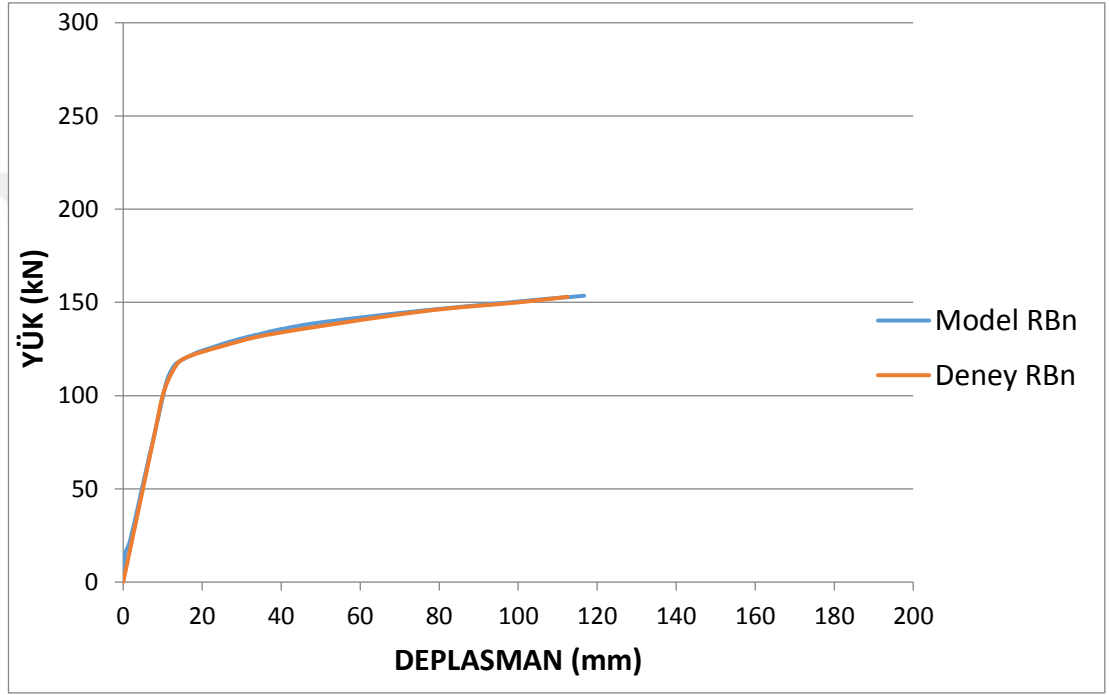
Yapılan deneylerden elde edilen yük- deplasman eğrileri baz alınarak boyuna donatının ilk aktığı yük değerleri de belirlenmiştir. Buna göre, RBn, RBb, RRxn,

RRxcn, RRxb ve RRxcb kirişlerinde çekme donatısının ilk aktığı yük değerinin sırasıyla 151, 250, 151, 170, 235 ve 250 kN olduğu belirlenmiştir.

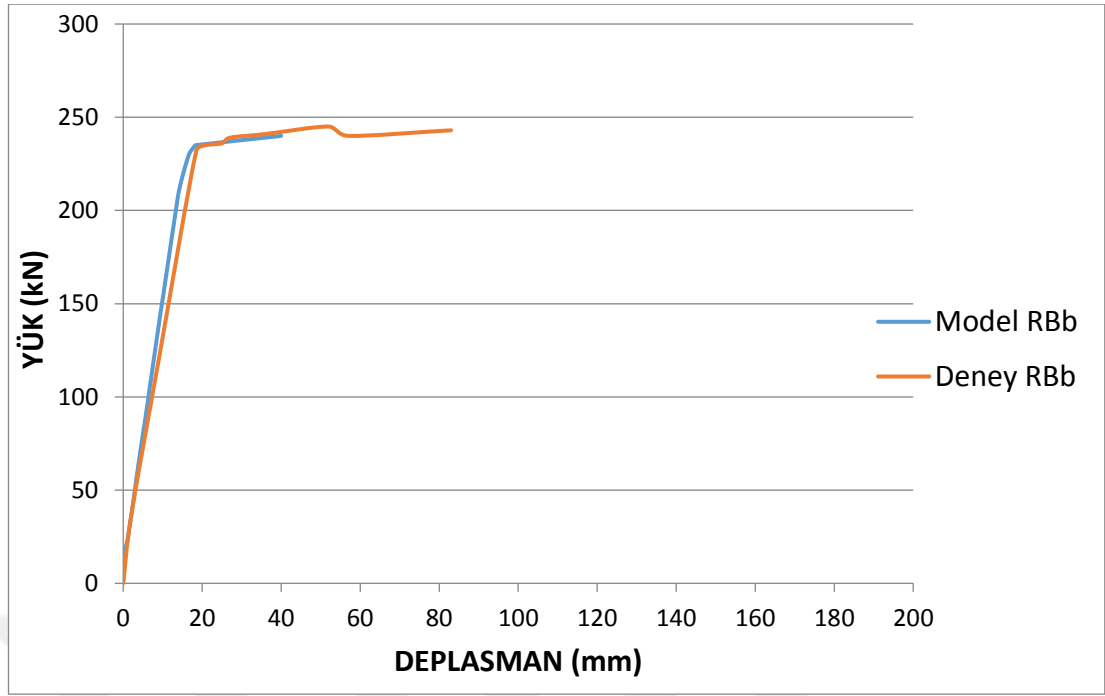


3. DENEYSEL VE NÜMERİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

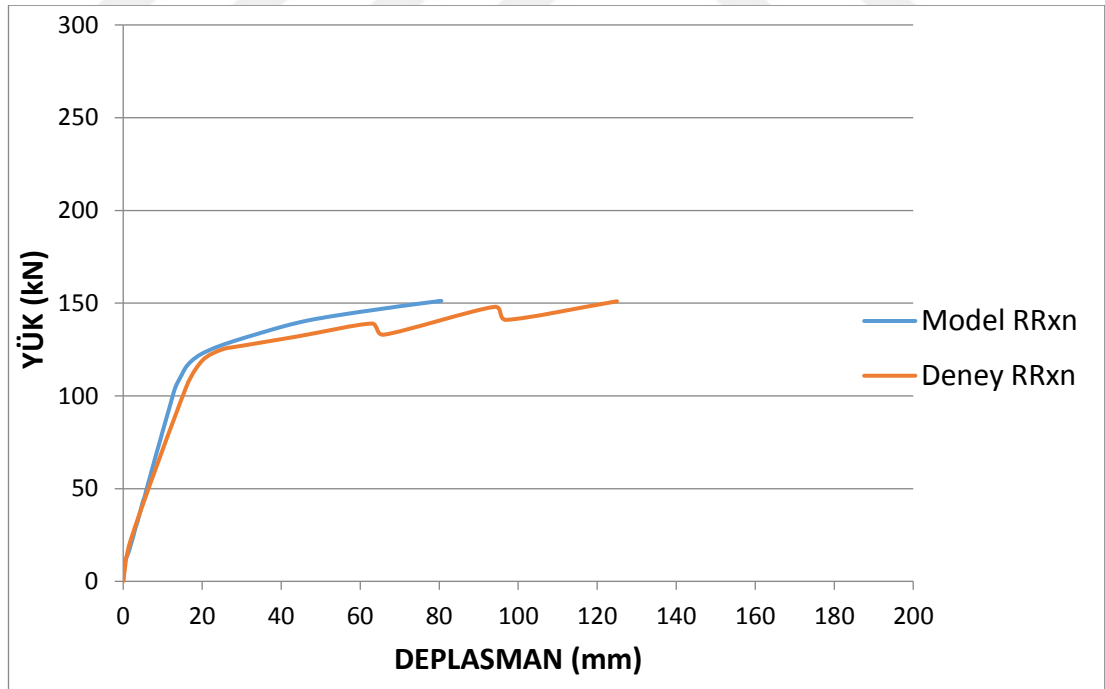
Önceki bölümde anlatılan detaylara göre hazırlanan nümerik modellerin analizi sonucu, deneysel yük deplasman eğrileri ile son derece uyumlu nümerik yük-deplasman eğrileri (Şekil 3.1-3.6) elde edilmiştir.



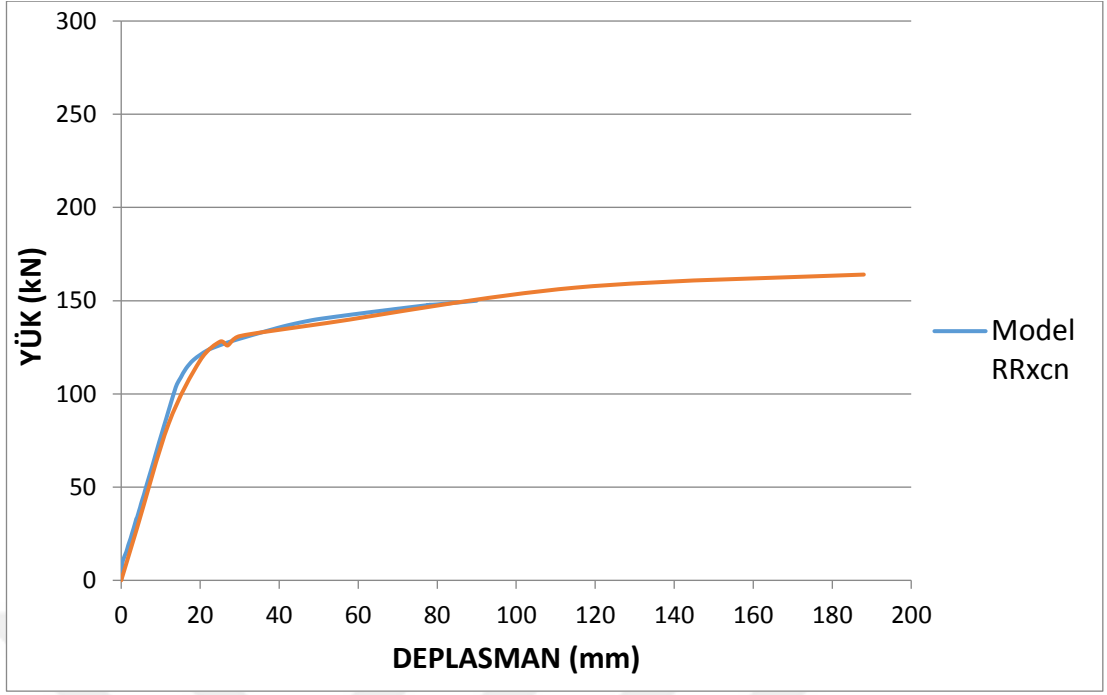
Şekil 3.1. RBn elemanın nümerik ve deneysel yük-deplasman eğrileri



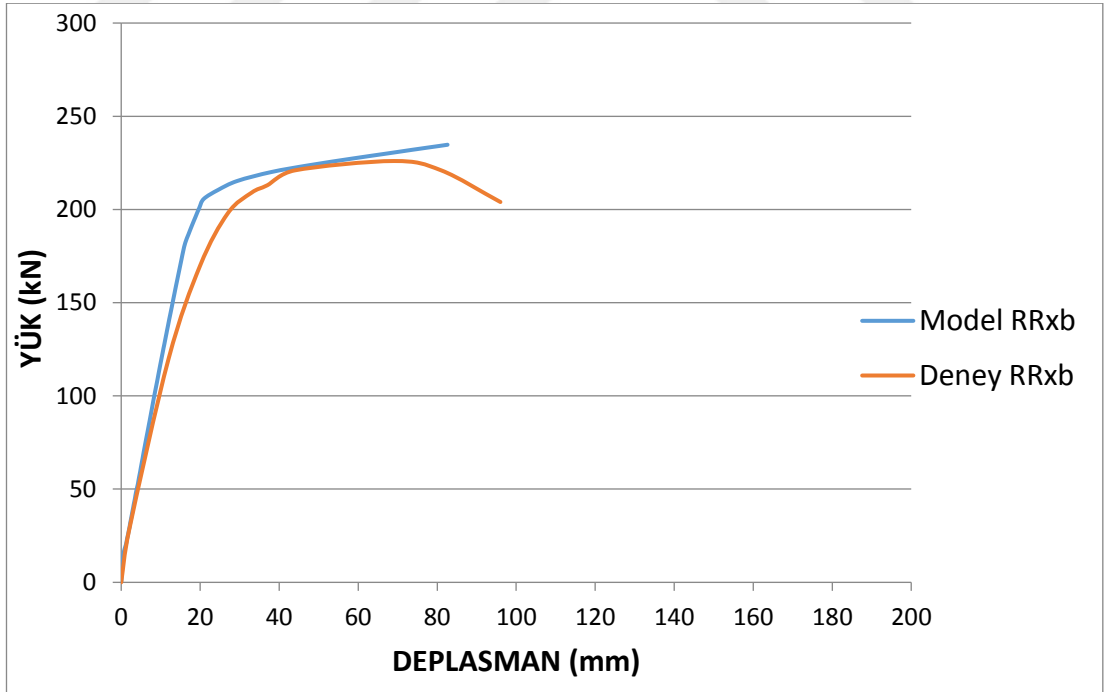
Şekil 3.2. RBb elemanının nümerik ve deneysel yük-deplasman eğrileri



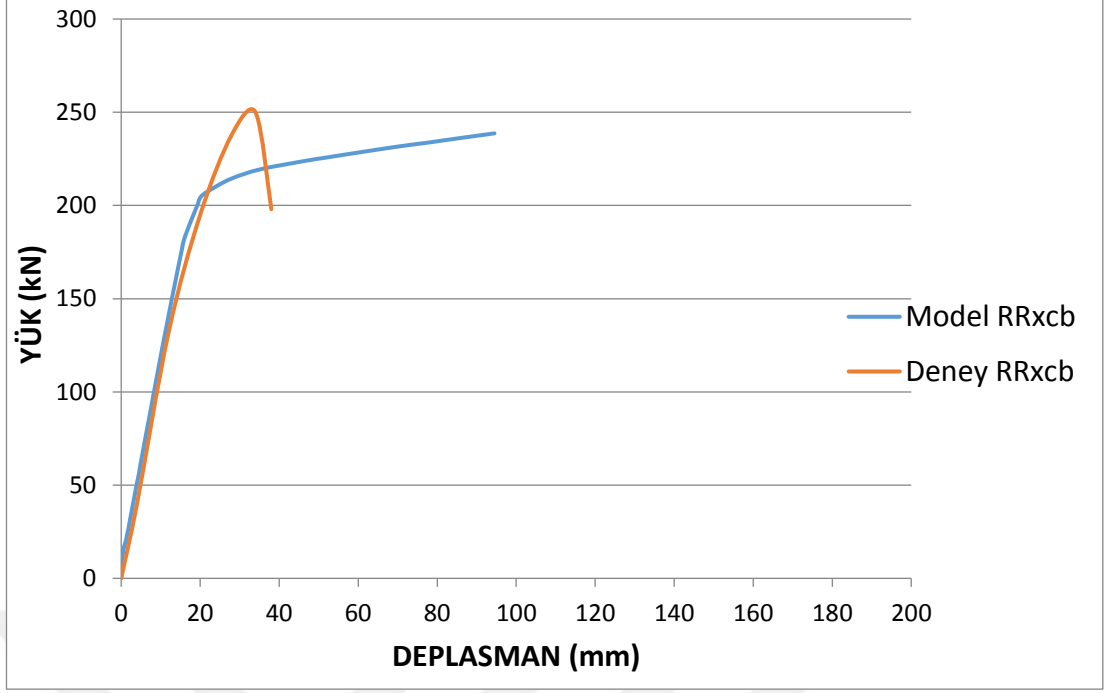
Şekil 3.3. RRxn elemanının nümerik ve deneysel yük-deplasman eğrileri



Şekil 3.4. RRxcn elemanının nümerik ve deneysel yük-deplasman eğrileri



Şekil 3.5. RRxb elemanının nümerik ve deneysel yük-deplasman eğrileri



Şekil 3.6. RRxcb elemanının nümerik ve deneysel yük-deplasman eğrileri

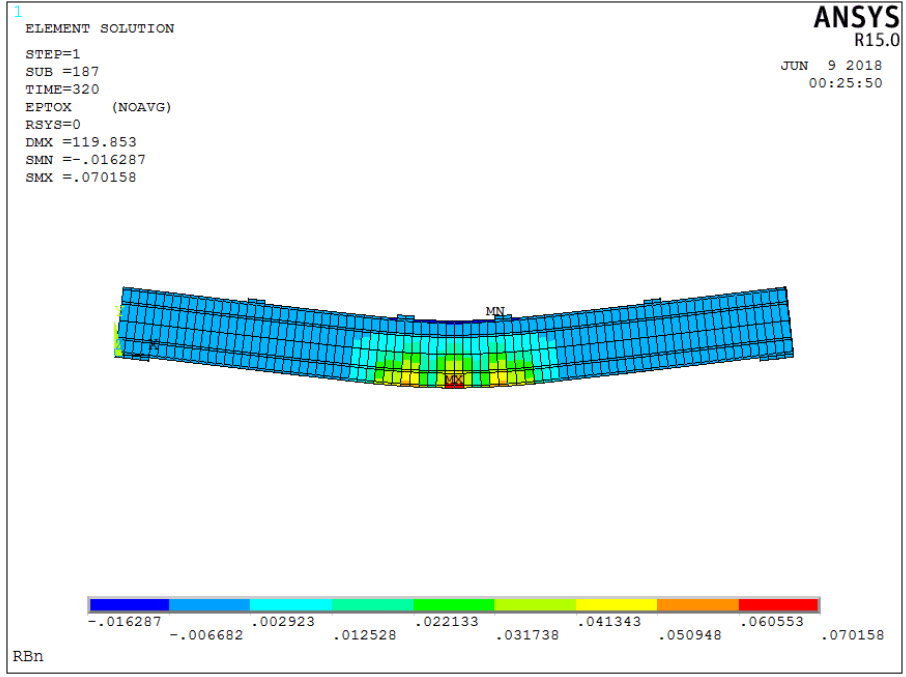
Grafikler incelendiğinde, sadece RRxcb elemanında deneysel ve nümerik eğriler arasında önemli bir farklılık olduğu belirlenmiştir. Eğriler arasındaki uyumun tam olarak anlaşılabilmesi için, elemanların deneysel göçme modları [1] ve sonlu eleman analizlerinde maksimum yükte ulaştıkları gerilme ve birim deformasyon durumları Şekil 3.7-3.24'te gösterilmiştir. RRxcb elemanı yüksek donatı oranına sahip olduğu için, bu elemanın eğilme moment kapasitesi de normal donatılı elemanlara göre yüksektir. Şekil 3.22'de de görüldüğü gibi bu eleman, eğilme kırılmasına uğramadan önce kesme altında diyagonal gövde betonu ezilmesi ("diagonal web crushing failure") sonucu göçmüştür. Bu kesme kırılması çeşidinde, boşlukların altındaki ve üstünde kirişçiklerden biri veya birkaçı kesme sonucu göçmekte, kirişçiklerdeki çapraz ezilme kapasitesi kesme kuvvetlerini karşılamakta yetersiz kalmakta ve kiriş, henüz eğilme kapasitesine ulaşmadan düşük yük seviyelerinde yük taşıyamaz hale gelmektedir. Şekil 3.23 ve 3.24'te de görüleceği üzere, sonlu eleman analizleri bu erken göçme modunu tahmin edemedikleri için, deneysel ve nümerik eğriler

arasında önemli bir farklılık ortaya çıkmıştır. Ancak, iki eğri arasında yük kapasitesi ve başlangıç rijitliği açısından önemli bir farklılık bulunmadığından, bu farklılık çalışmanın geri kalanında ihmal edilmiştir. Son olarak, Vierendeel tipi kesme kırılması sebebiyle kirişçiklerinde plastik mafsallaşma ve dikmelerinde kesme kırılması ortaya çıkan RRxn ve RRxb kirişlerinin (Şekil 3.13 ve 3.19) de nümerik ve deneysel eğrileri arasında belirli bir oranda farklılık vardır (Şekil 3.3 ve Şekil 3.5). Yine bu elemanlarda da, sonlu eleman analizleri (Şekil 3.14, 3.15, 3.20 ve 3.21) eğilme kırılması öngörmüş ve gerçek kırılma modunu tahmin edememiştir. Dolayısıyla, iki eğri arasında farklılıklar ortaya çıkmıştır. Ancak, bu farklılıklar RRxcb elemanına göre sınırlı düzeyde kalmıştır. Tamamen eğilme kırılmasının ortaya çıktığı referans elemanlarda (RBn ve RBb) ve boşluklu RRxcn (Şekil 3.1, 3.2 ve 3.4) elemanında nümerik ve deneysel eğriler arasındaki uyum son derece yüksektir. Genel olarak, eğilme kırılması sonucu göçen ve tam kapasitelerine ulaşabilen boşluklu elemanlarda sonlu eleman analizlerinin gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiğini söylemek mümkündür.

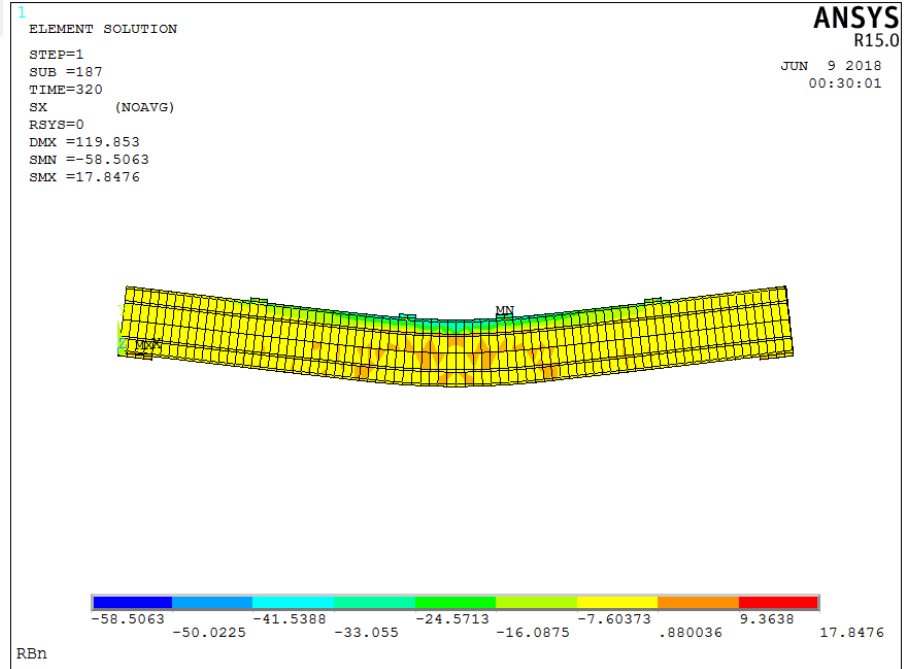
Boşluklu kiriş modellerinde çapraz donatıların ihmal edildiğini hatırlatmak gereklidir. Ancak, bu ihmal nümerik ve deneysel eğriler arasındaki uyumu etkilemediğinden, gelecek bölümlerde ihmal edilmiştir.



Şekil 3.7. RBn elemanın deneysel göçme modu [1]



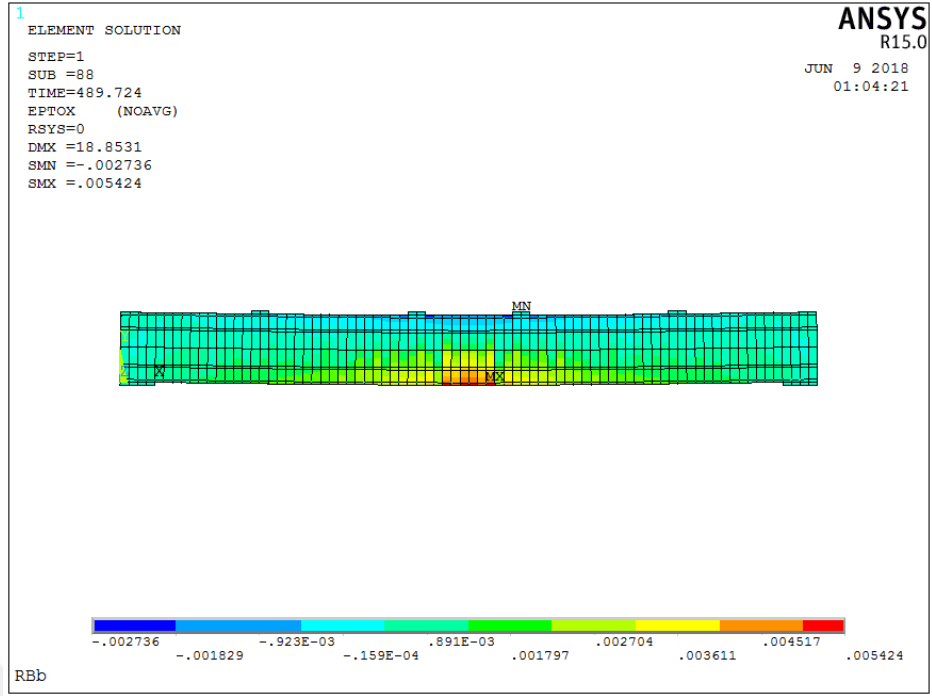
Şekil 3.8. RBn elemanın maksimum yükte birim deformasyon dağılımı



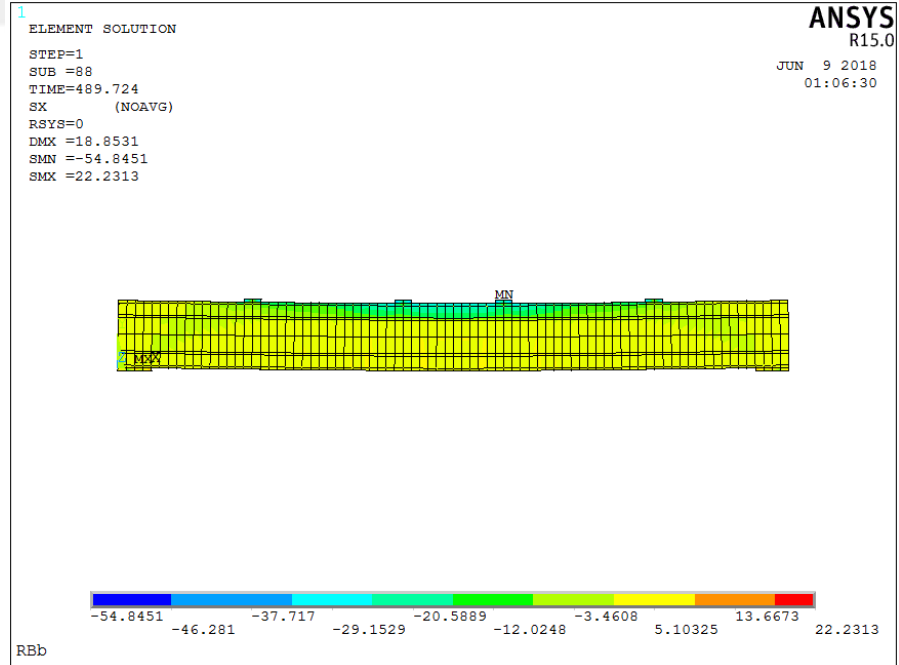
Şekil 3.9. RBn elemanın maksimum yükte gerilme (MPa) dağılımı



Şekil 3.10. RBb elemanın deneyisel göçme modu [1]



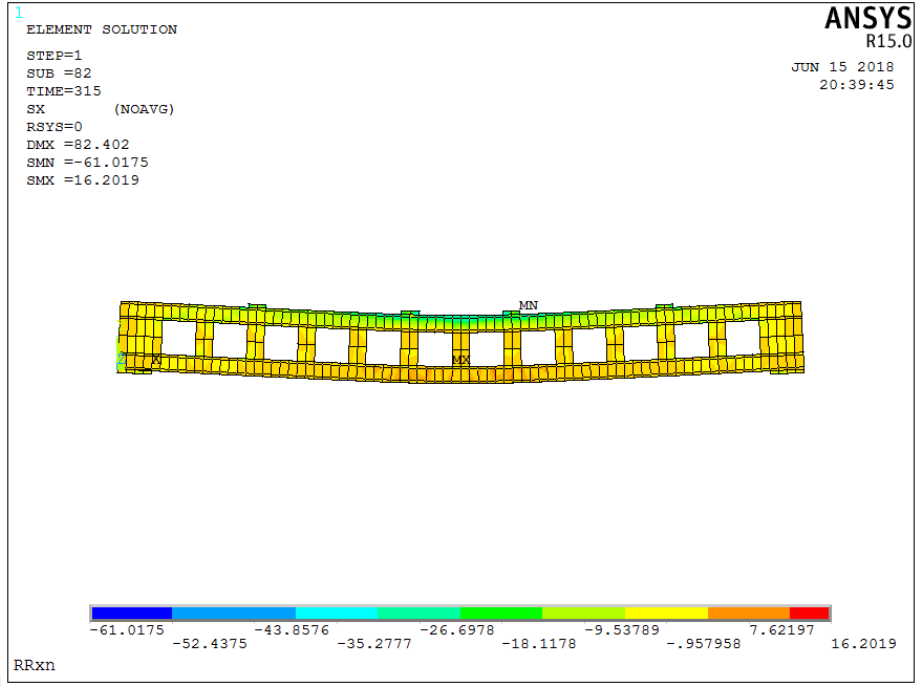
Şekil 3.11. RBb elemanın maksimum yükte birim deformasyon dağılımı



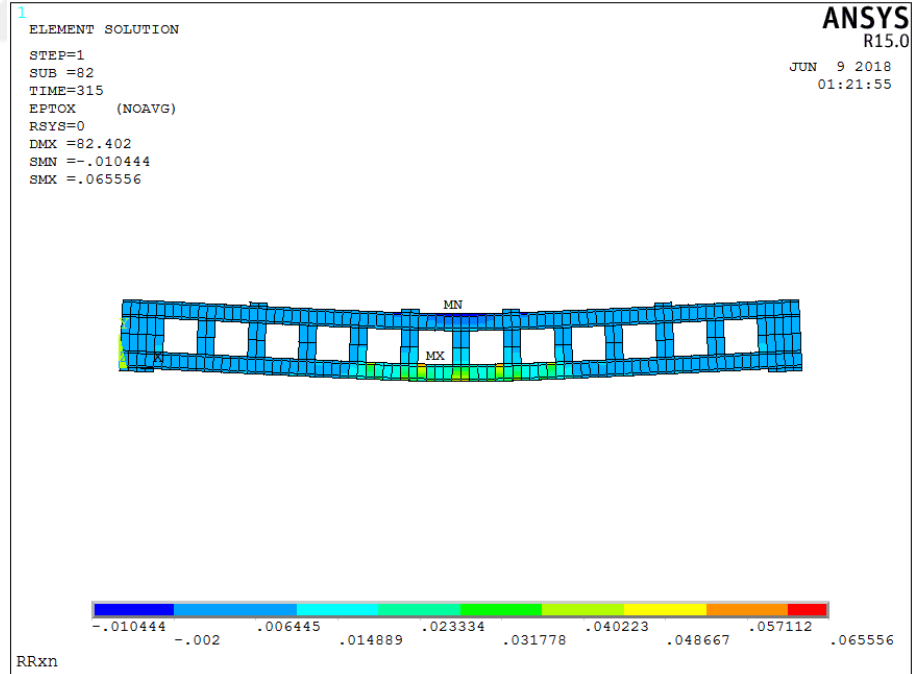
Şekil 3.12. RBb elemanın maksimum yükte gerilme (MPa) dağılımı



Şekil 3.13. RRxn elemanının deneysel göçme modu [1]



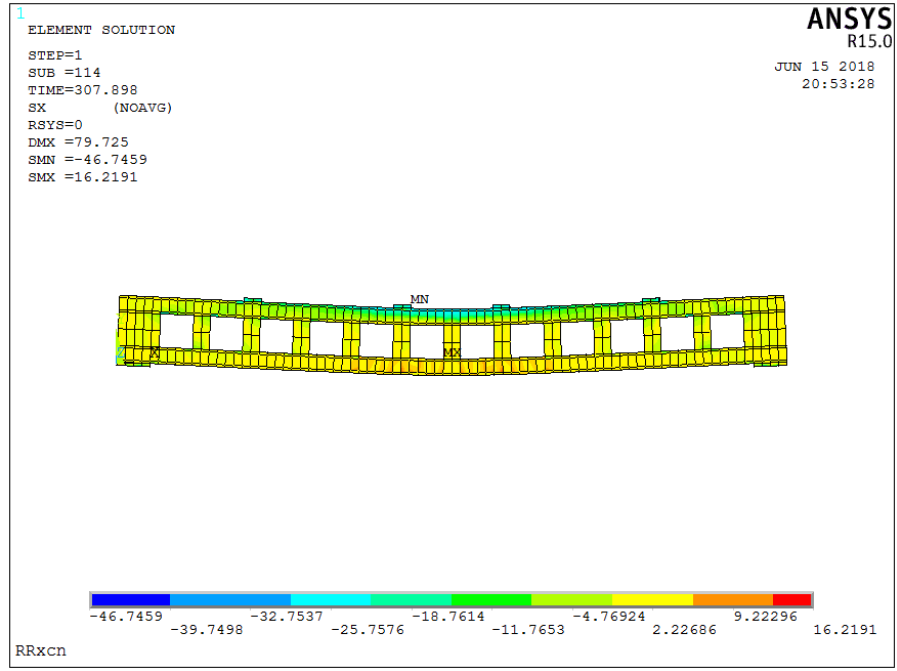
Şekil 3.14. RRxn elemanının maksimum yükte birim deformasyon dağılımı



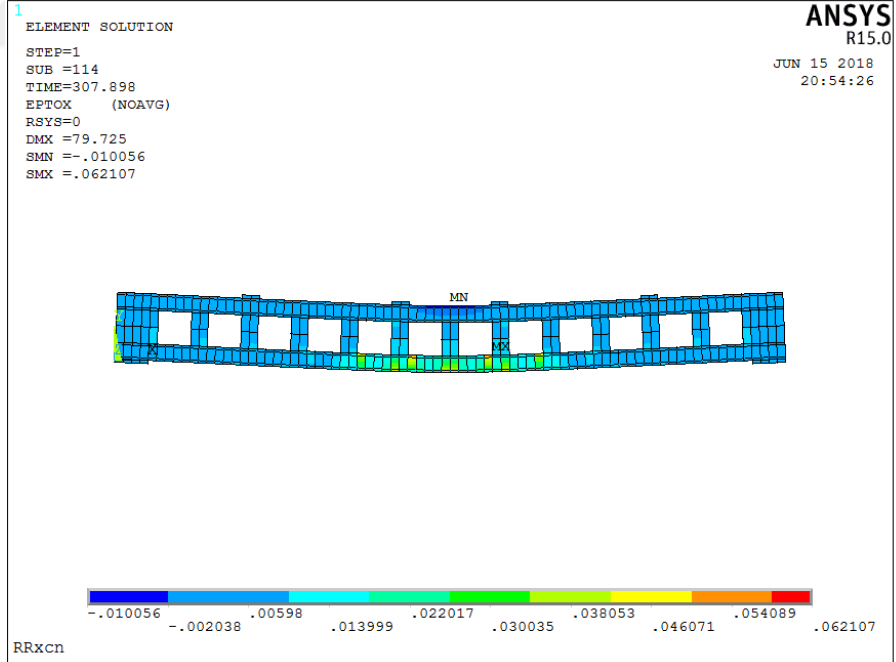
Şekil 3.15. RRxn elemanının maksimum yükte gerilme (MPa) dağılımı



Şekil 3.16. RRxcn elemanın deneysel göçme modu [1]



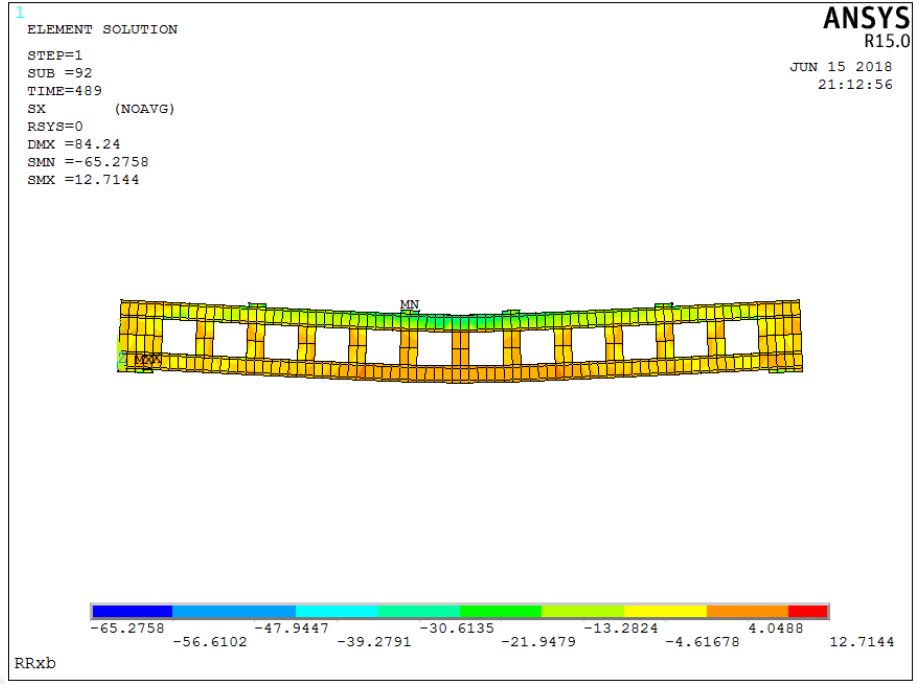
Şekil 3.17. RRxcn elemanının maksimum yükte birim deformasyon dağılımı



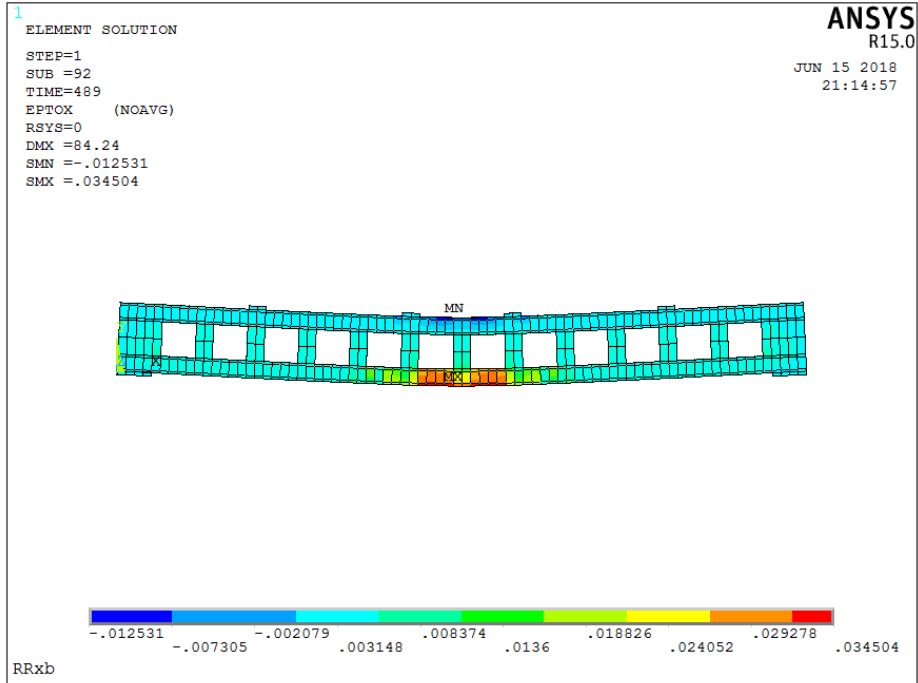
Şekil 3.18. RRxcn elemanının maksimum yükte gerilme (MPa) dağılımı



Şekil 3.19. RRxb elemanın deneysel göçme modu [1]



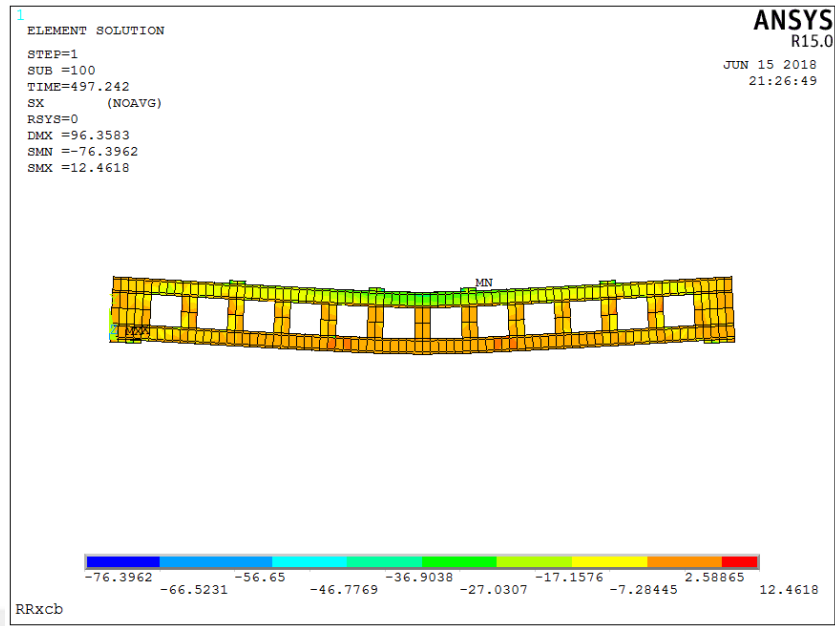
Şekil 3.20. RRxb elemanının maksimum yükte birim deformasyon dağılımı



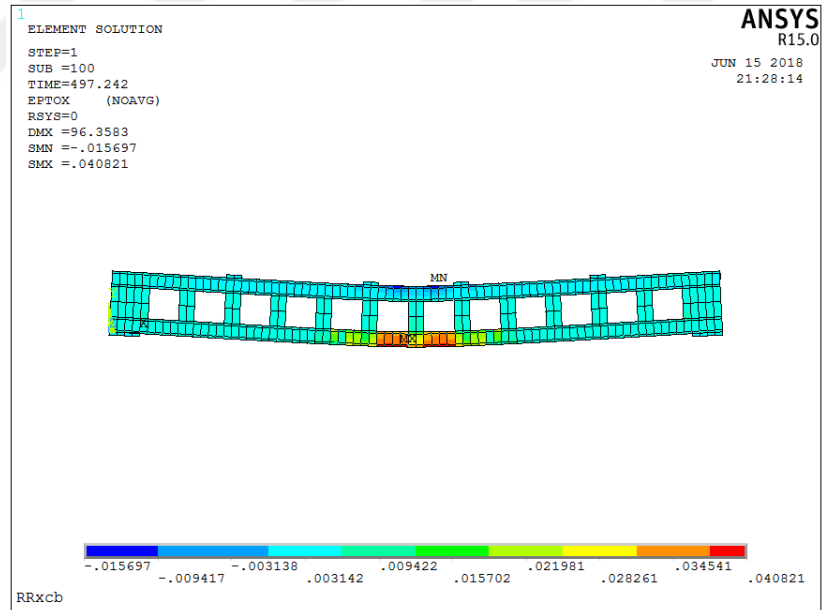
Şekil 3.21. RRxb elemanının maksimum yükte gerilme (MPa) dağılımı



Şekil 3.22. RRxcb elemanın deneysel göçme modu [1]



Şekil 3.23. RRxcb elemanının maksimum yükte birim deformasyon dağılımı



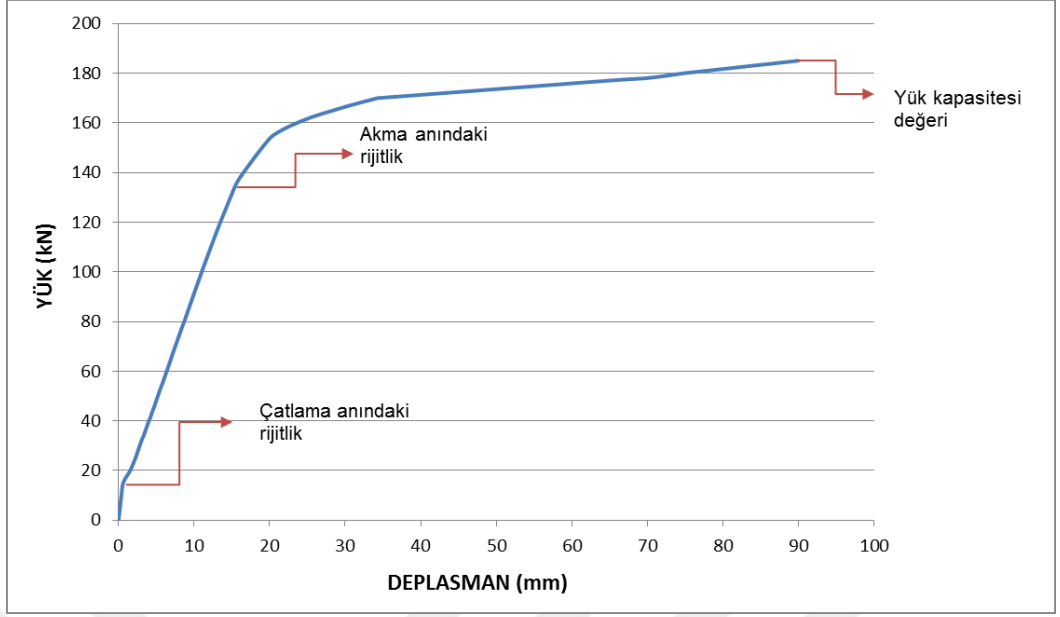
Şekil 3.24. RRxcb elemanının maksimum yükte gerilme (MPa) dağılımı

4. DÜZENLİ KARE GÖVDE BOŞLUKLU KİRİŞLERDE BOYUNA DONATININ EĞİLME DAVRANIŞINA ETKİSİ

Bir önceki bölümde, düzenli kare boşluklu betonarme kirişlerde sonlu eleman analizleri ile gerçeğe çok yakın yük-deplasman davranışlarına ulaşılabildiği görülmüştür. Bu uyumdan hareketle, boşluklu kirişlerde değişen boyuna donatı oranının kiriş davranışına etkisi sonlu eleman analizleri yardımıyla araştırılmıştır. Bu araştırmada dört temel kriter üzerinde durulmuştur:

- Yük Taşıma Kapasitesi
- Başlangıç Rijitliği
- Akma Rijitliği
- Kullanım Yüğü Altındaki Düşey Deplasman (Sehim)

Kirişlerin yük taşıma kapasitesi değerleri, sonlu eleman analizlerinde ulaşılan en yüksek yük değerinden belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında iki farklı rijitlik tanımı kullanılmış ve bu her iki tanım için de karşılaştırma yapılmıştır. Başlangıç rijitliği, deney elemanının yük-deplasman eğrisinde ilk çatlağın olduğu noktayı başlangıç noktasına birleştiren doğrunun eğiminden elde edilmiştir. Akma rijitliği ise, akma yük düzeyine karşılık gelen nokta ile başlangıç noktasını birleştiren doğrunun eğiminden hesaplanmıştır (Şekil 4.1). Eğilme rijitlikleri, doğrudan yük-deplasman eğrilerinden elde edilmiş, moment-eğrilik diagramlarının oluşturulmasına ihtiyaç duyulmamıştır. Bilindiği üzere, moment-eğrilik diyagramları büyük oranda eğriliğin hesaplandığı kiriş bölgesine (kiriş uzunluğuna) bağlıdır ve kiriş boyunca sabit değildir. Eğrilik hesabında kirişin hangi bölgesinin eğriliğinin göz önüne alınacağı konusunda bir kesinlik olmadığından, tüm kirişin eğriliğini yansıtan yük-deplasman eğrilerinin kullanılmanın uygun olacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.1. Rijitlik tanımları

Bu çalışmada, kirişlerin kullanım yüklerinin belirlenmesinde Eurocode 2 yönetmeliğinin [22] kullanım yükü tanımı kullanılmıştır. Bu tanıma göre, kirişlerin kullanım yükleri altında en dış basınç lifinde $0,6.f_{ck}$ büyüklüğünde bir basınç gerilmesi ortaya çıkmaktadır. Kullanım yükü hesaplarında, beton basınç bloğundaki gerilmelerin Todeschini beton modeline [20] uygun olarak dağıldığı varsatılmıştır

Dündar [1] tarafından test edilen kirişlerde iki tip donatı oranı mevcuttur. Yüksek donatı oranlı (RBb, RRxb ve RRxcb) kirişlerde ($\rho-\rho'=0,0094$), TS 500 [19] tarafından betonarme kirişlerde izin verilen en yüksek boyuna donatı oranı, yani dengeli donatı oranının % 85'i kadar donatı ($\rho_{max}=0.85.\rho_b$) mevcuttur. Normal donatı oranlı (RBn, RRxn ve RRxcn) kirişlerde ise ($\rho-\rho'=0,0052$), en yüksek donatı oranı (ρ_{max}) ile TS 500 [19] minimum boyuna donatı oranı sınırının (ρ_{min}) aritmetik ortalaması kadar donatı bulunmaktadır.

Boşluklu kirişler, iki gruba ayrılmıştır. RRxn ve RRxb elemanlarının yer aldığı birinci kiriş grubunda, dikmelerinde etriye bulunmayan düzenli kare boşluklu

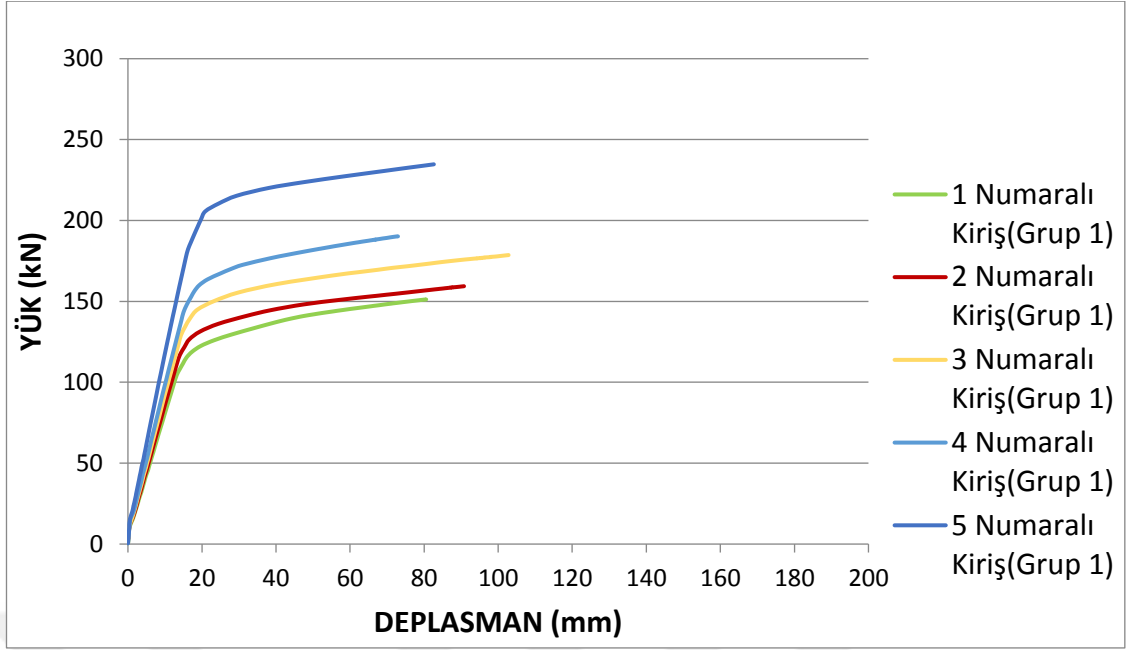
kirişlerde donatı oranının etkisi araştırılmıştır. RRxcn ve RRxcb elemanlarının yer aldığı ikinci kiriş grubunda ise, dikmelerinde etriye bulunan düzenli kare boşluklu kirişlerde donatı oranının etkisi araştırılmıştır. Analiz edilen bütün kirişler, 150x400 mm dikdörtgen kesite ve 3.8 m serbest açıklığa sahiptir. Tüm kirişlerde, çapraz donatı, kirişçiklerde kısa etriye ve boşlukların çevresinde tam etriye bulunmaktadır. Her iki kiriş grubu için de donatı oranı değişimi Çizelge 4.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Analiz edilen kiriş donatı oranları.

Kiriş No	Donatı Oranı
1 (RRxn ve RRxcn)	0.0052
2	0.0060
3	0.0070
4	0.0080
5 (RRxb ve RRxcb)	0.0094

4.1. Dikmelerinde Etriye Bulunmayan Kirişler (Grup 1)

Kirişlerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Yük taşıma kapasiteleri, başlangıç ve akma rijitlikleri Çizelge 4.2’de ve kullanım yükü deformasyonları Çizelge 4.3’de karşılaştırılmaktadır.



Şekil 4.2. Grup 1 elemanlarına ait yük- deplasman grafikleri

Çizelge 4.2. Birinci grup kirişlerinin analiz sonuçları

	NÜMERİK ÇALIŞMA					
GRUP 1	Nümerik Yük Kapasitesi		Başlangıç Rijitliği (Çatlama)		Akma Rijitliği	
Kiriş Numarası	Mutlak (kN)	Oran	Mutlak(kN/mm)	Oran	Mutlak(kN/mm)	Oran
1 numaralı kiriş	151.2	1.0000	25.4951	1.0000	7.7303	1.0000
2 numaralı kiriş	159.3	1.0536	25.7333	1.0093	8.3350	1.0782
3 numaralı kiriş	178.6	1.1812	26.0771	1.0228	9.0287	1.1680
4 numaralı kiriş	190.2	1.2579	26.3666	1.0342	9.5517	1.2356
5 numaralı kiriş	234.7	1.5522	28.6748	1.1247	11.2318	1.4530

Çizelge 4.3. Birinci grup kirişlerinin kullanım yükü sehimleri

Eleman	Kullanım Momenti (kN.m)	Kullanım Yüğü (kN)	Kullanım Yüğü Sehim (mm)	
			Mutlak (mm)	Oran
1	34,30	54,87	6,58	1,00
2	35,15	56,23	6,35	0,96
3	36,12	57,79	6,06	0,92
4	37,06	59,30	5,81	0,88
5	38,28	61,25	4,95	0,75

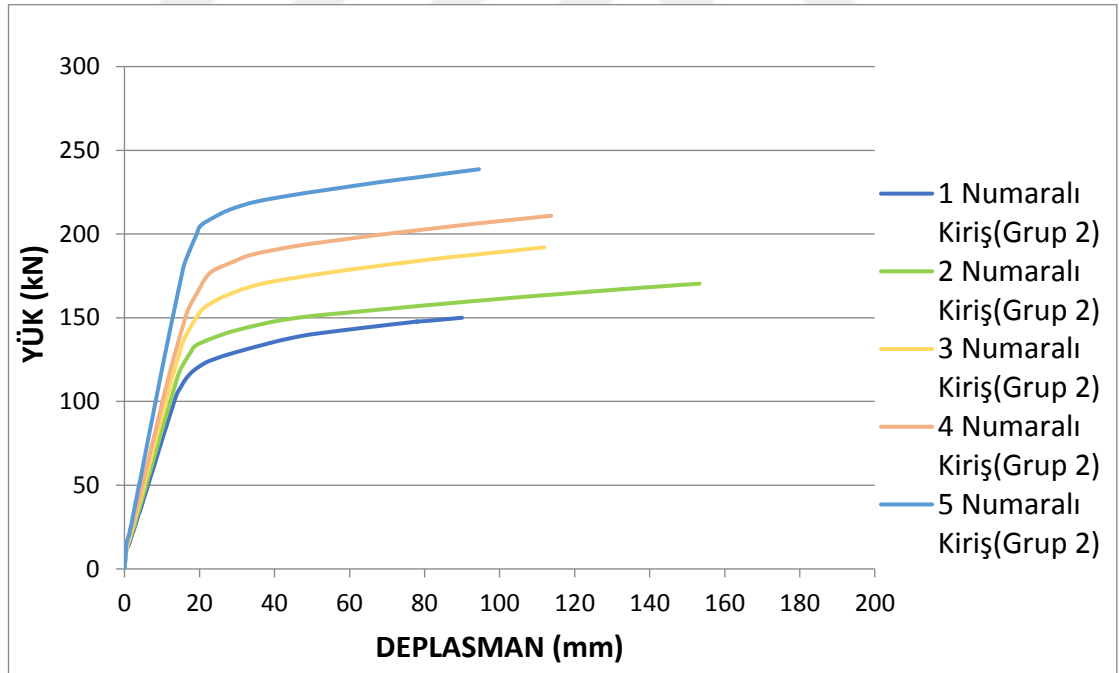
Çizelge 4.2'den görüldüğü üzere, donatı oranı arttıkça kirişin yük taşıma kapasitesi, başlangıç ve akma rijitlikleri beklendiği gibi artmaktadır. Dikmelerinde etriye bulunmayan düzenli kare boşluklu betonarme kirişlerde, donatı oranının yaklaşık iki katına çıkması durumunda yük kapasitesindeki artış % 55 mertebesinde olmuştur. Aynı donatı oranı artışında, başlangıç rijitliği sadece % 12 artarken, akma rijitliği ise % 45 oranında artmıştır. Akma rijitliğinin donatı oranından daha fazla etkilenmesi beklenen bir durumdur. Eğilme çatlakları oluşmadan önce, eğilme rijitliği dönüştürülmüş (eşdeğer) çatlamamış kesit eylemsizlik momenti ile ilgilidir. Bu aşamada, donatı elastisite modülleri oranında betona çevrilerek eğilme rijitliği hesaplanır ve kiriş eğilme rijitliğinin çok büyük bir bölümü beton kesit tarafından sağlanır. Çatlama momenti aşıldıktan sonra ise, eğilme çatlakları ortaya çıktıktan sonra ise, hem çatlamamış eşdeğer hem de çatlamış eşdeğer eylemsizlik momentlerine bağlı olan etkili eylemsizlik momenti önem kazanır. Çatlamış kesit ve etkili eylemsizlik momenti ifadeleri ile kirişin çatlama sonrası davranışını yansıtan akma rijitliği, boyuna donatı oranından daha fazla etkilenir. Çatlaklar ilerleyip kiriş tarafsız eksenine doğru ilerledikçe, betonun eğilme rijitliğine katkısı azalır ve eğilme rijitliğinin büyük bölümü boyuna donatı tarafından sağlanmaya başlar.

Çizelge 4.3'te görüldüğü üzere, boyuna donatı oranındaki artış kullanım yükü sehimlerini de önemli derecede azaltmaktadır. Dikmelerinde etriye

bulunmayan kirişlerde, donatı oranının 0,0052'den 0,0094'e çıkması, kullanım yükü sehim değerini % 25 azaltmıştır. TS 500 [19] yönetmeliğine göre, eğilme elemanlarındaki sehimler, kiriş serbest açıklığının 240'a bölünmesiye elde edilen bir üst sınırın altında kalmalıdır. Analiz edilen kirişlerin serbest açıklığı 3800 mm'dir. Dolayısıyla, kirişlerde izin verilen üst sehim sınırı $3800/240 = 15,83$ mm'dir. Çizelge 4.3'te verilen sehim değerlerinin bütünü, bu üst sınırın altında kalmaktadır.

4.2. Dikmelerinde Etriye Bulunan Kirişler (Grup 2)

Kirişlerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Yük taşıma kapasiteleri, başlangıç ve akma rijitlikleri Çizelge 4.4'te ve kullanım yükü deformasyonları Çizelge 4.5'te karşılaştırılmaktadır.



Şekil 4.3. Grup 2 elemanlarına ait yük- deplasman grafikleri

Çizelge 4.4. İkinci grup kirişlerinin analiz sonuçları

GRUP 2	NÜMERİK ÇALIŞMA					
	Nümerik Yük Kapasitesi		Başlangıç Rijitliği (Çatlama)		Akma Rijitliği	
	Mutlak (kN)	Oran	Mutlak(kN/mm)	Oran	Mutlak (kN/mm)	Oran
1 numaralı kiriş	147.8	1.0000	25.3148	1.0000	7.4557	1.0000
2 numaralı kiriş	170.4	1.1529	25.8206	1.0200	7.9322	1.0639
3 numaralı kiriş	192	1.2991	26.6667	1.0534	8.6905	1.1656
4 numaralı kiriş	210.9	1.4269	27.0000	1.0666	9.2350	1.2386
5 numaralı kiriş	238.6	1.6143	28.6748	1.1327	11.4557	1.5365

Çizelge 4.5. İkinci grup kirişlerinin kullanım yükü sehimleri

Eleman	Kullanım Momenti (kN.m)	Kullanım Yüğü (kN)	Kullanım Yüğü Sehim (mm)	
			Mutlak (mm)	Oran
1	34,30	54,87	6,96	1,00
2	35,15	56,23	6,58	0,94
3	36,12	57,79	6,12	0,88
4	37,06	59,30	5,78	0,83
5	38,28	61,25	4,90	0,70

Çizelge 4.4'ten görüldüğü üzere, donatı oranı arttıkça kirişin yük taşıma kapasitesi, başlangıç ve akma rijitlikleri beklendiği gibi artmaktadır. Dikmelerinde etriye bulunan düzenli kare boşluklu betonarme kirişlerde, donatı oranının yaklaşık iki katına çıkması durumunda yük kapasitesindeki artış % 61 mertebesinde olmuştur. Aynı donatı oranı artışında, başlangıç rijitliği sadece % 13 artarken, akma rijitliği ise % 54 oranında artmıştır. Dikmelerinde etriye bulunan düzenli kare boşluklu betonarme kirişlerin yük kapasiteleri ve rijitlikleri, dikmelerinde etriye bulunmayan düzenli kare boşluklu betonarme kirişlere göre boyuna donatı oranından daha fazla etkilenmektedir. Dikmelerde etriye bulunması, boşluklar arasında yer alan dikmelerin boşluk çevresi kayma gerilmelerinden daha az etkilenmelerini ve boşluğu çevreleyen kirişçikler ve dikmeler arasındaki bütünlüğün artmasını sağlar. Dolayısıyla, dikmelerde etriye bulunması, boşluklu kiriş davranışının boşluksuz kiriş eğilme

davranışına yaklaşmasını sağlar. Boyuna donatı oranındaki artış, basit eğilme davranışı gösteren kirişlerin kapasitesinde diğer davranış özelliklerine sahip kirişlere göre daha büyük artışlara sebep olur. Bu sebeplerle, dikmelerinde etriye bulunan düzenli boşluklu betonarme kirişlerin boyuna donatı oranından daha büyük ölçüde etkilenmesi beklenen bir durumdur.

Çizelge 4.5'te görüldüğü üzere, boyuna donatı oranındaki artış kullanım yükü sehimlerini de önemli derecede azaltmaktadır. Dikmelerinde etriye bulunan kirişlerde, donatı oranının 0,0052'den 0,0094'e çıkması, kullanım yükü sehim değerini % 30 azaltmıştır. Dikmelerinde etriye bulunan elemanlarda boyuna donatı oranı artışıyla sehimlerde ortaya çıkan azalma, dikmelerinde etriye bulunmayan elemanlara göre daha fazla olmaktadır.

Çizelge 4.5'te verilen sehim değerlerinin bütünü, TS [19] sehim üst sınırının (15,83 mm) altında kalmaktadır. Ancak, düzenli boşluklu betonarme kirişlerde, eğilme haricindeki göçme modlarının ortaya çıkma olasılığı ve bu modların sehimleri arttırıcı etkileri de göz önüne alınırsa, donatı oranının arttırılmasının sehim kontrolü açısından ne kadar önemli olduğu anlaşılabilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, boyuna donatı oranının düzenli kare boşluklu betonarme kiriş davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla yapılmıştır. Çalışma temel olarak, iki ana kısımda oluşmaktadır. Çalışmanın ilk kısmında, daha önce Dündar [1] tarafından test edilmiş iki adet referans boşluksuz ve dört adet düzenli kare boşluklu betonarme kirişin sonlu eleman modelleri hazırlanmış ve bu modellerin analizinden elde edilen nümerik sonuçların daha önce Dündar [1] tarafından elde edilen deneysel sonuçlarla uyumu araştırılmıştır. Nümerik sonuçlarla deneysel sonuçların uyumlu olduğunun görülmesinin ardından ise, sonlu eleman modellerindeki donatı oranlarının değiştirilmesiyle parametrik bir çalışma yapılmıştır. Analiz edilen tüm boşluklu kirişlerde, boşluklar arasındaki dikmelerde çapraz donatı ve boşlukların altında ve üstünde kalan kirişçiklerde kısa düşey etriyeler bulunmaktadır. Dikmelerde yatay etriye bulunup bulunmaması durumuna göre iki farklı analiz grubu oluşturulmuş ve analizler yapılmıştır. Analiz edilen kirişler, yük taşıma kapasitesi, çatlama momentine kadar olan rijitlik (başlangıç rijitliği), akma momentine kadar olan rijitlik (akma rijitliği) ve kullanım yükü seviyesindeki düşey deplasman (kullanım yükü sehim) cinsinden karşılaştırılmıştır. Kiriş kullanım yüklerinin belirlenmesinde, Eurocode 2 [22] tanımı kullanılmıştır. Bu tez kapsamında yürütülen çalışmalardan aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Düzenli kare boşluklu betonarme kirişlerin basit eğilme davranışı gösterdiği durumlarda, sonlu eleman analizleri deneylere çok yakın sonuçlar vermektedir. Ancak, kirişçiklerin kendi içinde kesme kırılmasına uğradığı çerçeve tipi kesme kırılmalarında ve kirişçiklerde plastik mafsallaşmalar ile dikmelerde kesme kırılmalarına bağlı olarak ortaya çıkan Vierendeel tipi göçme davranışlarında sonlu eleman analizleri deneysel sonuçlarla uyumlu nümerik sonuçlar vermemektedir. Bu durum, sonlu elemanlar programlarıyla yapılan statik analizlerin

boşluklu kirişlerde de genellikle basit eğilme davranışı görüleceğini tahmin etmesi sebebiyle ortaya çıkmaktadır.

2. Dikmelerinde etriye bulunan düzenli kare boşluklu betonarme kirişlerde boyuna donatının arttırılması sonucu yük kapasitesi, başlangıç rijitliği ve akma rijitliğinde ortaya çıkan artışlar, dikmelerinde etriye bulunmayan düzenli kare boşluklu betonarme kirişlere göre daha yüksek olmaktadır. Dikmelerde etriye bulunması, boşluklu kirişlerde boşlukları çevreleyen elemanların bütünlüğünü arttırmakta ve basit kiriş eğilme davranışının ortaya çıkmasına yardımcı olmaktadır. Basit eğilme davranışını gösteren kirişlerde, yük taşıma kapasitesi donatı oranından azami oranda etkilenmektedir. Bu sebeple, dikmelerde etriye bulunması boyuna donatı oranının önemini arttırmaktadır.
3. Boşluklu betonarme kirişlerde, akma anına kadar olan ortalama eğilme rijitliği (akma rijitliği) boyuna donatı oranından büyük oranda etkilenmektedir. Dikmelerde etriye bulunmaması durumunda, boyuna donatı oranının normal donatı seviyesinden $[(\rho_{max} + \rho_{min})/2]$ maksimum donatı seviyesine (ρ_{max}) çıkması, akma rijitliğini % 45 mertebesinde, dikmelerde etriye bulunması durumunda ise % 55 seviyesinde arttırmaktadır.
4. Eğilme çatlaklarının olduğu çatlama anına kadar olan başlangıç eğilme rijitliği, boşluklu kiriş boyuna donatı oranından çok sınırlı olarak etkilenmektedir. Normal donatı seviyesinden maksimum donatı seviyesine çıkan ve dikmelerinde etriye bulunan veya bulunmayan düzenli kare boşluklu betonarme kirişlerde bu artış sadece % 12-13 mertebesinde olmuştur.
5. Dikmelerinde çapraz donatı, kirişçiklerinde kısa etriye ve boşluk kenarlarında tam etriye bulunduran düzenli kare boşluklu betonarme kirişlerde kullanım yükü seviyelerindeki sehimler, TS 500 [19]

yönetmeliği sehim üst sınırı değerinin altında kalmaktadır. Ancak, düzenli kare gövde boşluklu kirişlerde basit eğilme davranışı haricindeki kiriş göçme modlarının da etkin olma ihtimalinden ve bu modların sehimleri arttırıcı etkilerinden ötürü, eğilme sehimlerinin mümkün olduğunca düşük tutulmasında fayda vardır.

6. Dikmelerinde etriye bulunan ve bulunmayan tüm kare boşluklu betonarme kirişlerde boyuna donatının artmasıyla kullanım yükü sehimleri azalmaktadır. Ancak, dikmelerinde etriye bulunan boşluklu kirişlerde bu azalma daha yüksek mertebelere ulaşmaktadır.

Bu tez çalışmasında kare boşluklu betonarme kirişlerin davranışı incelenmiştir. Gelecekteki çalışmalarda, farklı boşluk geometrilerinin incelenmesi faydalı olacaktır. Ayrıca, yapılan sonlu eleman analizleri basit eğilme davranışı gösteren düzenli boşluklu betonarme kirişlerde gerçeğe yakın sonuçlar verirken, nümerik ve deneysel sonuçlar arasındaki farklar, başka göçme tipi gösteren boşluklu kirişlerde artmaktadır. Dolayısıyla, sivri boşluk köşelerinde ortaya çıkan ilave gerilmelerin etkisiyle farklı göçme modlarının olası olduğu kare ve üçgen boşluklu betonarme kirişlerde, statik sonlu eleman analizlerinin gerçek kiriş davranışından farklı sonuçlar verebileceği gerçeği dikkate alınarak nümerik çalışmalar yapılmalıdır. Dairesel boşluklu betonarme kirişler, aynı boşluk alanına sahip kare boşluklu kirişlere göre daha güvenli olduğu için, bu çalışmada elde edile sonuçların düzenli daireli boşluklu betonarme kirişlere de güvenle uygulanabileceği söylenebilir.

KAYNAKLAR

1. Dunder, B., Düzenli Boşluklara Sahip Betonarme Kirişlerin Davranış ve Dayanımı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
2. Aykac, S. and Yilmaz, M.C., “Behavior and Strength of RC Beams with Regular Triangular or Circular Web Openings”, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 26 (3), 711-718, 2011.
3. Aykac, B., Kalkan, İ., Aykac, S. ve Egriboz, Y.E., “Flexural Behavior of RC Beams with Regular Square or Circular Web Openings”, Engineering Structures, 56, 2165-2174, 2013.
4. Kalkan, İ., “Düzenli Boşluklu Betonarme Kirişlerin Düzlem İçi Eğilme Davranışları”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29 (1), 155-163, 2014.
5. Ceylan, E., Düzenli Boşluklu Betonarme Kirişlerin Sehim Değerlerinin Elde Edilmesinde Kullanılacak Etkili Eylemsizlik Momenti İfadelerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
6. Mansur, M.A., Lee, Y.F., Tan, K.H. ve Lee, S. L., “Tests on RC Continuous Beams with Openings”, ASCE, Journal of Structural Engineering, 117(6), 1593-606, 1991.
7. Tan K. H., Mansur M. A. And Wei W., “Design of reinforced concrete beams with circular openings”, ACI Structural Journal, 98 (3), 407-415, 2001.

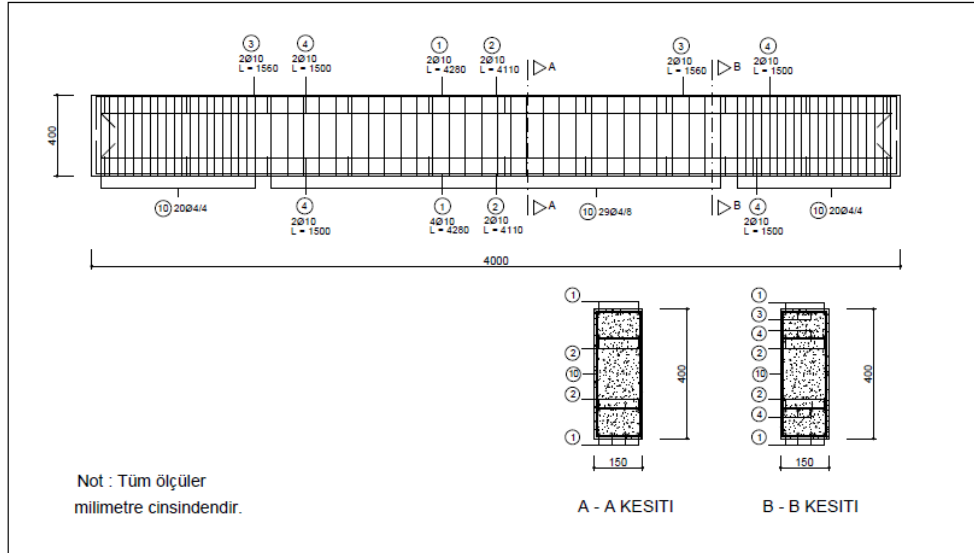
8. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (318R-95), American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 369 pp, 1995.
9. Mansur M. A., Tan K. H. And Wei W., “Effects of Creating an Opening in Existing Beams”, ACI Structural Journal, 96 (6), 899-905, 1999.
10. Tan K. H., Mansur M. A. And Huang L. M., “Reinforced concrete T-beams with large web openings in positive and negative moment regions”, ACI Structural Journal, 93 (3), 277-289, 1996.
11. Mansur M. A. And Paramasivam P., “Reinforced Concrete Beams with Small Opening in Bending and Torsion”, American Concrete Institute. Journal, 81 (2), 180-185, 1984.
12. Ashour A. F. And Rishi G., “Tests of reinforced concrete continuous deep beams with web openings”, ACI Structural Journal, 97 (3), 418-426, 2000.
13. Mansur M. A., Tan K. H. And Lee S. L., “Design Method for Reinforced Concrete Beams with Large Openings”, American Concrete Institute. Journal, 82 (4), 517-524, 1985.
14. Mansur, M.A. ve Tan, K.H., Concrete Beams with Openings: Analysis and Design, CRC Press, Boca Raton, Florida, A.B.D., 1999.
15. ANSYS V.15 [Engineering Simulation Software]. ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA, 2013.
16. Dede, F. T. “Tersinir-Tekrarlanır Yükleme Altındaki Betonarme Çerçevelerin ANSYS Programı İle Nonlineer Sonlu Eleman Analizi”,

Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1-100, 2006.

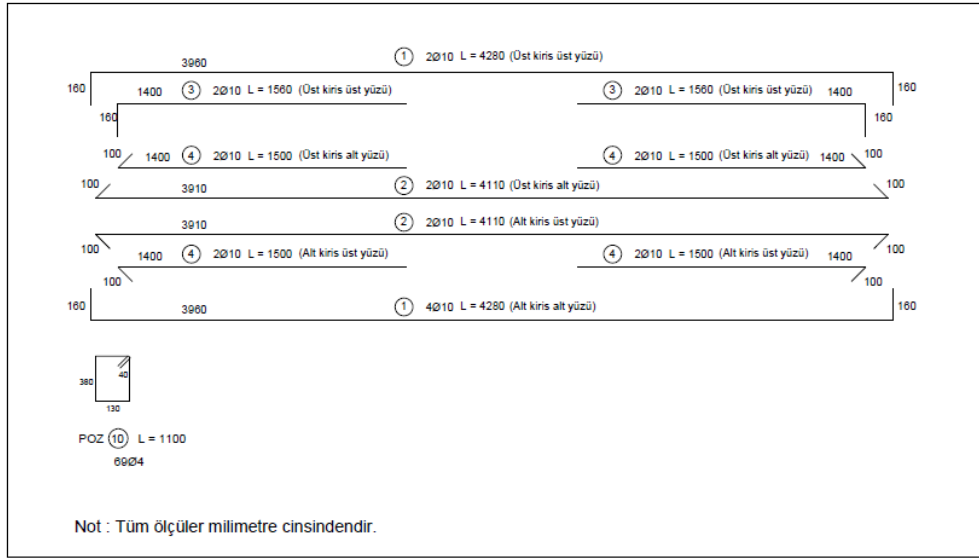
17. Şentürk, Ö. 2007, Eksenel Yüklü Tel Halat Demetlerinin Sonlu Elemanlar Metodu İle Modellenmesi Ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Makina Fakültesi, İstanbul.
18. Mehmet Sami Güler, Sadri Şen, Ordu Üniv. Bil. Tek. Derg., Cilt:5, Sayı:1, 2015,56-66, Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler
19. TS 500, “Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 29-31, 2000.
20. MacGregor, J., Reinforced concrete, mechanics and design. 55-58. Prentice Hall International Series, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 1997.
21. Todeschini, C.E.; Bianchini, A.C.; Kesler, C.E. Behavior of concrete columns reinforced with high strength steels. ACI J. Proc. 1964, 61, 701–716.
22. Eurocode 2, Design of Concrete Structures, British Standards Institution, London, 2008.

EKLER

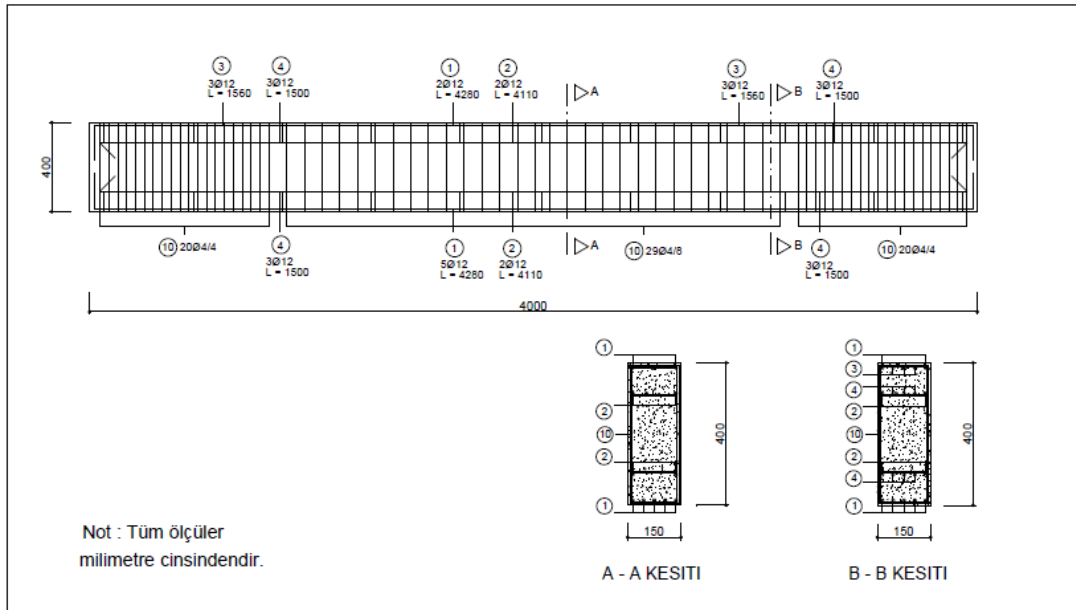
EK 1 Donatı Şekilleri [1]



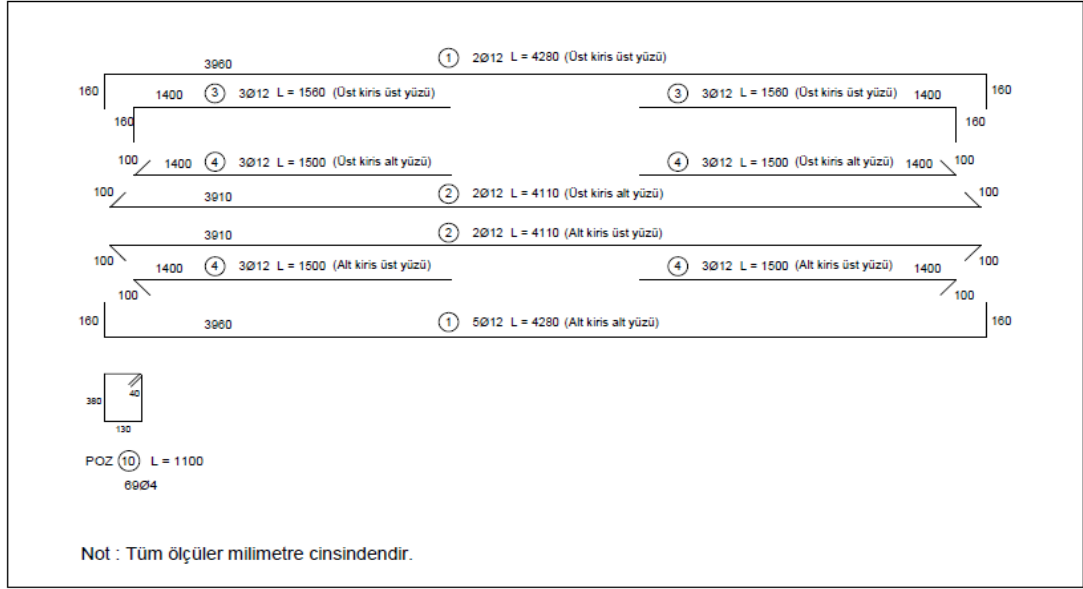
Şekil Ek 1.1. RBN Kirişi kiriş donatı Planı ve Kesitleri



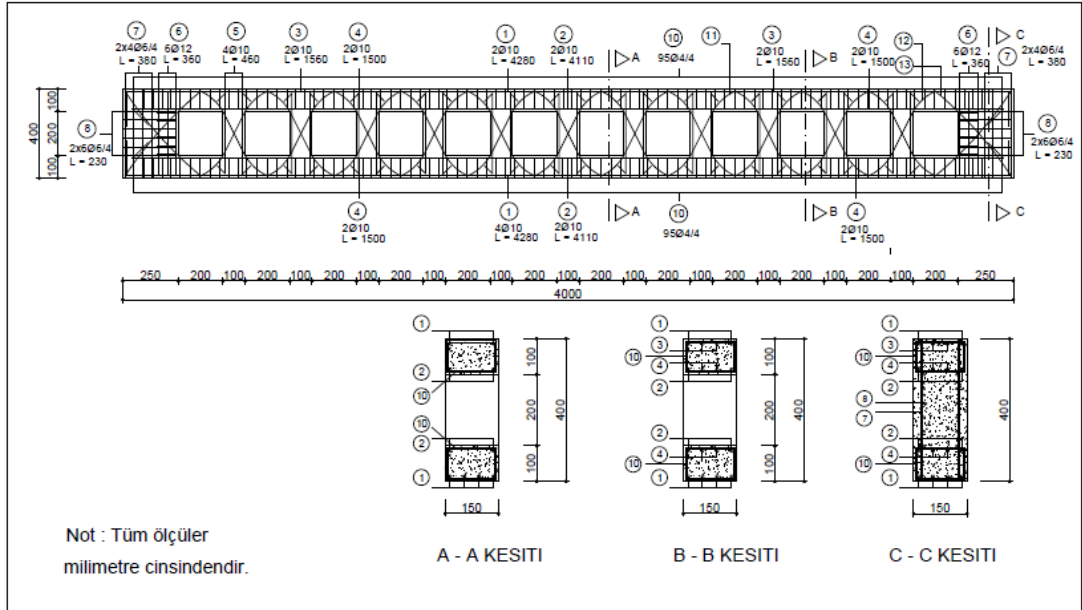
Şekil Ek 1.2. RBn kirişi donatıları



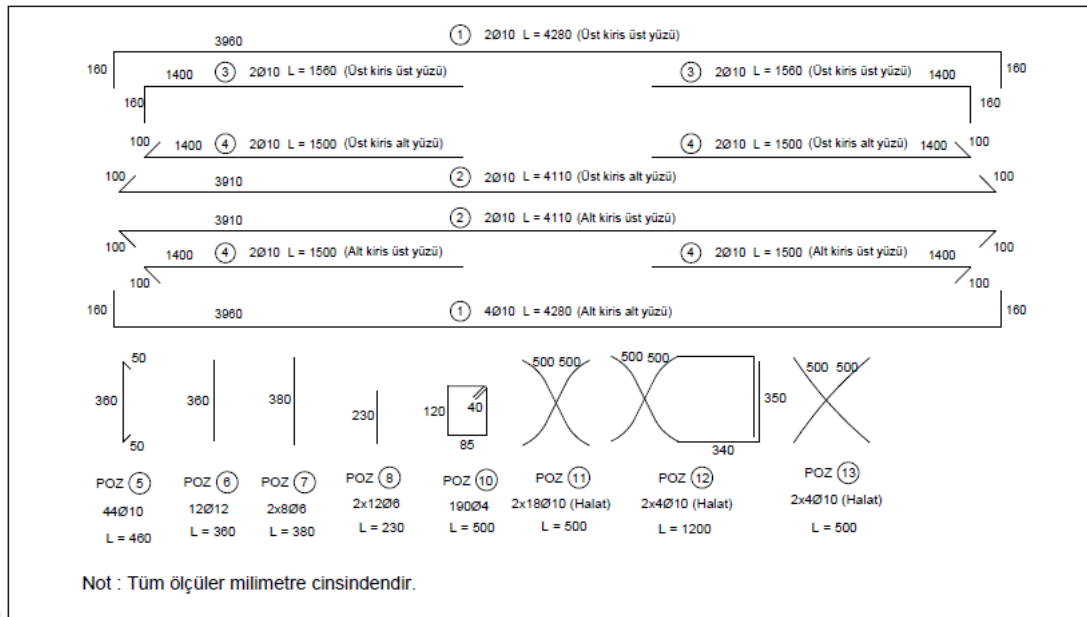
Şekil Ek 1.3. RBb Kirişi kiriş donatı Planı ve Kesitleri



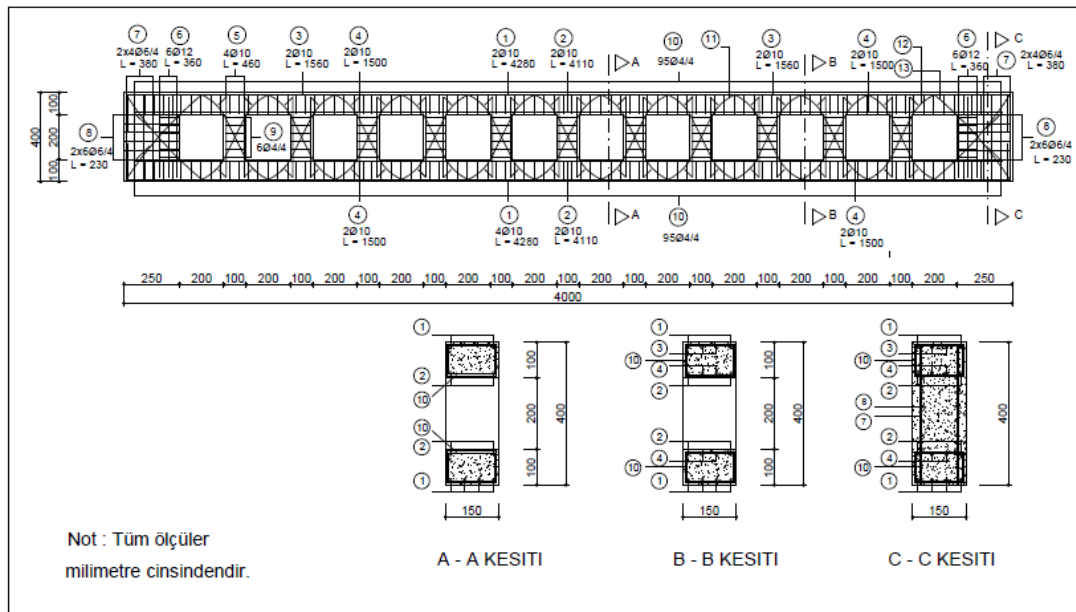
Şekil Ek 1.4. RBb kirişi donatıları



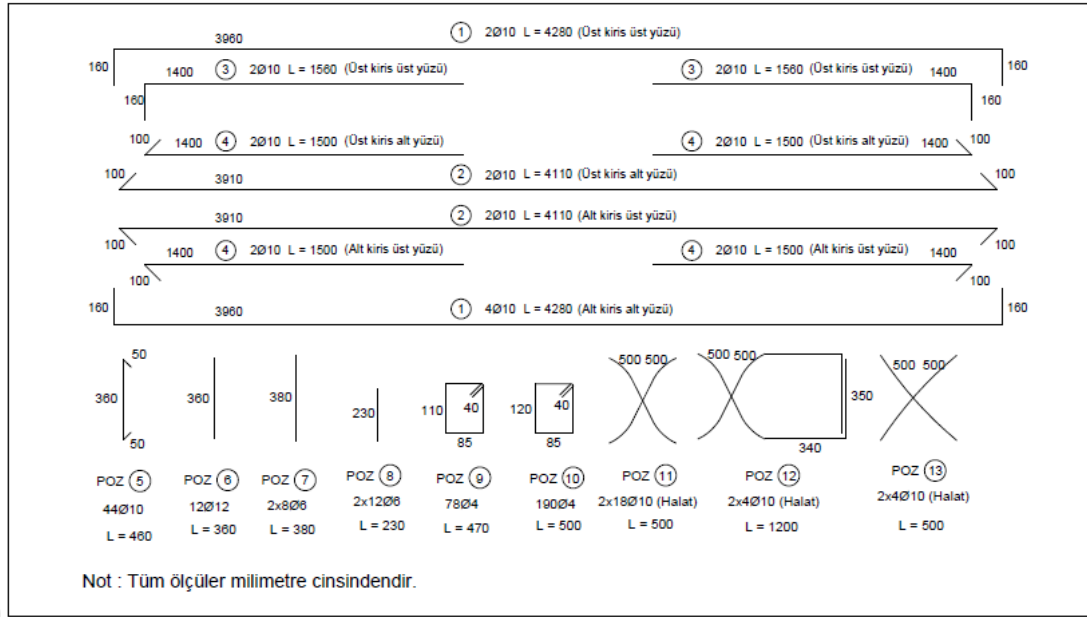
Şekil Ek 1.5. RRxn Kirişi kiriş donatı Planı ve Kesitleri



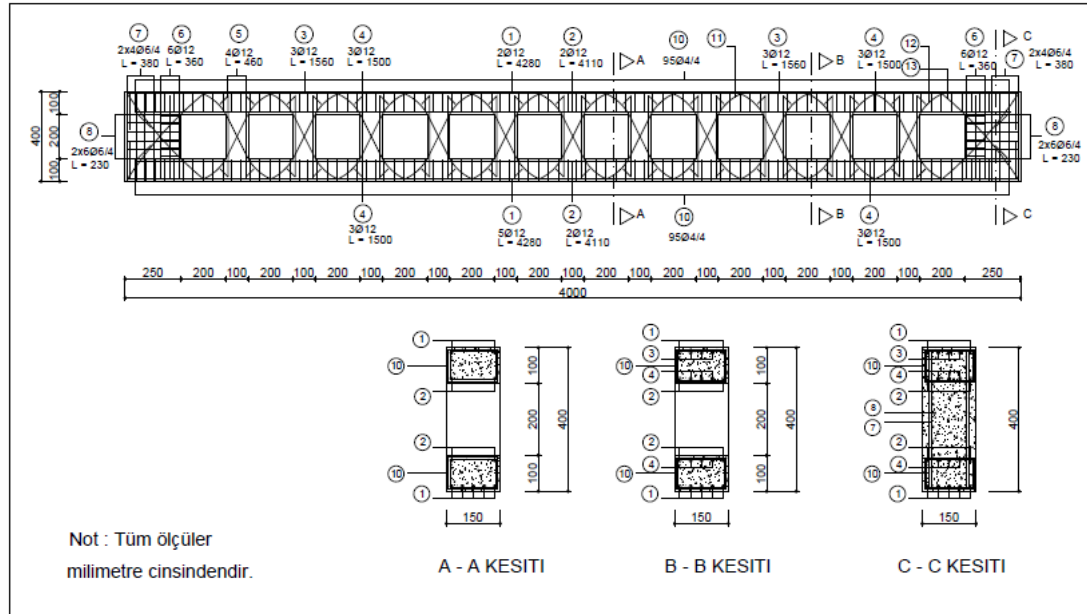
Şekil Ek 1.6. RRxn kirişi donatıları



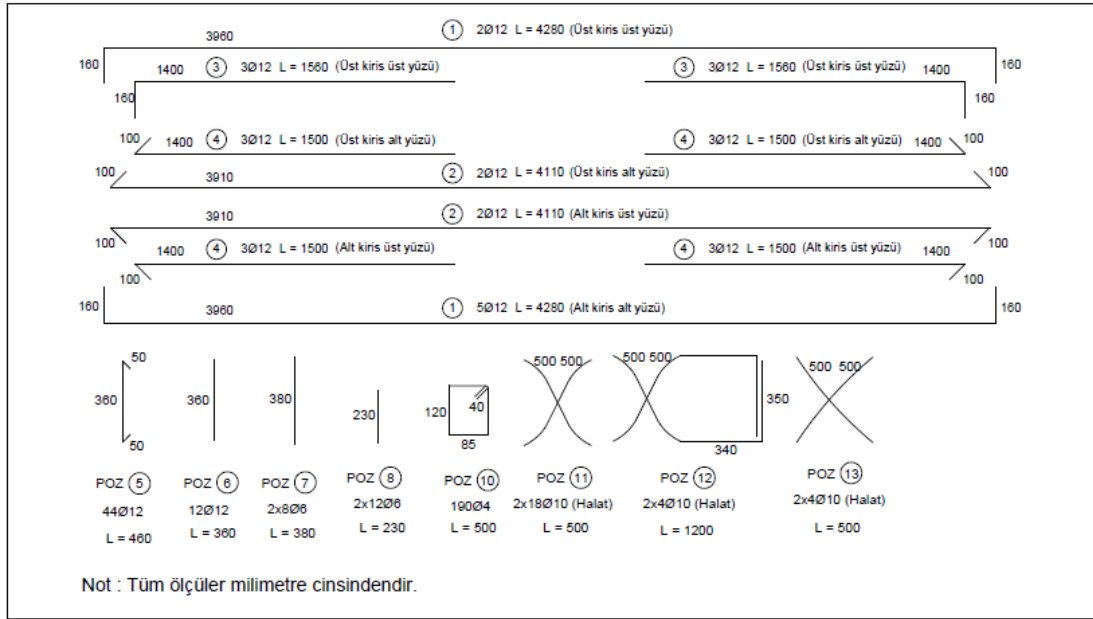
Şekil Ek 1.7. RRxcn Kirişi kiriş donatı planı ve kesitleri



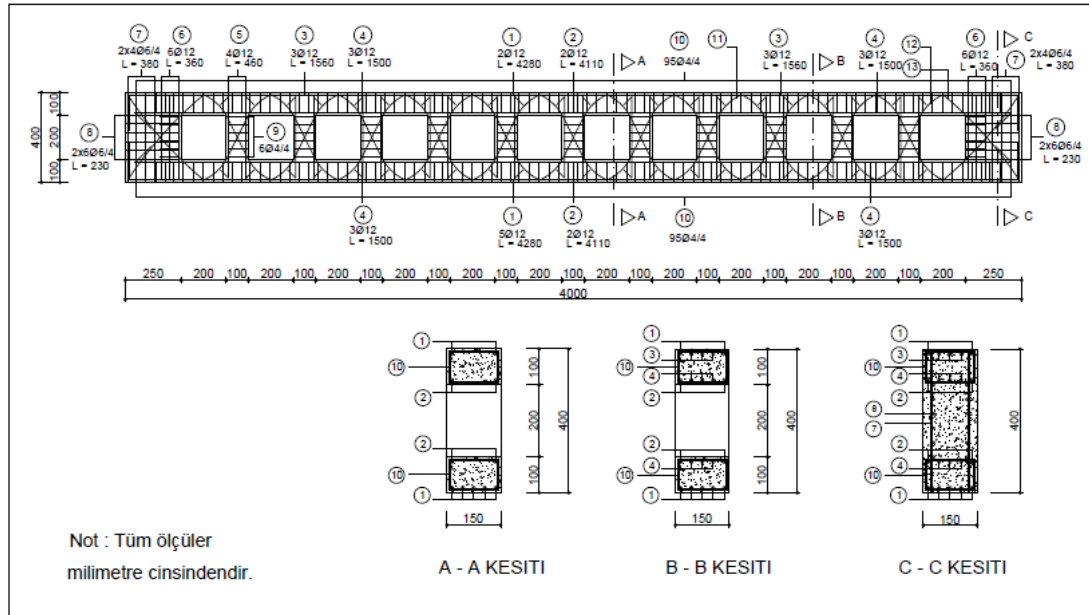
Şekil Ek 1.8. RRxcn kirişi donatıları



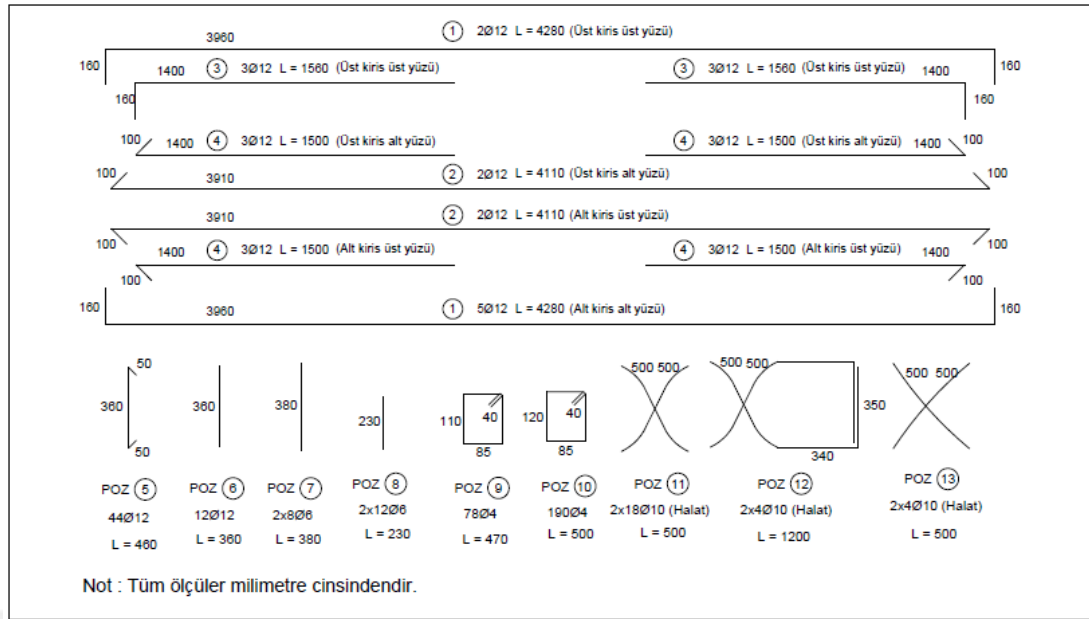
Şekil Ek 1.9. RRxb Kirişi kiriş donatı planı ve kesitleri



Şekil Ek 1.10. RRxb kirişi donatıları



Şekil Ek 1. 11. RRxcb Kirişi kiriş donatı planı ve kesitleri



Şekil Ek 1.12. RRxcb kirişi donatıları