

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖVDESİNDE GENİŞ BOŞLUK BULUNAN BETONARME
KİRİŞLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
MODELLENMESİ

SEDA BOSTAN

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

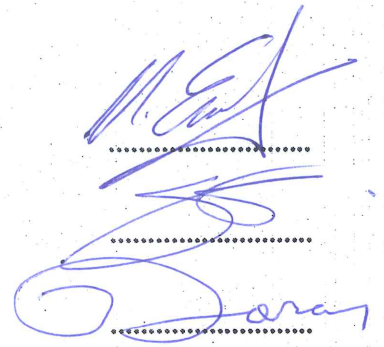
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖVDESİNDE GENİŞ BOŞLUK BULUNAN BETONARME
KİRİŞLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
MODELLENMESİ

SEDA BOSTAN

Yrd. Doç. Dr. Hakan ERDOĞAN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Safa Bozkurt COŞKUN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Doç. Dr. Bilge DORAN
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi



Tezin Savunulduğu Tarih: 14.06.2017

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde, nüfus artışı ile doğru orantılı olarak konut ve işyeri olarak kullanılan bina sayılarında da önemli artışlar gözlemlenmektedir. Bu artış beraberinde iç mekanların en verimli şekilde kullanılma gereksinimini ortaya çıkarmaktadır. Binalardaki minimum alan ile maksimum kullanım verimliliği sağlayabilmek amacıyla tesisat, havalandırma gibi hizmetlerin, kirişlerde boşluklar açılarak bu boşluklardan geçirilmesi sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntem kat yüksekliğini azaltırken malzeme maliyetini de düşürmektedir. Öte yandan, yapısal elemanda boşluk açarak süreksizlik oluşturmak, taşıma gücünü azaltmakta, sehim ve deformasyonlarda artışa neden olmaktadır. Bugüne kadar, bu sorunu inceleyen ve tasarım önerisi sunan deneysel ve analitik birçok çalışma yapılmıştır.

Bu çalışmada, gövdesinde geniş boşluklar bulunan betonarme kirişlerin davranışının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmesi hedeflenmiş olup, ortaya atılan modelleme yöntemi literatürde yer alan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmam boyunca, desteğini ve zamanını esirgemeyen hocam Yrd.Doç.Dr. Hakan ERDOĞAN'a, çalışma sürecimde yardımlarını esirgemeyen Arş.Gör. Aytuğ SEÇKİN'e, hayatım boyunca sıkıntılarımı ve mutluluklarımı paylaşan en büyük destekçilerim başta sevgili annem Nuray GÜÇLÜ, babam Sabri GÜÇLÜ, kardeşim Sena GÜÇLÜ ve kuzenim Selda GÜÇLÜ olmak üzere tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs – 2017

Seda BOSTAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
TABLolar DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
GİRİŞ	1
1. GENEL	3
2. GENİŞ BOŞLUKLU KİRİŞLERLE İLGİLİ LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR	6
2.1. Giriş	6
2.2. Deneysel Çalışmalar	6
2.3. Analitik Çalışmalar	11
3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	17
3.1. Giriş	17
3.2. Sonlu Elemanlarla Modelleme Aşamaları	18
3.2.1. Modelin oluşturulması	18
3.2.2. Malzeme modelleri	23
3.2.2.1. Beton modeli	23
3.2.2.2. Donatı modeli	28
3.2.3. Çözümleme aşaması	29
4. MODELLEME	30
4.1. Giriş	30
4.2. Kiriş Numunelerinin Tanıtılması	30
4.3. Deneysel Kirişlerin Modellenmesi	33
5. ANALİZ SONUÇLARININ DENEYSEL VERİLERLE KARŞILAŞTIRILMASI	39
5.1. Giriş	39
5.2. Yük-Deplasman Eğrileri	39
5.3. Kiriş Boyunca Deformasyon Profilleri	50
6. MODELLEME İLE İLGİLİ YAPILAN PARAMETRİK ÇALIŞMALAR	53
6.1. Giriş	53
6.2. Mesh Boyutunun Analiz Sonuçları Üzerindeki Etkisi	53
6.3. Beton Çekme Modelinin Analiz Sonuçları Üzerindeki Etkisi	58
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR	66
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	69
ÖZGEÇMİŞ	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Boşluklu kirişin genel görünümü	3
Şekil 1.2.	Küçük boşluklu bir kirişin donatı detayı	4
Şekil 1.3.	Geniş boşluklu bir kirişin göçme modu	4
Şekil 1.4.	Geniş boşluklu bir kirişin serbest cisim diyagramı	5
Şekil 1.5.	Geniş boşluklu bir kirişin donatı detayı	5
Şekil 2.1.	Vierendeel paneli.....	7
Şekil 2.2.	Geniş boşluklu bir kirişin büküm noktaları	8
Şekil 2.3.	Gövdesinde uzun bir boşluk veya birden fazla kısa boşluk bulunan T kesitli iki kirişin davranışlarının karşılaştırılması.....	9
Şekil 2.4.	Boşluklu ve boşluksuz kirişlerin şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.5.	Gövdesinde geniş boşluk bulunan T kesitli bir kirişin deney öncesi ve sonrası görüntüleri.....	11
Şekil 2.6.	Geniş boşluklu betonarme kirişlerin deformasyonu.....	12
Şekil 2.7.	Mevcut deneysel kirişlerin yükleme ve mesnet detayları	13
Şekil 2.8.	Eşdeğer kiriş parçası.....	13
Şekil 3.1.	Sonlu elemanlar ile geometri modelleme.....	19
Şekil 3.2.	Kabuk elemanda oluşan gerilmeler	20
Şekil 3.3.	Kabuk eleman oluşumu.....	21
Şekil 3.4.	Katmanlı kabuk eleman.....	21
Şekil 3.5.	Kirişlerin katmanlı kabuk eleman ile modellenmesi.....	22
Şekil 3.6.	Mander beton modeli	23
Şekil 3.7.	Betonarme elemanlarda çatlak oluşumu	26
Şekil 3.8.	Çekme bölgesindeki çatlamış beton için gerilme-şekil değiştirme eğrisi	27
Şekil 3.9.	Betonun çekme gerilme-şekil değiştirme eğrisi	28
Şekil 3.10.	Donatı çeliği σ - ϵ eğrisi	28
Şekil 4.1.	Mevcut deney kirişlerin mesnet ve yükleme detayları.....	30
Şekil 4.2.	Mevcut deney kirişlerinin donatı detayı.....	31
Şekil 4.3.	C1 kirişinin sonlu eleman boyutu detayı.....	33
Şekil 4.4.	Donatılı beton katmanının tanımlanması	35
Şekil 4.5.	Beton gerilme-şekil değiştirme eğrisi	36
Şekil 4.6.	Donatı gerilme-şekil değiştirme eğrisi	37
Şekil 5.1.	R1 kirişi yük-deplasman ilişkisi	39
Şekil 5.2.	R2 kirişi yük-deplasman ilişkisi	40
Şekil 5.3.	R3 kirişi yük-deplasman ilişkisi	40
Şekil 5.4.	R4 kirişi yük-deplasman ilişkisi	41
Şekil 5.5.	R5 kirişi yük-deplasman ilişkisi	41
Şekil 5.6.	R6 kirişi yük-deplasman ilişkisi	42
Şekil 5.7.	R7 kirişi yük-deplasman ilişkisi	42
Şekil 5.8.	R8 kirişi yük-deplasman ilişkisi	43
Şekil 5.9.	R9 kirişi yük-deplasman ilişkisi	43
Şekil 5.10.	R10 kirişi yük-deplasman ilişkisi	44
Şekil 5.11.	R11 kirişi yük-deplasman ilişkisi	44

Şekil 5.12. R12 kirişi yük-deplasman ilişkisi.....	45
Şekil 5.13. B1 kirişi yük-deplasman ilişkisi.....	45
Şekil 5.14. B2 kirişi yük-deplasman ilişkisi.....	46
Şekil 5.15. B3 kirişi yük-deplasman ilişkisi.....	46
Şekil 5.16. C1 kirişi yük-deplasman ilişkisi.....	47
Şekil 5.17. C2 kirişi yük-deplasman ilişkisi.....	47
Şekil 5.18. C3 kirişi yük-deplasman ilişkisi.....	48
Şekil 5.19. C4 kirişi yük-deplasman ilişkisi.....	48
Şekil 5.20. C5 kirişi yük-deplasman ilişkisi.....	49
Şekil 5.21. B serisinde bulunan kirişlerin deforme olma şekilleri	51
Şekil 5.22. C serisinde bulunan kirişlerin deforme olma şekilleri	52
Şekil 6.1. Mesh boyutları.....	53
Şekil 6.2. Mesh boyutunun R2 kirişi üzerindeki etkisi	54
Şekil 6.3. Mesh boyutunun C1 kirişi üzerindeki etkisi	55
Şekil 6.4. Mesh boyutunun R3 kirişi üzerindeki etkisi	55
Şekil 6.5. Mesh boyutunun B3 kirişi üzerindeki etkisi	56
Şekil 6.6. Mesh boyutunun C2 kirişi üzerindeki etkisi	56
Şekil 6.7. Mesh boyutunun R4 kirişi üzerindeki etkisi	57
Şekil 6.8. Mesh boyutunun C3 kirişi üzerindeki etkisi	57
Şekil 6.9. Vecchio ve Collins (1986) modeli ile oluşturulan beton gerilme -şekil değiştirme eğrisi	58
Şekil 6.10. Collins ve Mitchell (1987) modeli ile oluşturulan beton gerilme -şekil değiştirme eğrisi	59
Şekil 6.11. Farklı beton çekme modellerinin R2 kirişi üzerindeki etkisi	59
Şekil 6.12. Farklı beton çekme modellerinin C1 kirişi üzerindeki etkisi	60
Şekil 6.13. Farklı beton çekme modellerinin R3 kirişi üzerindeki etkisi	60
Şekil 6.14. Farklı beton çekme modellerinin B3 kirişi üzerindeki etkisi	61
Şekil 6.15. Farklı beton çekme modellerinin C2 kirişi üzerindeki etkisi	61
Şekil 6.16. Farklı beton çekme modellerinin R4 kirişi üzerindeki etkisi	62
Şekil 6.17. Farklı beton çekme modellerinin C3 kirişi üzerindeki etkisi	62

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 4.1. Mevcut deney kirişlerinin özellikleri	32
Tablo 5.1. R serisinde bulunan kirişlerin göçme anındaki deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılması.....	49
Tablo 5.2. B ve C serisinde bulunan kirişlerin göçme anındaki deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılması.....	50

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

l_0	: Boşluğun uzunluğu, (mm)
d_0	: Boşluk derinliği, (mm)
D	: Kiriş derinliği, (mm)
l_e	: Efektif boşluk uzunluğu, (mm)
ε_{co}	: Beton basınç dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirme, (mm)
f_c	: Sargılı betonda beton basınç gerilmesi, (MPa)
E_c	: Beton elastisite modülü, (MPa)
ε_c	: Beton basınç birim şekil değiştirmesi, (mm)
f_{cc}	: Sargılı beton basınç dayanımı, (MPa)
f_{co}	: Sargısız betonun basınç dayanımı, (MPa)
f_e	: Etkili sargılama basıncı, (MPa)
f_{yw}	: Enine donatının akma dayanımı, (MPa)
ρ_x	: İlgili doğrultudaki enine donatı hacim oranı
ρ_y	: İlgili doğrultudaki enine donatı hacim oranı
k_e	: Sargılama etkinlik katsayısı
a_i	: Kesit çevresindeki düşey donatıların eksenleri arasındaki uzaklık, (mm)
b_o	: Göbek betonunu sargılayan etriyelerin eksenleri arasında kalan kesit boyutu, (mm)
h_o	: Göbek betonunu sargılayan etriyelerin eksenleri arasında kalan kesit boyutu, (mm)
s	: Etriye aralığı, (mm)
A_s	: Boyuna donatı alanı, (mm ²)
ε_{cu}	: Sargılı betondaki maksimum basınç birim şekil değiştirmesi, (mm)
ρ_s	: Toplam enine donatının hacimsel oranı, (mm ²)
ε_{su}	: Donatı çeliğinin kopma birim şekil değiştirmesi, (mm)
$f_{ct,avg}$	: Betonun ortalama çekme gerilmesi, (MPa)
f_{cr}	: Betonun çekme çatlama gerilmesi, (MPa)
$\varepsilon_{t,avg}$	: Ortalama beton çekme birim şekil değiştirmesi, (mm)
f_{ct}	: Betonun maksimum çekme dayanımı, (MPa)
E_s	: Donatı çeliğinin elastisite modülü, (MPa)
b	: Dikdörtgen şekilli sonlu elemanın kısa kenar ölçüsü, (mm)
c	: Dikdörtgen şekilli sonlu elemanın uzun kenar ölçüsü, (mm)
l	: Boşluk uzunluğu, (mm)
d_t	: Boşluğun üstünde kalan bölgenin derinliği, (mm)
d_o	: Boşluğun derinliği, (mm)
d_b	: Boşluğun altında kalan bölgenin derinliği, (mm)
e_o	: Boşluğun kiriş merkezinden kiriş derinliği doğrultusundaki eksantirisitesi, (mm)
a	: Boşluğun sağ ucu ile mesnet arasındaki mesafe, (mm)
s_t	: Boşluğun üstü bölgesinin etriye aralığı, (mm)
s_b	: Boşluğun altı bölgesinin etriye aralığı, (mm)
f'_c	: Beton basınç dayanımı, (MPa)

f_{ck}	: Betonun karakteristik silindir basınç dayanımı, (MPa)
h'	: Mesh yüksekliği, (mm)
t	: Eşdeğer donatı kalınlığı, (mm)

Kısaltmalar

ACI	: American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
mm	: Milimetre
MPa	: Megapascal
TS	: Türk Standartları

GÖVDESİNDE GENİŞ BOŞLUK BULUNAN BETONARME KİRİŞLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

ÖZET

Günümüzde, nüfus artışı ile doğru orantılı olarak konut ve işyeri olarak kullanılan bina sayılarında da önemli artışlar gözlemlenmektedir. Bu artış beraberinde iç mekanların en verimli şekilde kullanılma gereksinimini ortaya çıkarmaktadır. Bu gereksinimleri karşılamak amacıyla tesisat ve havalandırma gibi hizmetlerin, kirişlerde boşluklar açılarak bu boşluklardan geçirilmesi sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntem kat yüksekliğinin, malzeme maliyetinin ve temele gelen toplam yükün azalmasını sağlamaktadır. Öte yandan, kirişlerin gövdelerinde geniş boşluk açmak, kirişlerin yapısal davranışında değişikliklere neden olacaktır. Bugüne kadar, bu sorunu inceleyen ve tasarım önerisi sunan deneysel ve analitik birçok çalışma yapılmıştır.

Bu çalışmada, gövdesinde geniş boşluk bulunan betonarme kirişlerin davranışının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmesi hedeflenmiştir. Analitik modelde kirişler, diğer modelleme yöntemlerinden farklı olarak doğrusal olmayan katmanlı kabuk elemanlarla modellenmiştir. Ortaya atılan modelleme yönteminden elde edilen sonuçlar literatürde yer alan deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca sonlu eleman boyut değişiminin ve beton çekme modelinin modelleme üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla parametrik bir çalışma yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Doğrusal Olmayan Analiz, Geniş Boşluk, SAP2000, Sonlu Elemanlar Yöntemi.

NONLINEAR FINITE ELEMENT MODELING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH LARGE WEB OPENINGS

ABSTRACT

In recent years, the number of residential and office buildings increased significantly in line with population growth. This increase leads to the necessity of using indoor in the most efficient way. In order to meet these requirements, it is often preferred to pass the mechanical installation such as ventilation and plumbing through the reinforced concrete beam web. This ensures low storey height that leading to low material cost and the vertical loads reduces significantly. On the other hand, large opening in the web of the beams will cause changes in the structural behavior of the beams. Many experimental and analytical studies have been carried out that offer design proposals to examine this problem.

The objective of this study was to construct a reliable nonlinear finite element model for simulating the behavior of reinforced concrete beams with large web opening. In the analytical model, beams are modeled with non-linear layered shell elements, unlike other modeling methods. The results obtained from the analytical model are compared with the experimental data in the literature. The analytical results showed good conformity with the experimental results. In addition, a parametric study was carried out to investigate the effect of mesh size and concrete tension model on the analytical results.

Keywords: Nonlinear Analysis, Large Opening, SAP2000, Finite Element Method.

GİRİŞ

Günümüzde, hızla gelişen teknoloji ile birlikte insan hayatını kolaylaştıracak donanımlara sahip bina tasarımları da giderek önem kazanmaktadır. Özellikle alışveriş merkezi, otel, rezidans, akıllı bina gibi modern yapılarda daha geniş kapsamlı hizmet sunumu hedeflendiği için, bu tip binaların tasarımında havalandırma, klima, elektrik gibi tesisatların yanı sıra birçok teknolojik donanım için de gereken koşulların sağlanması önem arz etmektedir. Bu donanımlar kimi zaman bir kanal yardımı ile kiriş altından geçirilmekte ve estetik kaygılardan ötürü asma tavan ile gizlenmektedir. Ancak bu durum bina iç mekanlarında ciddi bir hacim kaybına neden olmaktadır. Mimari açıdan uygunluğunu sağlamak ve iç mekanlarda hacim kaybını önlemek amacıyla uygulanan bir başka yöntem ise, bahsi geçen tesisatların kiriş gövdelerinde açılan boşluklardan geçirilmesidir. Bu yöntem, özellikle çok katlı yapılarda malzeme maliyetini ve bina yüksekliğini düşürerek daha ekonomik bir tasarım sunmaktadır. Ancak bugüne kadar yapılmış birçok çalışma, kiriş gövdesinde açılan boşluğun, kirişlerin yapısal davranışında önemli değişikliklere neden olduğunu göstermiştir.

Bu tez çalışması kapsamında, literatürdeki deneysel bir çalışmada yer alan gövdesinde geniş boşluk bulunduran dikdörtgen kesitli betonarme kiriş numunelerinin, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmesi hedeflenmiştir. Oluşturulan modelde doğrusal olmayan katmanlı kabuk elemanlar kullanılmıştır. Kirişlerin analizi deplasman kontrollü doğrusal olmayan analiz ile yapılmış ve analizlerden elde edilen sonuçlar deneysel çalışma verileri ile karşılaştırılmıştır. Mesh boyutunun ve beton çekme modelinin değişken olarak kullanıldığı parametrik bir çalışma yapılarak değişkenlerin modelleme üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde, boşluklu kirişler hakkında genel bir bilgi verilmiştir. İkinci bölümde, yapılan literatür araştırması özetlenmiştir. Üçüncü bölümde, sonlu elemanlar yönteminin modelleme aşamalarına kısaca yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde, modellenen kiriş numuneleri tanıtılmış ve kirişlerin modelleme aşamaları anlatılmıştır. Beşinci bölümde analitik modelden elde edilen analiz sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Altıncı bölümde mesh boyutunun ve beton çekme modelinin analiz sonuçları üzerindeki etkisini incelemek amacıyla karşılaştırılmalı olarak parametrik bir çalışma yapılmıştır. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve öneriler sunulmuştur.

1. GENEL

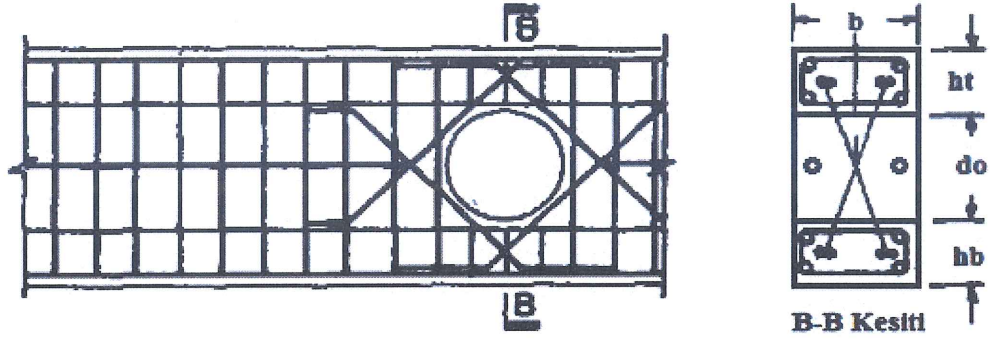
Modern yapılarda havalandırma, su tesisatı, telefon ve internet gibi hizmetlerin bina içerisinde dağıtımını sağlamak amacıyla, kiriş gövdelerinde dairesel, dikdörtgen, üçgen, trapez, elmas gibi farklı şekillerde boşluklar açılmaktadır. Ancak bahsi geçen boşluk şekilleri içerisinde dairesel ve dikdörtgen şekilli boşluklar Şekil 1.1’de de görüldüğü üzere en çok tercih edilenlerdir.



Şekil 1.1. Boşluklu kirişin genel görünümü [1]

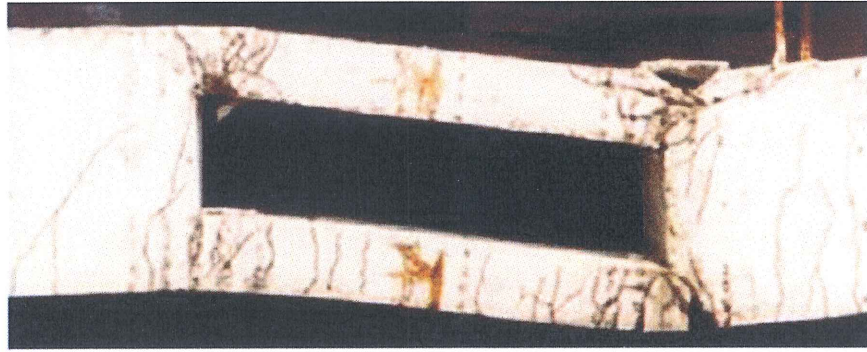
Literatürde boşluklu kirişler, gövdelerinde açılan boşluk boyutlarına göre geniş boşluklu ve küçük boşluklu kirişler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Bugüne kadar küçük ve geniş terimlerini ifade eden birçok tanım öne sürülmüştür. Ancak bahsi geçen terimleri ifade eden net bir tanım hala bulunmamaktadır. Somes ve Corley (1974) bu konuda dairesel bir boşluğun çapı, kiriş derinliğinin % 25’inden büyükse geniş boşluklu kiriş olarak kabul edilebileceğini söylemiştir[2]. Mansur (1998), boşluk genişliği eğer kiriş derinliğinden küçükse veya kiriş derinliğine eşitse küçük boşluklu kiriş, kiriş derinliğinden büyükse geniş boşluklu kiriş olduğunu söylemiştir. Dairesel boşluklu kirişlerde ise boşluğa eşdeğer bir kare düşünülerek benzer mantığın yürütülebileceğini belirtmiştir [3]. Mansur ve Tan (1999), boşluk derinliğinin kiriş derinliğine oranı %40’dan düşükse küçük boşluklu kiriş olarak kabul edilebileceğini belirtmişlerdir [4]. Kirişlerdeki küçük boşluklar, etrafında erken çatlakların oluşmasına ve kirişin gerilme akışında süreksizliklere neden olur. Küçük boşluklu betonarme kirişlerde, eğer boşluk kirişin ortasında ise yük kapasitesinde

oluşan kayıplar düşük seviyelerdedir. Küçük boşluklar betonarme kirişlerde kesme göçmesine ve diyagonal çatlaklara neden olur. Ancak bu tip olumsuzluklar, Şekil 1.2’de görüldüğü gibi boşluk etrafında yeterli donatılandırma yapıldığında ortadan kaldırılabilir.



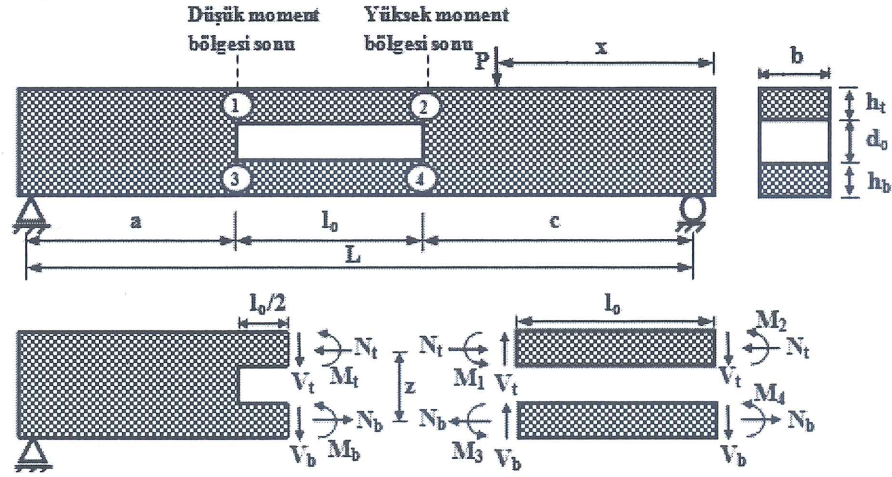
Şekil 1.2. Küçük boşluklu bir kirişin donatı detayı [4]

Küçük boşluklu kirişlerin göçme modu kesme iken, geniş boşluklu kirişlerin göçme modu eğilmedir. Kiriş gövdesinde açılan geniş boşluk, kirişin eğilme rijitliğini ve yük taşıma kapasitesini düşürür ve boşlukların etrafında yüksek gerilme yığılmalarına sebep olur. Şekil 1.3’te görüldüğü gibi yüksek gerilme yığılmaları aşırı miktarda çatlak oluşumuna sebep olur.



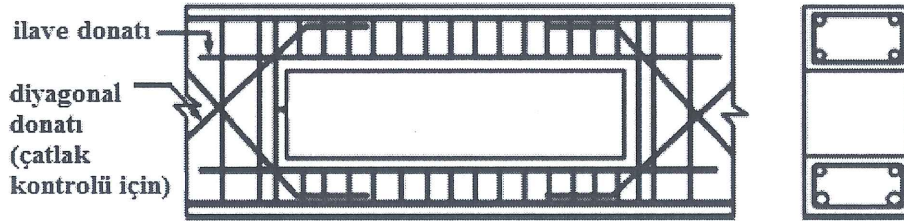
Şekil 1.3. Geniş boşluklu bir kirişin göçme modu [2]

Şekil 1.3’te, boşluğun özellikle yükün uygulandığı taraftaki kenarında, betonun ciddi miktarda ezildiği, kirişin yük taşıma kapasitesini yüksek oranda kaybettiği ve geniş çatlakların oluştuğu görülmektedir. Boşluğun diğer kenarında ise hasar daha düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu sebeple boşluğun sağında ve solunda kalan bölgeler yükün uygulanma noktasına göre, Şekil 1.4’te görüldüğü gibi yüksek moment bölgesi ve düşük moment bölgesi olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 1.4. Geniş boşluklu bir kirişin serbest cisim diyagramı [2]

Geniş boşluklu kirişlerde boyuna donatı daha erken akar ve bu durum deformasyonlarda büyük artışlara neden olur. Boşluk uzunluğu ve derinliği arttıkça kirişin üzerinde oluşturduğu olumsuz etki de artmaktadır. Bu sebeple geniş boşluklu kirişlerin tasarımında, kiriş gövdesinde açılan geniş boşluğun oluşturduğu hasarı sınırlandırabilmek için, Şekil 1.5'te görüldüğü gibi bir donatı konfigürasyonu mutlaka kullanılmalıdır.



Şekil 1.5. Geniş boşluklu bir kirişin donatı detayı [2]

Çalışma kapsamında, kiriş gövdelerinde açılan geniş boşlukların kirişlerin davranışında oluşturduğu etkileri incelemek amacıyla yapılmış deneysel bir çalışmanın modellenmesi yapılmıştır. Bu sebeple bahsi geçen kiriş tipleri ile ilgili önceden yapılmış deneysel ve analitik çalışmalara kısaca değinilmiştir.

2. GENİŞ BOŞLUKLU KİRİŞLERLE İLGİLİ LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR

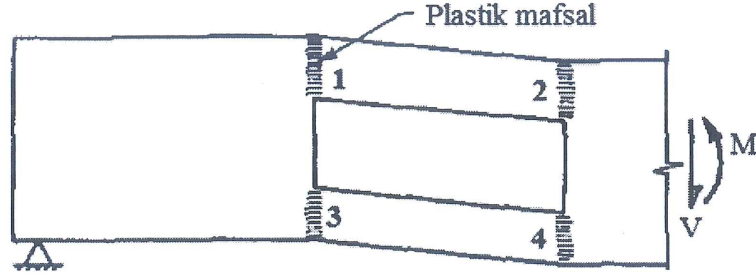
2.1. Giriş

Gövdesinde geniş boşluk bulunan kirişler, genellikle boşluk bölgesinde vierendeel paneli gibi davranmaktadır. Vierendeel paneli, gövdesinde dikdörtgen boşluk bulunan, eğilme momentine karşı dirençli dikdörtgen bir paneldir. Ayrıca her bir köşesinde sabit mafsallara sahiptir. Kiriş gövdesinde açılan geniş boşluk, kirişin eğilme rijitliğini ve yük kapasitesini düşürürken deplasmanlarını arttırmaktadır. Boşluk bölgesinde yüksek gerilme yığılmaları meydana gelmekte ve bu duruma bağlı olarak aşırı çatlaklar oluşmaktadır. Bahsi geçen kirişler genellikle eğilme davranışının hakim olduğu bir göçme modu sergilemektedir. Kiriş gövdesinde açılan boşluğun kirişin yapısal davranışında oluşturduğu etkileri incelemek amacıyla bugüne kadar birçok çalışma yapılmıştır. Bu bölümde, bu konu ile ilgili yapılmış deneysel ve analitik çalışmalara yer verilmiştir.

2.2. Deneysel Çalışmalar

Nasser ve diğ. (1967), dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerde geniş bir boşluk açmanın, elemanın davranışında nasıl bir değişim oluşturduğunu incelemek amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada teorik bir yaklaşımda bulunmuşlardır. Bu yaklaşımda, boşluğun üstündeki ve altındaki bölgelerin Vierendeel paneli gibi davrandığını varsaymış ve büküm noktalarının bu bölgelerin ortasında olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca kesme kuvvetinin boşluğun üstündeki ve altındaki bölgelere, bu bölgelerin kesit alanlarıyla orantılı dağıldığını belirtmişlerdir. Deney sonucunda, geniş boşluklu dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi Vierendeel paneli davranışına benzer bir davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Dönüm noktası, kesme dağılımı ve kesme faktörleri ile ilgili varsayımların dikdörtgen kesitli kirişler için geçerli olduğunu söylemiş ve bu varsayımları diğer durumlar için de tavsiye etmişlerdir. Yeterince donatılandırılmış boşluklu kirişlerde,

boşluğun etkisiyle kirişlerin maksimum kapasitesinde bir değişikliğin olmadığı ancak eğilme rijitliğinde bir düşüş olduğu vurgulanmıştır [5].

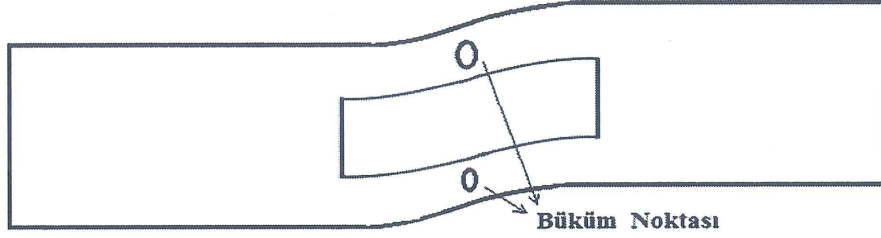


Şekil 2.1. Vierendel paneli [6]

Barney ve diğ. (1977), kiriş gövdesinde açılan geniş boşlukların, öngerilmeli betonarme kirişlerin performansında oluşturduğu etkiyi incelemek için, 13'ü uzun açıklıklı, 5'i kısa açıklıklı olmak üzere 18 adet T kesitli kiriş üzerinde deney yapmışlardır. Kirişler yayılı yük ile yüklenmiştir. Çalışmada incelenen parametreler, boşluğun boyutu ve konumu, kesme donatısının yeri ve miktarı ve eğilme donatısı miktarıdır. Kirişlerin davranışı Vierendeel kafesine benzetilmiştir. Test sonuçları, öngerilmeli betonarme kirişlerde, kirişlerin kullanılabilirliklerini ve dayanımlarını yitirmemeleri koşuluyla geniş boşlukların açılabilceğini göstermiştir. Geniş boşluklu öngerilmeli betonarme kirişlerin tasarımında, boşluk etrafında yeterli kesme donatısının bulundurulması gerektiği vurgulanmıştır [7].

Mansur ve diğ. (1985), kesme ve eğilme etkisine maruz kalan, gövdesinde geniş boşluk bulunan dikdörtgen kesitli betonarme kirişler için bir tasarım yöntemi önermişlerdir. Bu yöntemde, boşluğun boyutunun ve konumunun, boşluğun üst ve alt bölgelerindeki kesme kuvveti miktarlarında oluşturduğu etkileri açıklayabilmeyi amaçlamışlardır. Bu bağlamda, tekil yüklemeye maruz bırakılmış 12 adet betonarme kirişi test etmişlerdir. Çalışmada ana değişkenler, boşlukların uzunluğu, derinliği, konumu, kirişin boyuna eksenine ile boşluğun boyuna eksenine arasındaki mesafe, köşe donatılarının miktarı ve düzenidir. Deney sonucunda boşluğun, kirişlerin yük taşıma kapasitesini düşürdüğü açıkça gözlemlenmiştir. Boşluğun üstündeki ve altındaki bölgelerin vierendeel paneli gibi davrandığını ve bu bölgelerde Şekil 2.2'de görüldüğü gibi büküm noktalarının oluştuğunu belirtmişlerdir. Ancak oluşan büküm noktaları konumlarının, bu bölgelerde yerleştirilen kiriş boyuna donatılarının yerleşim düzenine bağlı olduğu, eğer donatı yerleşimi simetrik ise büküm

noktalarının ortada oluşacağı belirtilmiştir. Boşluklu kirişlerde boşluk bölgesinin iki tarafında bulunan dolu kesitler yeterince donatılabilirse, kirişlerin boşlukların her bir kenarında Şekil 2.1’de görüldüğü gibi mafsallar oluşturarak göçeceğini söylemişlerdir. Ayrıca diyagonal köşe donatısının çatlak ve deformasyon kontrolünü sağlamada düşey donatıya göre daha etkili olduğunu belirtmişlerdir [8].

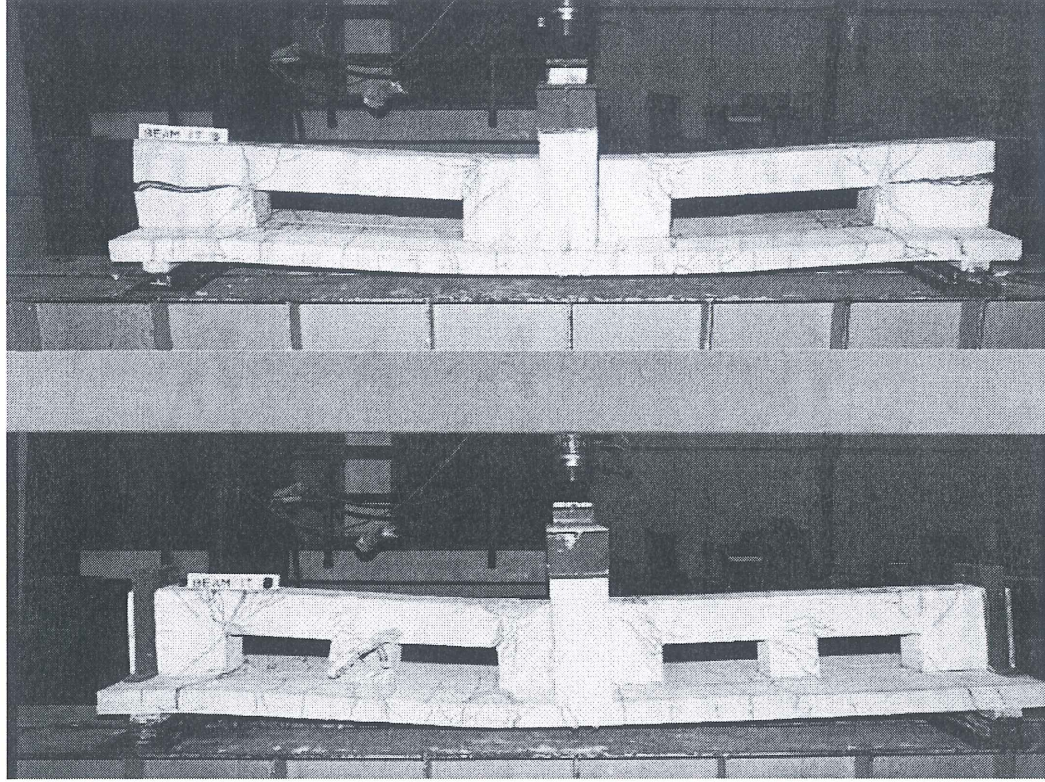


Şekil 2.2. Geniş boşluklu bir kirişin büküm noktaları

Mansur ve diğ. (1991), gövdesinde geniş boşluk bulunan sekiz adet sürekli betonarme kirişi geniş boşlukların kirişlerde oluşturduğu etkileri detaylı incelemek amacıyla test etmişlerdir. Kirişler eşit sayıda boyuna donatı içermektedir. Çalışmada ana değişkenler, açıklık sayısı, boşluğun boyutu ve konumudur. Deney sonucunda, deformasyonlar ve göçme yükleri, çatlak oluşumu ve mafsall oluşum sırası incelenmiştir. Boşlukların iki ucunun plastik mafsall oluşumuna en müsait yerler olduğu, daha büyük bir boşluğun kirişin daha erken çatlamasına ve daha büyük deformasyonlara neden olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, boşluk konumunun çatlama yükü üzerinde az bir etkisinin olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak boşluk konumunun kesit tesirlerinin ve momentlerin yüksek olduğu bölgelerde olduğu durumlarda ise daha büyük sapmalara neden olduğunu belirtmişlerdir [9].

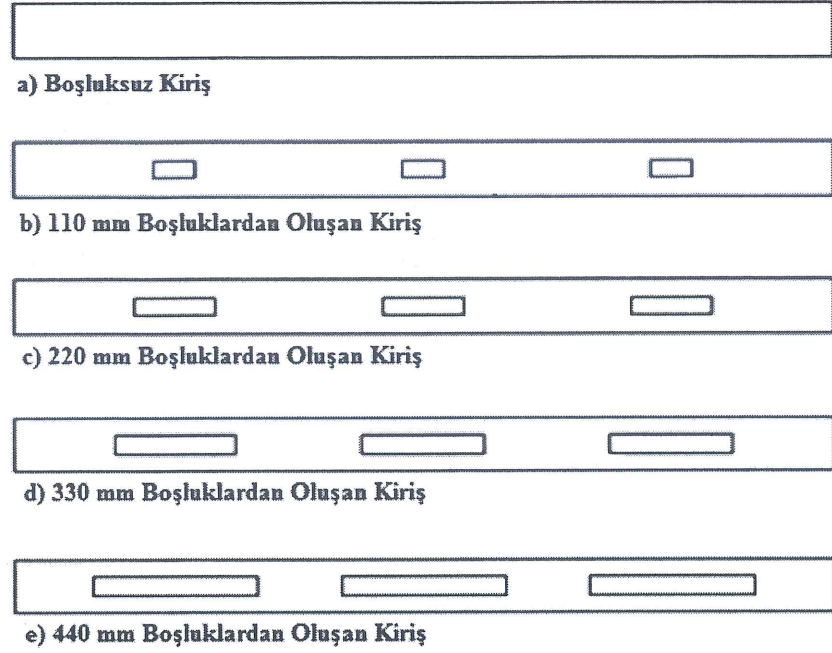
Tan ve diğ. (1996), T kesitli betonarme kirişlerin pozitif ve negatif moment bölgelerinde açılmış geniş boşlukların, kirişlerin davranışında oluşturduğu değişimi incelemek amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışma IT ve T adlı iki seriden oluşmaktadır. Çalışma kapsamında gövdesinde geniş boşluk bulunan 15 adet T kesitli betonarme kiriş kullanmışlardır. Çalışmada, Mansur ve diğ. (1992) tarafından önerilmiş analitik bir yöntemi kullanmışlardır [10]. Deneyler sonucunda, geniş boşlukların kirişlerde erken eğilme çatlaklarının oluşmasına ve yük taşıma kapasitelerinde düşüslere neden olduğu ve yapılan çalışmanın önceki çalışmaları desteklediği gözlemlenmiştir. Ayrıca çalışmada, gövdesinde uzun bir boşluk bulunan T kesitli kirişlerin davranışı ile birden fazla kısa boşluk bulunan T kesitli kirişlerin

davranışını Şekil 2.3'te görüldüğü üzere karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Deney sonucunda birden fazla kısa boşluktan oluşan kirişlerin dayanım ve kullanılabilirlik performansının, uzun bir boşluktan oluşan kirişlere göre daha iyi olduğu gözlenmiştir [11].



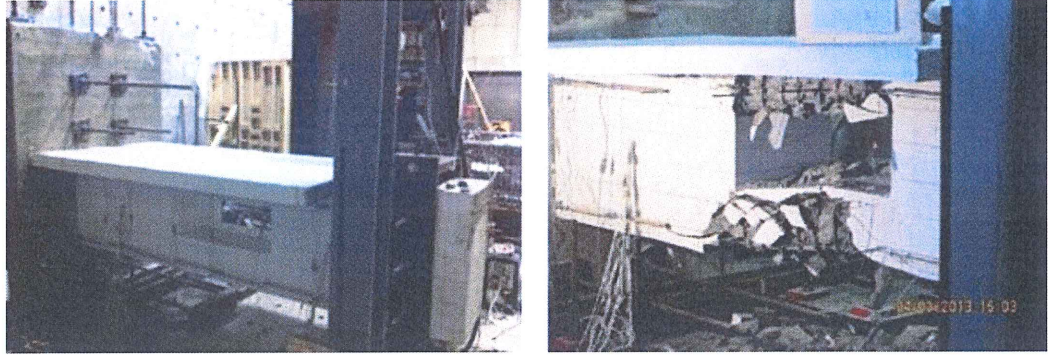
Şekil 2.3. Gövdesinde uzun bir boşluk veya birden fazla kısa boşluk bulunan T kesitli iki kirişin davranışlarının karşılaştırılması [11]

Daniel ve Revathy (2014) bu çalışmada, boşluklu betonarme kirişlerin eğilme davranışını incelemişlerdir. Çalışmada bir adet boşluksuz kontrol kirişi ve dört adet boşluklu kiriş kullanılmıştır. Boşluklu kirişler, biri kirişin tam ortasında, diğer ikisi kirişin iki tarafındaki kesme açıklıklarının ortasında bulunan toplam üç adet boşluktan oluşmaktadır. Çalışmada, boşlukların konumu Şekil 2.4'te görüldüğü üzere sabit tutulmuş, sadece boşlukların uzunlukları değiştirilmiştir. Boşluklu kirişlerden elde edilen sonuçlar kontrol kirişinin sonuçları ile karşılaştırıldığında, kiriş çatlama yüklerinin ve yük taşıma kapasitelerinin düştüğü, deformasyonların ise arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca boşluk uzunluğu arttıkça rijitliğin ve yük taşıma kapasitesinin düştüğü belirtilmiştir [12].



Şekil 2.4. Boşluklu ve boşluksuz kirişlerin şematik gösterimi [12]

Herrera ve Lemnitzer (2014), literatürde deprem bölgelerinde yapılan, gövdesinde geniş boşluk bulunan betonarme kirişler ile ilgili yeterli sayıda çalışma bulunmadığı için, bahsi geçen kirişlerin deprem yüklemesi altındaki tepkisini incelemek amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. İki adet T kesitli betonarme kiriş numunesi üzerinde yapılan deneyin ana değişkenleri, boşluk, kirişin uzunluğu ve donatı düzenlenme şeklidir. Kirişler uç kısımlarından, Şekil 2.5'te görüldüğü gibi tekil yük ile yüklenmiştir. Deney sonucunda, boşluğun üstündeki ve altındaki bölgelerin Vierendeel paneli gibi davrandığı ve kesme kuvvetinin bu bölgelere kesit alanlarıyla orantılı olarak dağıldığı gözlemlenmiştir. Boşlukların kenarlarında, ilk olarak diyagonal çatlakların ve ardından boşluğun alt bölgesinde belirgin eğilme çatlaklarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Kirişte, Şekil 2.5'te görüldüğü üzere aşırı miktarda beton parçalanmasının ve donatı bükülmesinin oluştuğu, akma gerçekleşikten sonra önemli ölçüde dönmenin meydana geldiği gözlemlenmiştir [13].



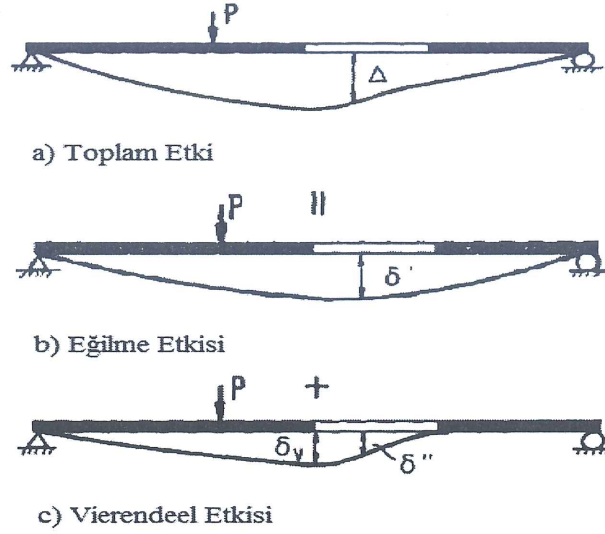
Şekil 2.5. Gövdesinde geniş boşluk bulunan T kesitli kirişin deney öncesi ve sonrası görüntüleri [13]

2.3. Analitik Çalışmalar

Mansur ve diğ. (1984), geniş boşluklu betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesini tahmin edebilmek için bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde, boşluğun üstündeki ve altındaki bölgeleri arasındaki kesme yükü dağılımının ve kiriş göçme yükünün, sadece kesit özelliklerine değil aynı zamanda boşluğun uzunluğuna, derinliğine ve konumuna da bağlı olduğunu savunmuşlardır. Yöntemlerini doğrulayabilmek için, tekil yük ile yüklenmiş basit mesnetli 14 adet geniş boşluklu betonarme kiriş içeren deneysel bir çalışmayı kullanmışlardır. Yöntemde, boşluğun üstündeki ve altındaki bölgelerin boşluğun her iki tarafındaki rijit mesnetlerle çerçevelendiği, bu bölgelerin her bir köşesinde mafsalların olduğu ve kirişin bu dört plastik mafsallarla Şekil 2.1’de görüldüğü gibi göçtüğü varsayılmıştır. Çalışmada, küçük boşluklarda kesmenin boşluk üstündeki bölge tarafından taşındığı, geniş boşluklu kirişlerde ise boşluk altındaki bölgenin de kesmeyi taşımaya yardım ettiği belirtilmiştir. Ayrıca boşluğun uzunluğu ve kirişin merkezine olan kiriş derinliği doğrultusundaki eksantrisitesi arttıkça kirişin yük taşıma kapasitesinin düştüğü gözlemlenmiştir. Önerilen yöntem ile deney sonuçları karşılaştırıldığında sonuçlar yöntemin tutarlı olduğunu göstermiştir [6].

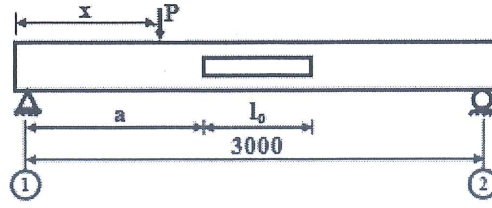
Mansur ve diğ. (1991), bu çalışmada önceki deneysel çalışmalarına [8,9] ait kiriş numunelerinin verilerini kullanarak yeni bir analitik çalışma yapmışlardır. Bahsi geçen kiriş numuneleri, gövdesinde geniş boşluk bulunan dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerdir. Çalışmada, büyük açıklıklardan oluşan betonarme kirişlerin yük-deplasman eğrilerini ardışık elastik analizler yaparak tahmin edebilmek amacıyla bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntemde, bir noktadaki toplam deplasman

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi hesaplanmıştır. Önerilen yöntemden elde edilen sonuçların deney sonuçları ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.[14].

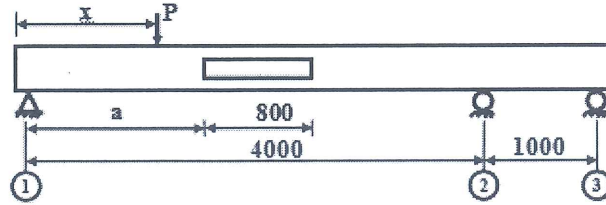


Şekil 2.6. Geniş boşluklu betonarme kirişlerin deformasyonu [14]

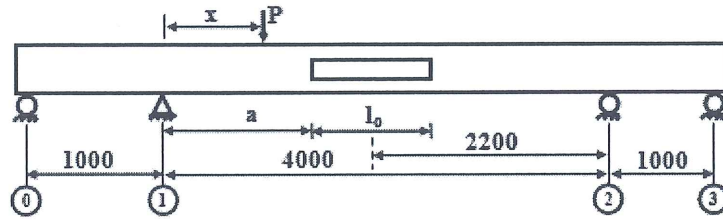
Mansur ve diğ. (1992) tarafından yapılan bir çalışmada, geniş boşluklu betonarme kirişlerin servis yükü altındaki deformasyonunu tahmin edebilmek için, basit bir yöntem geliştirmeyi amaçlamışlardır. Yöntemi, gövdesinde geniş boşluk bulunan 22 adet betonarme kirişten oluşan deneysel bir çalışmanın sonuçlarını kullanarak doğrulamayı hedeflemişlerdir. Deneysel çalışmada Şekil 2.7'de gösterildiği gibi, basit mesnetli, iki açıklıklı ve üç açıklıklı sürekli kirişlerden oluşan üç seri bulunmaktadır. Çalışmada kirişler, iki dolu kısımdan ve bir boşluklu kısımdan oluşan yapısal bir eleman gibi modellenmiştir. Boşluk bölgesinde gerçek davranışı yakalayabilmek için, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi eşdeğer kesme ve eğilme rijitlikleri tanımlamışlardır.



a) Basit mesnetli kiriş

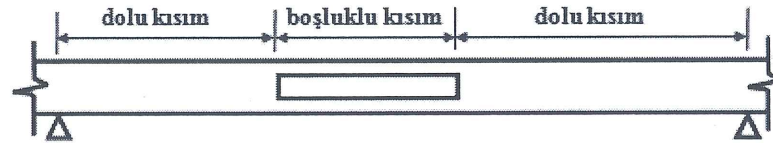


b) İki açıklıklı sürekli kiriş

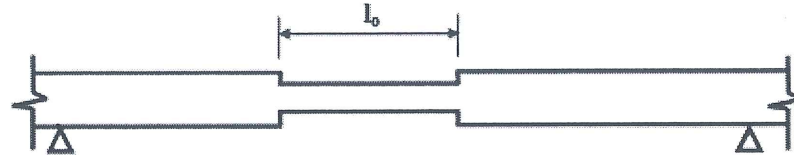


c) Üç açıklıklı sürekli kiriş

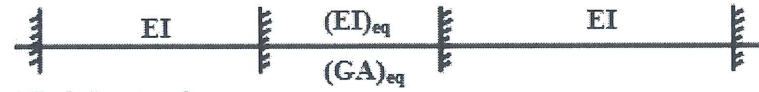
Şekil 2.7. Mevcut deneysel kirişlerin yükleme ve mesnet detayları [10]



a) Boşluklu kiriş



b) Eşdeğer kiriş



c) Eşdeğer tutulmuş yapı

Şekil 2.8. Eşdeğer kiriş parçası [10]

Eşdeğer kesme rijitliği, boşluğun altındaki ve üstündeki bölgelerin eğilme rijitliğine ve boşluğun efektif uzunluğuna bağlıdır. Efektif uzunluk, Denklem (1.1)'de gösterildiği gibi, boşluğun derinliğinin kirişin derinliğine oranının bir fonksiyonu

olarak varsayılmıştır. Bu fonksiyonda l_0 boşluğun gerçek uzunluğu, l_e boşluğun efektif uzunluğu, d_0 boşluğun derinliği ve D kiriş derinliğidir. Boşluk derinliğinin kiriş derinliğine oranı $(\frac{d_0}{D})$ değeri, 0,35 ila 0,55 değerleri arasında değişmektedir.

$$\frac{l_0}{l_e} = 1 - \left(\frac{d_0}{D}\right)^n \quad (1.1)$$

Çalışmadaki deney verileri için n değeri, doğrusal olmayan regresyon analizi ile 1,45 bulunmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırıldığında, önerilen method ile hesaplanan deformasyonların ve mesnet reaksiyonlarının deneysel verilerle uyumlu olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca pratik tasarım yapması gereken mühendisler bu yöntemi kullanmalarını tavsiye etmişlerdir [10].

Tan ve Mansur (1996) bu çalışmada, geniş boşluğun kiriş üzerindeki konumu ile ilgili genel kurallar içeren basit bir tasarım kılavuzu önermişlerdir. Bu kılavuzda, boşluklu kirişlerin boşluğun üstündeki ve altındaki bölgelerinin, donatıyı sargılayabilecek yeterli miktarda beton hacmine sahip olması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca, boşluğun üstündeki bölgenin kesme donatısının verimli kullanılmasını sağlayabilmek için de yeterince derin olması gerektiği vurgulanmıştır. Boşluk derinliğinin kiriş derinliğinin yarısından büyük olmaması gerektiği önerilmiştir. Boşluğun uzunluğunun boşluğun altındaki ve üstündeki bölgelerin dayanıklılığına bağlı olarak artırılıp azaltılabileceğini belirtmiştir. Boşluğun uzunluğu arttıkça, tek bir boşluk açmak yerine aynı geçit için birden fazla kısa boşluk açmanın daha iyi bir tasarım olacağını belirtmişlerdir. Ayrıca, gövdesinde birden fazla boşluk bulunan kirişlerde, boşlukların birbirinden bağımsız çalışmasını sağlayabilmek için, iki boşluk arası mesafenin en az kiriş yüksekliğinin yarısı kadar olması gerektiği vurgulanmıştır [15].

Elçi (2005) çalışmasında, daha önce yapılmış çalışmaları esas alarak, gövdesinde geniş boşluk bulunan kirişlerin statik tasarımının nasıl yapılması gerektiği ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Geniş boşluklu kirişlerin statik tasarımda ilk olarak, yüklerden dolayı oluşan kesit tesirlerinin hesaplanması gerektiğini söylemiştir. Ardından yüksek kesit tesirlerinin olduğu kritik kesitlerde donatılandırmanın yapılması gerektiğini belirtmiştir. Son olarak kirişlerin servis yükleri altında tüm işlevlerini

yerine getirebilmesi için gerekli olan boyutlandırmanın yapılması gerektiğini vurgulamıştır [16].

Abdalla ve diğ. (1995) bu çalışmada, öngerilmeli dikdörtgen boşluklu kirişleri sonlu elemanlar yöntemi ile modelleyip, dinamik analiz yöntemi ile analiz yapmışlardır. Çalışmanın amacı, gövdesinde boşluk bulunan öngerilmeli betonarme kirişlerin doğal frekanslarını belirlemek ve dinamik yüklemenin öngerilmeli boşluklu kirişlerin davranışına etkisini incelemektir. Kesme ve eğilme bölgesinde kiriş gövdesinde açılmış boşlukların uzunlukları 51 mm ile 1143 mm arasında değişkenlik göstermektedir. Dikdörtgen, T ve I kesitlere sahip boşluklu kirişlerin bir kısmı basit mesnetli ve tek açıklıklı iken, bir kısmı iki açıklıklı ve sürekli. Çalışmada ana parametreler, boşluğun genişliği, derinliği, yatay ve dikey konumları, analiz kirişinin kesit tipi, açıklık sayısı, açıklık uzunluğunun eşitliği ve sürekliliğidir. Basit mesnetli kirişlerde iki farklı boşluk konumu mevcuttur; ilki yüksek kesme bölgesinde açılan kesme boşluğu, diğeri ise yüksek moment bölgesinde açılan eğilme boşluğudur. Kirişlerin dinamik analizi yapılmış ve analiz sonucunda, basit mesnetli ve kesme boşluklu kirişlerin temel frekans değerlerinin, boşluksuz bir kirişe ait frekans değerinden düşük çıktığı gözlemlenmiştir. Boşlukları maksimum eğilme bölgesinde açılmış kirişlerin temel frekans değerlerinin ise boşluksuz bir kirişe ait frekans değerinden yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Kesme boşluklu kirişlerde, boşluğun boyutlarının temel frekansa etkisinin, eğilme boşluklu kirişlere göre daha fazla olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, özellikle farklı açıklıklara sahip sürekli kirişlerde, boşluğun yatay doğrultudaki konumunun, doğal frekans üzerinde önemli bir etkisinin olduğu gösterilmiştir [17].

Ehmann ve Schnellenbach-Held (2001) bu çalışmada, geniş boşluklu kirişlerin davranışını etkileyen önemli parametrelerin tanımlanmasında ve değerlendirmesinde yenilikçi bir modelleme şekli sunmuşlardır. Malzeme tanımında doğrusal olmayan malzeme özellikleri kullanılmış ve kirişler sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Çalışma konusunda, daha çok yüksek kesme gerilmelerinin bulunduğu bölgelerdeki boşluklu kirişlere yoğunlaşmışlardır. Ana parametreler, yüksek kesme bölgesindeki boşluğun uzunluğu, moment-kesme oranı, boşluğun alt ve üst bölgesindeki bölgelerin donatı miktarıdır. Bu parametreler, kirişlerin göçme nedeninin ve maksimum yükünün belirlenmesinde, boşluğun alt ve üst

bölgelerindeki kesme kuvvetinin dağılımında ve bu bölgelerdeki büküm noktalarının konumunun belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu sebeple, 12 adet deneysel çalışma üzerinde bu parametreler denenmiş ve modelleme sonuçlarının deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu gözlemlenmiştir [18].

Ramadan ve diğ. (2009), kiriş açıklığının ortasından tekil yük ile yüklenmiş, boşluklu ve boşluksuz betonarme iki kirişin modellemesini, ANSYS programını kullanarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar ile yapmışlardır. Çalışmada ayrıca, ANSYS programında bulunan doğrusal olmayan sonlu eleman tipleri kullanılarak modellemelerin nasıl yapılabileceği hakkında bilgi vermişlerdir. Modellemeden elde ettikleri sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Boşluksuz kirişin analitik modelinden elde edilen sonuçların, kirişin yük taşıma kapasitesini %70 oranında doğru tahmin ettiği, ancak analitik modelden elde edilen sonuçlarda kirişin yük taşıma kapasitesinin ve rijitliğinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda kiriş gövdesinde açılan geniş boşluğun, kirişlerin rijitliğini ve maksimum yük kapasitesini %20 oranında azalttığı ve maksimum deformasyon noktasını boşluk bölgesine kaydıracağı vurgulanmıştır [19].

Ramadan ve diğ. (2015) bu çalışmada, farklı yükleme tipleri ile yüklenmiş, gövdesinde farklı ebatlarda boşlukların bulunduğu kirişlerden oluşan dokuz adet seriyi, ANSYS programını kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir. Çalışmada boşluklu betonarme kirişlerin tasarımı için basit önergeler geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Ana parametreler, mesnetlenme koşulları, açıklığın derinliğe oranı, çekme donatısı oranı, boşluğun konumu, basit mesnetli kirişlerde çekme donatısı detayı ve yükleme tipidir. Sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen kirişlerin analizi yapılmıştır. Modellemeden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu ve boşluklu betonarme kirişlerin tasarımında alternatif bir yöntem olabileceği vurgulanmıştır [20].

3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

3.1. Giriş

Sonlu elemanlar yöntemi, “parçadan bütüne gitme” genel prensibine dayanan, karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılan güçlü bir hesaplama yöntemidir.

Sonlu elemanlar yöntemi geçmişte birçok alanda problemlerin basite indirgenerek çözülmesi amacıyla kullanılmıştır. Günümüzde inşaat mühendisliği, elektrik mühendisliği, otomotiv mühendisliği, uzay ve uçak mühendisliği, elektromanyetik, akışkanlar mekaniği, ısı transferi gibi birçok alanda kullanımı mevcuttur. Bu yöntemin özellikle mühendislik alanında popüler olmasının ana sebebi genel bir programın sadece girdi verilerini değiştirerek özel problemleri çözebiliyor olmasıdır.

Betonarme elemanların davranışı, bir takım varsayımlar yapılarak geleneksel matematik yöntemleri ile çözülebilmektedir. Ancak betonarme elemanlar, gerçekte karışık sınır koşullarına ve doğrusal olmayan malzeme özelliklerine sahiptir. Bu sebeple, gerçek davranışı geleneksel matematik yöntemleri ile yakalamak oldukça güçtür. Sonlu elemanlar yöntemi betonarme elemanların davranışını hesaplamak için kullanılabilecek en hassas hesaplama yöntemidir.

Bu çalışmada, gövdesinde geniş boşluk bulunan kirişlerin modellenmesi hassas ve pratik çözümler sunması sebebi ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Kirişler SAP2000 programı kullanılarak doğrusal olmayan katmanlı kabuk elemanlarla modellenmiştir. Kirişlerin tüm davranış özellikleri, gerçek davranışı yakalamak ve doğru sonuçlar elde edebilmek amacıyla doğrusal olmayan özelliklerle tanımlanmıştır. Bu bölümde sonlu elemanlarla modelleme aşamalarına yer verilmiştir. Modellemede kullanılan üç ana aşama şunlardır: Modelin oluşturulması, kullanılan malzeme modellerinin tanıtılması ve tüm sistemin çözülerek bilinmeyenlerin elde edilmesidir.

3.2. Sonlu Elemanlarla Modelleme Aşamaları

Sonlu elemanlar yöntemi, inşaat mühendisliği alanında yapı elemanlarının deplasman ve gerilme analizlerini yapmak amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. Modelleme yapılırken genel olarak şu adımlar izlenmektedir: İlk olarak yapı elemanı daha küçük elemanlara ayrılır ve elemanların tipi belirlenir. Ardından her elemanın sınır şartları ve yapısal özellikleri birer matris formuna dönüştürülür. Denge denklemleri veya yaklaşık deplasman modeli kullanılarak elemanların rijitlik matrisleri ve yük vektörleri hesaplanır. Denklemler uygun şekilde birleştirilir ve sınır şartları belirlenir. Son olarak bilinmeyen düğüm noktası deplasmanları çözülür ve gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler hesaplanır.

3.2.1. Modelin oluşturulması

Sonlu elemanlar yönteminde elemanlar, birbirine bağlı çok sayıda küçük parçalara ayrılmaktadır. Bu işlem mesh etme olarak isimlendirilmektedir ve sonlu elemanlar yönteminin en önemli noktalarından biridir. Hassas çözümler elde edebilmek için mümkün olduğu kadar küçük eleman kullanımı gerekse de belli bir değerden sonra mesh yoğunluğunu arttırmak sonuçları etkilememektedir. Öte yandan bu durum bilgisayara yük getirmekte ve analiz süresini uzatmaktadır.

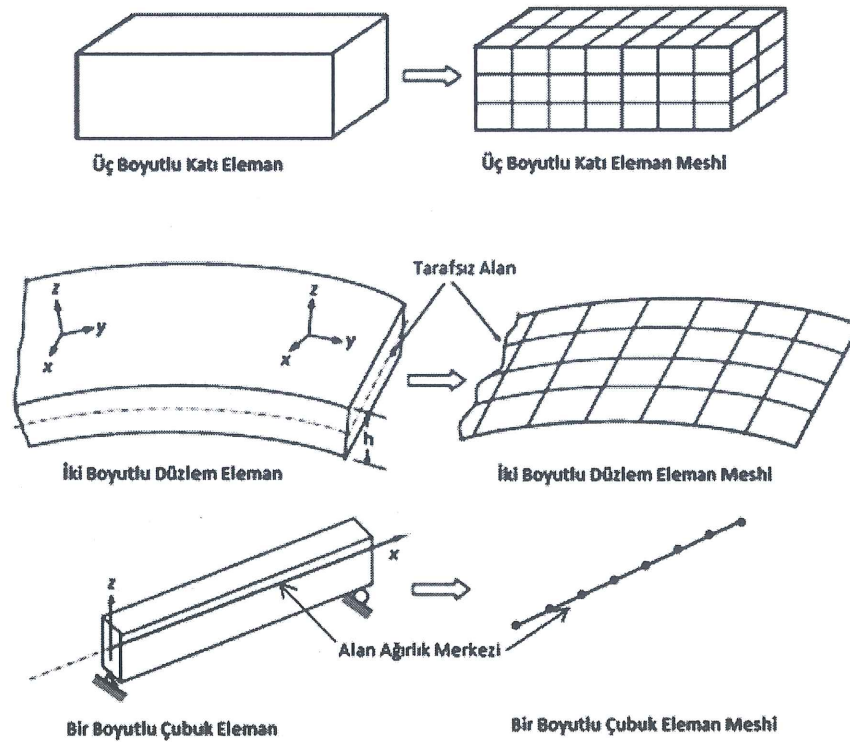
Sonlu elemanlar yönteminde sonlu elemanlara bölme işlemi doğru sonuçlar elde edebilmek için oldukça önemlidir. Sonlu elemanlar mümkün olduğu kadar düzgün ve düzenli görünmelidir. Ayrıca, belirsizlikleri ortadan kaldırmak amacıyla basit yapıda oluşturulmalıdır. Betonarme elemanlarda diğer sonlu elemanlardan farklı olarak mesh boyutu ile ilgili bir takım koşullar bulunmaktadır. Betonarme elemanlarda en küçük eleman boyutu, betondaki en büyük agrega boyutunun 2-3 katından büyük olmalıdır. Beton gibi heterojen bir malzemenin homojen bir malzeme gibi ifade edildiği durumlarda, mikro yapıda gerçek gerilme ve şekil değiştirmelerden sürekli homojen gerilme ve şekil değiştirmeler ayırt edilmesi gerekmektedir [21].

Sonlu elemanlar yöntemi, Şekil 3.1’de görüldüğü üzere bir boyutlu çizgisel eleman, iki boyutlu düzlem eleman ve üç boyutlu katı eleman olmak üzere üç eleman tipinden oluşmaktadır.

Bir boyutlu çubuk elemanlar, gerçek sistemde iki boyutu üçüncü boyutunun yanında çok küçük olan, elemanın eksenini ve normal kesitiyle tanımlanmış elemanlardır. Bina türü sistemlerde kolon, kiriş, perde, nervürlü ve kaset döşemelerin dişleri, sürekli temel, ızgara temel, yay, profil, boru vb. elemanlar çubuk elemanlar kullanılarak modellenmektedir.

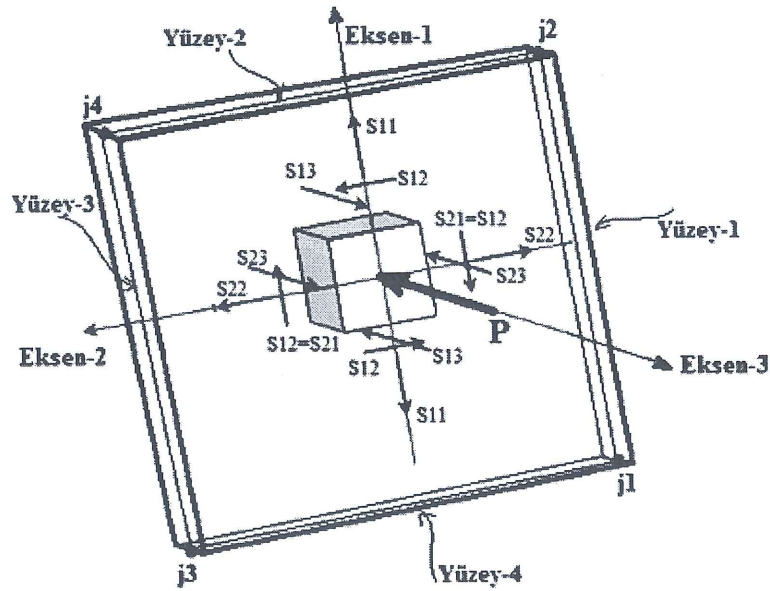
İki boyutlu düzlem elemanlar, gerçek sistemde bir boyutu diğer iki boyutundan çok daha küçük olan elemanlardır. Düzlem elemanlar, dörtgen ve üçgen olmak üzere iki ana geometriden oluşmakta ve genellikle levha, zar ve kabuk gibi elemanların modellenmesinde kullanılmaktadır.

Üç boyutlu katı elemanlar ise katı cisimleri ve yapıları öncül bir geometrik basitleştirme olmaksızın modelleyebilen elemanlardır. Üç boyutlu sonlu elemanlar tetrahedran, kama ve tuğla tipi üç ana geometriden oluşmaktadır. Üretimde kullanılan özellikle döküm yoluyla üretilmiş birçok üç boyutlu parça, katı elemanlar kullanılarak modellenmektedir.



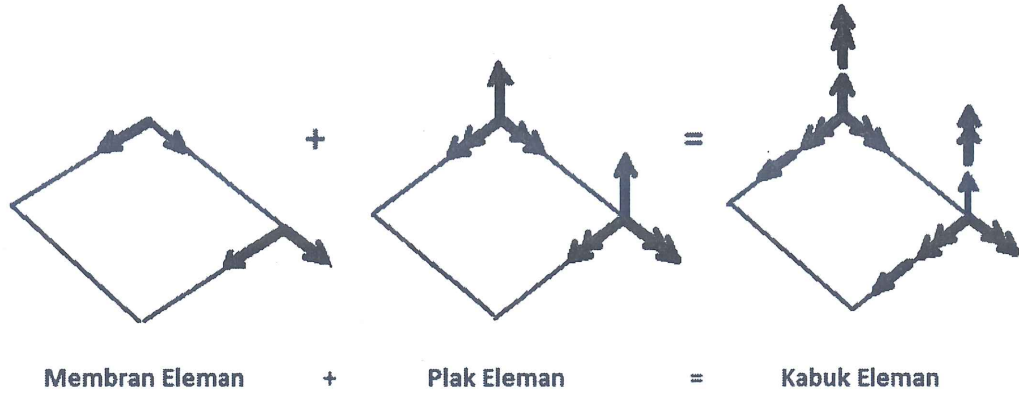
Şekil 3.1. Sonlu elemanlar ile geometri modelleme [22]

Bu çalışmada kirişler doğrusal olmayan katmanlı kabuk elemanlarla modellenmiştir. Bu sebeple kabuk elemanların detaylı anlatımına yer verilmiştir. Kabuk elemanlar, yüzeysel taşıyıcı elemanları modellemek için kullanılan elemanlardır. Düzlemine paralel ve dik olan tüm kuvvetleri aktarabilme özelliğine sahip olduğu için üzerindeki kuvvetleri ve gerilmeleri okuyabilmek mümkündür. Genellikle bina tasarımlarında yük aktarımını doğru belirleyebilmek için, döşemelerin, perdelerin, merdiven ve rampaların, kubbelerin, tonozların ve radye döşemelerin modellemesi kabuk elemanlar kullanılarak yapılmaktadır. Kabuk elemanlarda oluşan temel gerilmeler Şekil 3.2’de gösterildiği gibi S_{11} , S_{22} , S_{12} , S_{13} ve S_{23} olarak adlandırılmaktadır. S_{11} ve S_{22} kabuk elemanda oluşan düzlem içi normal gerilmeleri, S_{12} düzlem içi kayma gerilmelerini, S_{13} ve S_{23} ise enine kayma gerilmelerini ifade etmektedir.



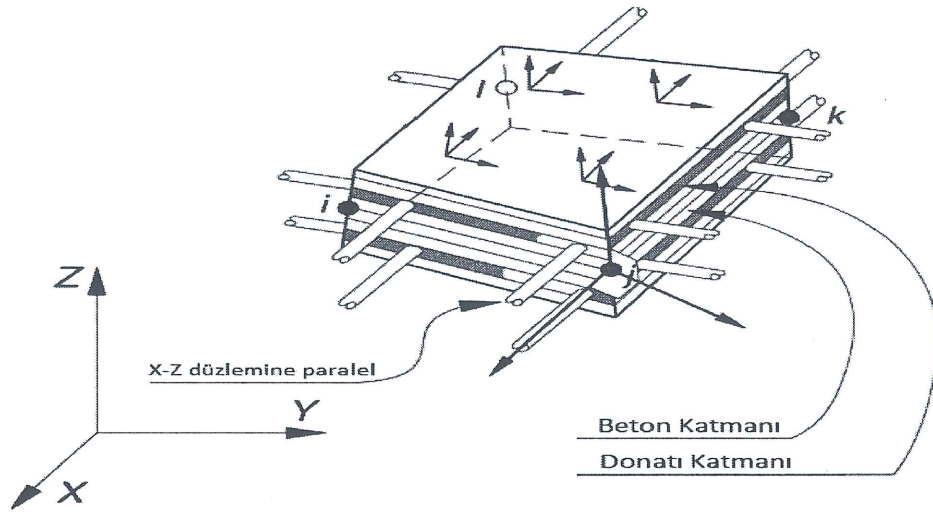
Şekil 3.2. Kabuk elemanda oluşan gerilmeler

Kabuk elemanlar, Şekil 3.3’te görüldüğü üzere membran ve eğilme etkisini aynı anda temsil edebilmektedir. Membran elemanlar, eğilme momentine karşı dirençli değildir ancak düzlem içi kuvvetleri taşıyabilmektedir. Plak elemanlar ise yalnızca eğilme momentini ve düzlem dışı kuvvetleri desteklemektedir. Bu sebeple membran elemanlar düzlem içinde yüklü yüzeysel taşıyıcı elemanları modellemek için kullanılırken, plak elemanlar yalnızca düzlemine dik yüklü yüzeysel taşıyıcıları modellemek için kullanılmaktadır.



Şekil 3.3. Kabuk eleman oluşumu

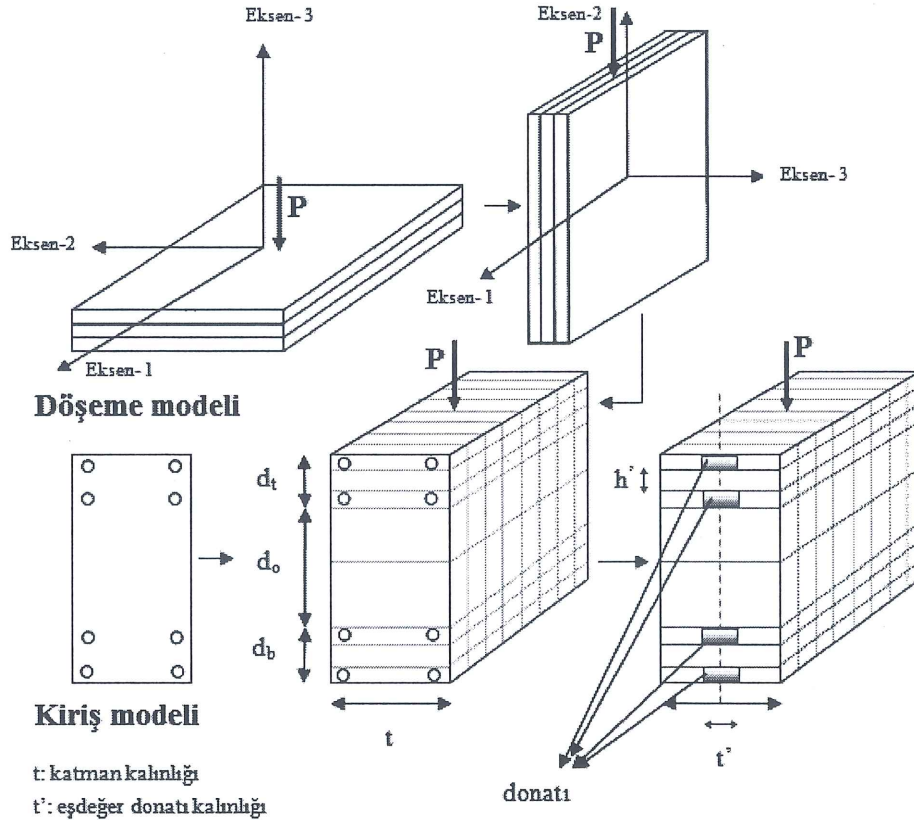
Kabuk elemanlar bu şekilde kesit boyunca homojen olarak tanımlanabilmesinin yanında, kabuğun kalınlığı boyunca katmanlarla heterojen olarak da tanımlanabilmektedir. Katmanlı kabuk eleman modellemelerinde, her bir katmanı birbirinden farklı malzemeler kullanarak, farklı kalınlıklarda ve konumlarda tanımlayabilmek mümkündür. Ayrıca katmanlı kabuk elemanlar doğrusal olmayan malzeme özellikleriyle de oluşturulabilmektedir. Betonarme elemanlarda betonun bulunduğu bölge ile donatının bulunduğu bölge Şekil 3.4'te gösterildiği gibi ayrı katmanlar olarak oluşturulabilmektedir.



Şekil 3.4. Katmanlı kabuk eleman [23]

Katmanlı kabuk elemanlar, genellikle döşeme modellemesi yapılırken kullanılmaktadır. Ancak bu çalışmada kiriş modellemesinde kullanılmıştır ve bu fikir Schwetz ve diğ. (2013), Oksuz (2014) ve Schwetz ve Bessa (2015) tarafından yapılan çalışmalardan esinlenerek ortaya çıkmıştır. Schwetz ve diğ. (2013)

çalışmalarında, dişli döşemelerin davranışını incelemek amacıyla deneysel bir dişli döşeme numunesinin modellenmesini yapmışlardır. Döşemenin hem tablasını ve hem de kirişçikler gibi çalışan dişlerini katmanlı kabuk elemanlarla modellemişlerdir [24]. Oksuz (2014) çalışmasında, içerisinde kaynaklı tel ve ilave donatılar bulunan betonarme bir dişli döşemenin tüm malzemelerini katmanlı kabuk elemanlarla modellemiştir [25]. Schwetz ve Bessa (2015) bu çalışmada, dişli bir döşemenin tablasını ve kirişçikler gibi çalışan dişlerini katmanlı kabuk elemanlarla modellemiştir [26]. Bu çalışmalarda uygulanan yükün, döşeme dişlerinin eksenine paralel olduğu varsayılmıştır. Bu sebeple bu çalışmada da katmanlı kabuk elemanlar, eksenleri uygulanan yüke paralel olacak şekilde Şekil 3.5'te gösterildiği gibi yerleştirilmiştir.



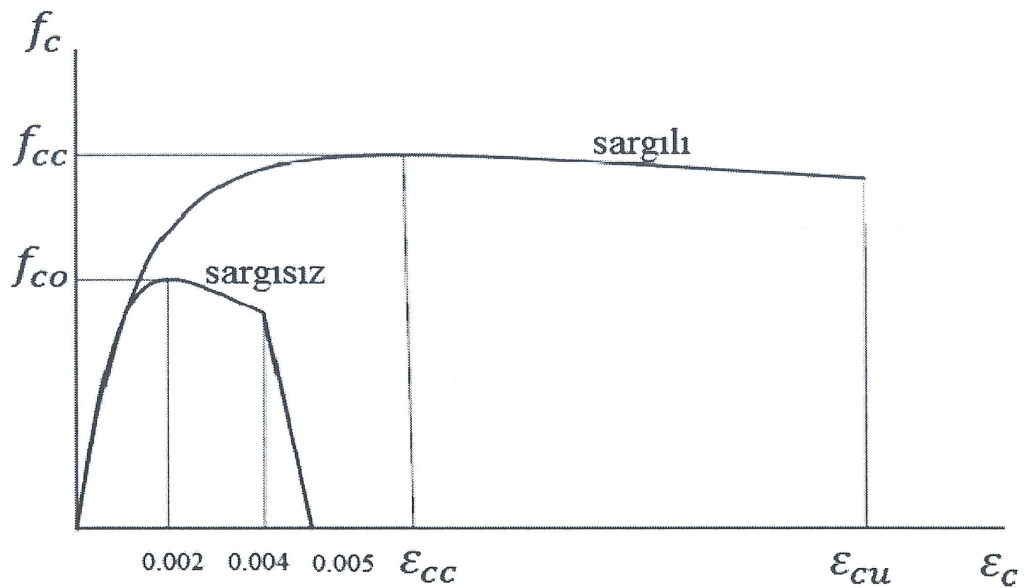
Şekil 3. 5. Kirişlerin katmanlı kabuk eleman ile modellenmesi

3.2.2. Malzeme modelleri

Bu bölümde, modellemede kullanılan beton basınç ve çekme modeli ve donatı modeli anlatılmıştır. Tüm malzeme davranışları doğrusal olmayan özelliklerle tanımlanmıştır.

3.2.2.1. Beton modeli

Betonarme kesitlerin çözümlenmesinde, gerilme veya kuvvet cinsinden ifade edilen denge denklemleri ile şekil değiştirme cinsinden ifade edilen uygunluk deklemleri arasındaki ilişki, sadece kullanılan malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ile kurulmaktadır. Bu nedenle, kullanılan malzemenin davranışını gerçeğe mümkün olduğu kadar yakın modellemek, daha doğru bir çözüm sunacaktır. Gerçek bir beton modeli elde etmek amacıyla, bugüne kadar birçok sargılı ve sargısız beton basınç modeli önerilmiştir. Bunlardan en yaygın kullanılanları Saatçioğlu ve Ravzi modeli, Hognestad modeli, Kent-Park ve Geliştirilmiş Kent-Park modeli ve Mander modelidir. Bu çalışmada, Mander modelinin Türk Deprem Yönetmeliği'nde bulunması, yaygın olarak kullanılması ve SAP2000 programında varsayılan model olması sebebi ile beton basınç modelinde SAP2000 programının verilerinden yararlanılarak sargılı Mander modeli kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Mander beton modeli [27]

Mander modeli, Şekil 3.6'da görüldüğü üzere hem sargılı hem de sargısız beton için kullanılabilen bir beton basınç modelidir. Bu modelde, sargılı ve sargısız beton için aşağıdaki gerilme-şekil değiştirme bağıntıları tanımlanmıştır. Sargılı betonda, beton basınç gerilmesi f_c , basınç birim şekil değiştirmesi ϵ_c 'nin fonksiyonu olarak Denklem (2.1)'deki bağıntı ile verilmiştir;

$$f_c = \frac{f_{cc} \times r}{r - 1 + x^r} \quad (2.1)$$

Bu bağıntıdaki sargılı beton dayanımı f_{cc} ile sargısız beton dayanımı f_{co} arasındaki ilişki Denklem (2.2)'de verilmiştir;

$$f_{cc} = \lambda_c f_{co} \quad ; \quad \lambda_c = 2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{f_e}{f_{co}}} - 2 \frac{f_e}{f_{co}} - 1,254 \quad (2.2)$$

Buradaki f_e , etkin sargı basıncı; enine donatıların, boyuna donatıların ve kesit geometri özelliklerinin bir fonksiyonudur ve dikdörtgen kesitlerde birbirine dik iki doğrultu için Denklem (2.3)'de verilen değerlerin ortalaması olarak alınabilir;

$$f_{ex} = k_e \rho_x f_{yw} \quad ; \quad f_{ey} = k_e \rho_y f_{yw} \quad (2.3)$$

Bu bağıntılarda f_{yw} enine donatının akma dayanımını, ρ_x ve ρ_y ilgili doğrultulardaki enine donatıların hacimsel oranlarını, k_e ise Denklem (2.4)'te tanımlanan sargılama etkinlik katsayısını göstermektedir;

$$k_e = \left(1 - \frac{\sum a_i^2}{6b_o h_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right) \left(1 - \frac{A_s}{b_o h_o}\right)^{-1} \quad (2.4)$$

Burada a_i kesit çevresindeki düşey donatıların eksenleri arasındaki uzaklığı, b_o ve h_o göbek betonunu sargılayan etriyelerin eksenleri arasında kalan kesit boyutlarını, s düşey doğrultuda etriyelerin eksenleri arasındaki aralığı, A_s ise boyuna donatı alanını göstermektedir. Denklem (2.5) ve (2.6)'daki normalize edilmiş beton birim şekil değiştirmesi x ile r değişkenine ilişkin bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \quad ; \quad \epsilon_{cc} = \epsilon_{co} [1 + 5(\lambda_c - 1)] \quad ; \quad \epsilon_{co} \cong 0,002 \quad (2.5)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad ; \quad E_c \cong 5000 \sqrt{f_{co}} [\text{MPa}] \quad ; \quad E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (2.6)$$

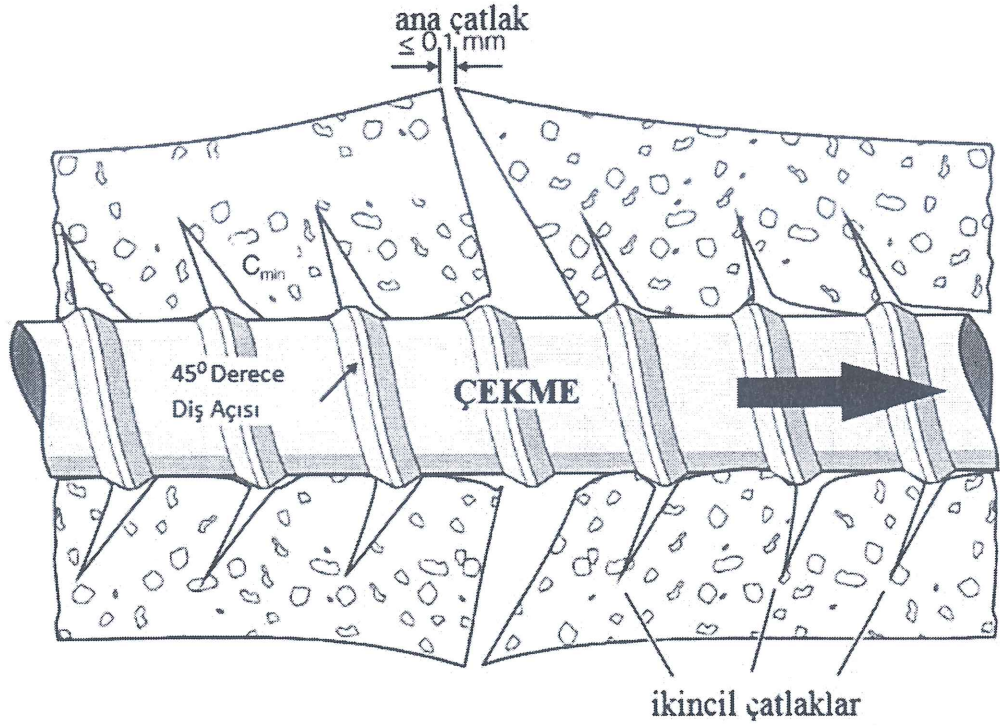
Sargılı betondaki maksimum basınç birim şekil değıştirmesi ϵ_{cu} , Denklem (2.7)'de verilmiştir:

$$\epsilon_{cu}=0,004+\frac{1,4\rho_s f_{yw}\epsilon_{su}}{f_{cc}} \quad (2.7)$$

Burada ρ_s toplam enine donatının hacimsel oranını, ϵ_{su} enine donatı çeliğinde maksimum gerilme altındaki birim uzama şekil değıştirmesini göstermektedir [27].

Modelde sargısız beton modeli için, sargılı beton modelinde kullanılan betonda etkili sargılama basıncı, f_c , sıfır alınır. Betonun maksimum gerilmeye ulaştığı andaki birim şekil değıştirme değeri 0,002 olarak alınır. Sargısız betona ait gerilme-şekil değıştirme eğrisi, birim şekil değıştirme değeri $2\epsilon_{co}$ değerini aştıktan sonra kabuk betonun döküldüğünü varsayılarak, doğrusal olarak maksimum birim şekil değıştirme değerine ulaşır.

Betonda oluşan gerilmeler şekil değıştirmelere neden olur ve bu şekil değıştirme değerleri çatlama birim şekil değıştirme değerini aştığında, betonun çekme gerilmesinin genellikle sıfıra yaklaştığı varsayılır. Bu varsayım ile çatlamadan sonra betonun çekme gerilmelerinin davranışa etkisi tamamiyle ihmal edilir ve bu yüzden, beton çatladıktan sonra beton içindeki donatının yük-deformasyon tepkisi yalın bir donatının tepkisiymiş gibi olur. Ancak betonarme elemanlarda donatı ile sargı mevcut olduğu için ve Şekil 3.7'de gösterildiği gibi çatlaklar arasındaki beton donatıya yapıştığı için bu durum gerçekte böyle değildir. Beton çekme gerilmeleri betonun çekme dayanımını aştığında çatlaklar gelişmeye başlar ve bütün yük ilk olarak beton tarafından taşınır. Ardından donatı, lokal çekme gerilmelerini çatlaklar arasındaki sağlam betona iletir ve bu bölgedeki sağlam beton çatlak oluşumundan sonra bile çekme gerilmelerini taşımaya devam ederek yapının genel sertliğine katkıda bulunur. Bu olaya çekme sertleşmesi adı verilir. Çekme sertleşmesi betona da donatıya da ait bir özellik değildir. Bu özellik sadece betonarme malzemede görülür ve kısa vadeli deformasyon analizlerinde önemli bir etkiye sahiptir. Betonarme elemanlardaki çekme sertleşmesi yaygın olarak iki şekilde hesaba katılmaktadır. Hesaplamalarda ya donatının gerilme-şekil değıştirme eğrisi değıştirilir ya da çatlak oluşumundan sonra betonun çekme katkısında bir değışiklik yapılır [28].

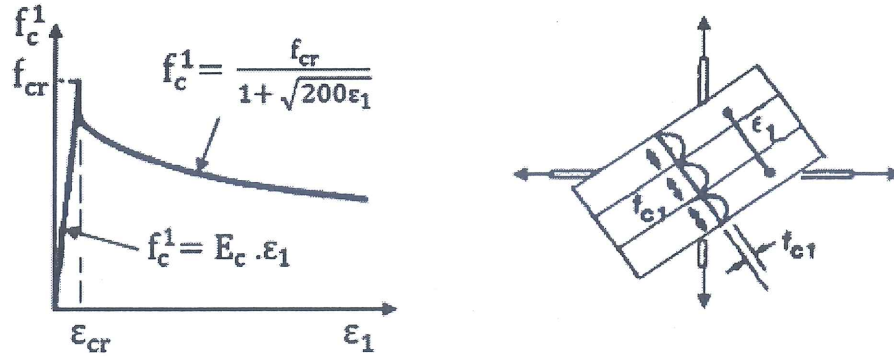


Şekil 3.7. Betonarme elemanlarda çatlak oluşumu [29]

Bugüne kadar betonarme elemanların çekme davranışı ile ilgili birçok model önerilmiştir. Bu modellerin bir kısmı, Vecchio ve Collins (1986) modeli, Collins ve Mitchell (1987) modeli, Izumo ve Maekawa (1992) modeli, Bentz (2003) modeli, D'Avilla (2003) modeli, Field ve Bischoff (2004) modeli, Stramandinoli ve Rovere (2008) modeli, Gribniak (2009) modeli ve Masukawa (2012) modelidir.

Bu çalışma kapsamında, beton çekme modelinin modelleme üzerindeki etkisini incelemek amacıyla Vecchio ve Collins (1986) modeli ve Collins ve Mitchell (1987) modeli kullanılarak parametrik bir çalışma yapılmıştır.

Vecchio ve Collins (1986) bu çalışmalarında, düzlem içi kesme gerilmelerine ve normal gerilmelere maruz kalmış betonarme kirişlerin yük-deplasman eğrisini tahmin edebilmek için bir model sunmuşlardır. Bu modelde çatlamış betonu, kendisine ait gerilme-şekil değiştirme eğrisinin olduğu yeni bir malzeme gibi tanımlamışlardır. Çatlamış betonun çekme modelini Şekil 3.8'de gösterildiği gibi beton çatlayana kadar doğrusal bir bölgeden, beton çatladıktan sonra azalan parabolik bir bölgeden oluşan bir eğri ile tanımlamışlardır [30].



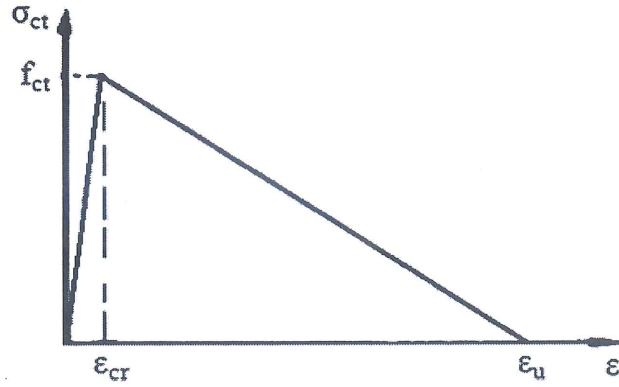
Şekil 3.8. Çekme bölgesindeki çatlamış beton için ortalama gerilme şekil değiştirme eğrisi [25]

Collins ve Mitchell (1987) yaptıkları bir çalışmada çekme modeli ile ilgili bir denklem önermişlerdir. Vecchio ve Collins'in 1986 yılında yaptıkları çalışmadaki orijinal denklem üzerinden yeni bir denklem olan Denklem (2.8)'i türetmişlerdir [31].

$$f_{ct,avg} = \frac{f_{cr}}{1 + \sqrt{500\varepsilon_{t,avg}}} \quad (2.8)$$

Bu denklemde $f_{ct,avg}$ betondaki ortalama çekme gerilmesi, f_{cr} beton çekme çatlama gerilmesi ve $\varepsilon_{t,avg}$ ortalama beton çekme birim şekil değiştirmesidir.

Bu çalışmada, betonun çekme bölgesinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi SAP2000 programının verilerinden yararlanılarak, Şekil 3.9'da gösterildiği gibi doğrusal olarak tanımlanmıştır. Beton çekme modeli parametresi için Vecchio ve Collins (1986) modeli ve Collins ve Mitchell (1987) modeli kullanılmış ve bu modellemelerden elde edilen sonuçlar, doğrusal çekme modeli kullanılarak yapılan modelleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu üç beton çekme modelinin maksimum çekme dayanımı, ACI (American Concrete Institute) 318-95 yönetmeliğine dayanarak, $f_{ct} = 0,63\sqrt{f_c}$ formülü ile hesaplanmıştır.

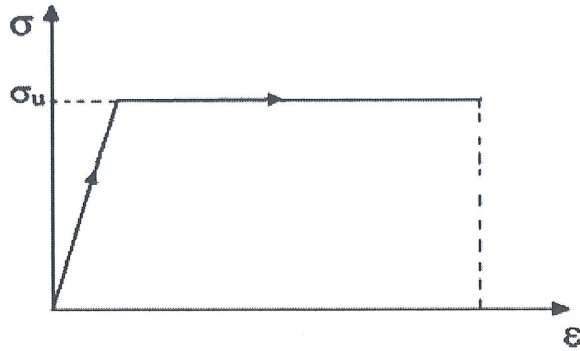


Şekil 3.9. Betonun çekme gerilme-şekil değiştirme eğrisi

3.2.2.2. Donatı modeli

Donatı çeliği yüksek süneklığe sahip bir malzemedir ve betonarme elemanların süneklığinin büyük bir kısmı çelikler tarafından sağlanmaktadır. Donatının çekme ve basınç altındaki davranışları arasında önemli bir fark yoktur. Bu sebeple tasarımlarda donatının genellikle elasto-plastik olduğu varsayılmaktadır. Elasto-plastik elemanlar, taşıma gücüne ulaşana kadar doğrusal bir davranış sergiler. Taşıma gücünü aştıktan sonra sabit bir yük taşımaya rağmen büyük deformasyonlar yapar ve uzun süre direncini yitirmez.

Bu çalışmada donatının Şekil 3.10'da gösterildiği gibi elasto-plastik bir davranış sergilediği varsayılmıştır. Analizlerde kullanılan donatıların akma dayanımları için, modellemesi yapılan kirişlerin deneysel çalışmada verilen değerleri kullanılmıştır. Elastisite modülü, TS500 yönetmeliğine uygun olarak $E_s = 2 \times 10^5$ MPa alınmıştır.

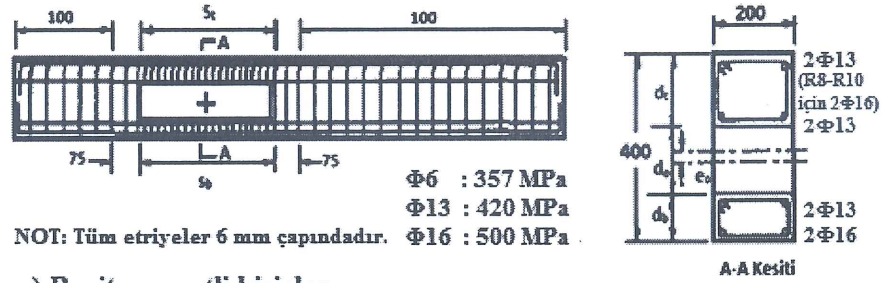


Şekil 3.10. Donatı çeliği σ - ϵ eğrisi

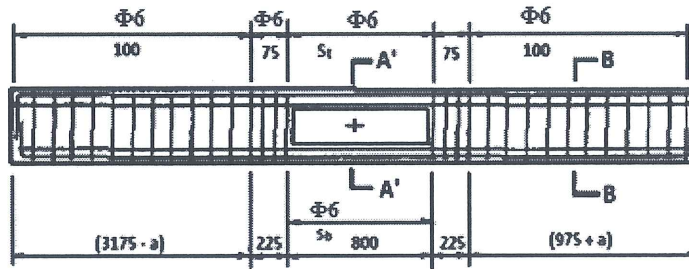
3.2.3. Çözümleme aşaması

Karmaşık bir yapı elemanının herhangi bir yük altındaki deplasmanını kesin olarak tahmin etmek oldukça zordur. Bu sebeple her bir eleman için bilinmeyen çözümünü yaklaşık olarak ifade edebilecek uygun bir deplasman modeli seçilmelidir. Denge denklemleri kullanılarak eleman rijitlik matrisleri ve yük vektörleri hesaplanmalıdır. Her bir eleman için bulunmuş rijitlik matrisleri, yük vektörleri ve denge denklemleri uygun bir şekilde birleştirilerek genel bir denge denklemi elde edilmelidir. Sistem temel olarak $[K] \cdot [D] = [R]$ rijitlik matrisine dönüştürülmektedir. Burada $[K]$ bilinen sabitler matrisi, $[D]$ büyüklük alanının nodlardaki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör ve $[R]$ bilinen yük vektörüdür. Başka bir deyişle, $[K]$ sistemin yapısını (katı, sıvı, gaz vb. özellikleri), $[D]$ aranan nodlar üzerindeki değerleri (gerilme, kuvvet vb.), $[R]$ ise sınır şartlarını (dışarıdan etkiyen yükler, mesnet şartları) ifade etmektedir [32]. Ardından yükler uygulanmalı ve mesnet şartları yapıya tanımlanmalıdır. Tekil yükler mutlaka nod noktalarına uygulanmalıdır. Son olarak düğüm noktalarındaki deplasmanlar çözülür ve sistemin gerilme ve şekil değiştirmeleri hesaplanır.

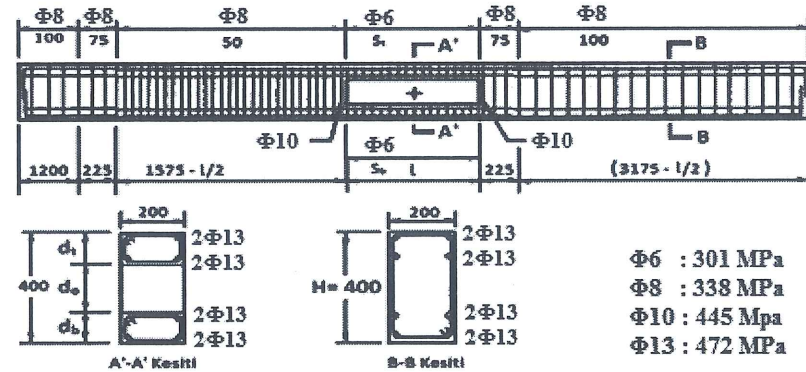
Basit mesnetli kirişler R serisi, iki açıklıklı sürekli kirişler B serisi, üç açıklıklı sürekli kirişler ise C serisi olarak gruplandırılmıştır. Tüm kirişler dikdörtgen kesitli olup, kirişlerin derinliği 400 mm, genişliği ise 200 mm'dir. Her bir kirişte sekiz adet boyuna donatı bulunmaktadır. Donatılar boşluk etrafındaki çatlak ve kesme kontrolünü sağlayacak biçimde Şekil 4.2'de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir.



a) Basit mesnetli kirişler



b) B Serisi



c) C Serisi

Şekil 4.2. Mevcut deney kirişlerinin donatı detayı [14]

Ana parametreler; boşluğun uzunluğu, derinliği, boşluğun kiriş üzerindeki konumu ve kiriş boyuna eksenine ile boşluk boyuna eksenine arasındaki mesafedir. Kiriş gövdelerinde bulunan boşluğun uzunluk değerleri 400 mm ile 1200 mm arasında değişirken, derinlik değerleri 140 mm ile 220 mm arasında değişmektedir. Boşluğun konumu ise Şekil 4.1'de gösterildiği üzere kiriş açıklığı boyunca yükün uygulandığı

nokta ile mesnet arasında değişmektedir. R1-R5 kirişlerinde boşluk uzunluğunun, R3, R6, R7 kirişlerinde ise boşluk derinliğinin kiriş davranışında oluşturduğu etkileri incelemek hedeflenmiştir. R3, R8, R9 kirişlerinde kirişin boyuna eksenine ile boşluğun boyuna eksenine arasındaki mesafenin etkisi incelenmiştir. Bahsi geçen kirişlerde R3 kirişi kontrol kirişi olarak kullanılmıştır. B serisindeki kirişlerde, boşluk konumunun kiriş davranışında oluşturduğu etkiyi incelemek amacıyla boşluk ebatları sabit tutulup kiriş boyunca boşluğun konumu değiştirilmiştir. C serisinde bulunan C1, C2 ve C3 kirişleri arasında boşluk uzunluğunun, C4, C2 ve C5 kirişleri arasında ise boşluk derinliğinin kiriş davranışını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Kirişlerin beton basınç dayanımları, kirişlerde bulunan boşlukların uzunlukları, derinlikleri ve konumları, kiriş boyuna eksenine ile boşluğun boyuna eksenine arasındaki mesafe ve boşluğun üstündeki ve altındaki bölgelerin etriye aralıkları Tablo 4.1’ de detaylı verilmiştir.

Tablo 4.1. Mevcut deney kirişlerinin özellikleri [14]

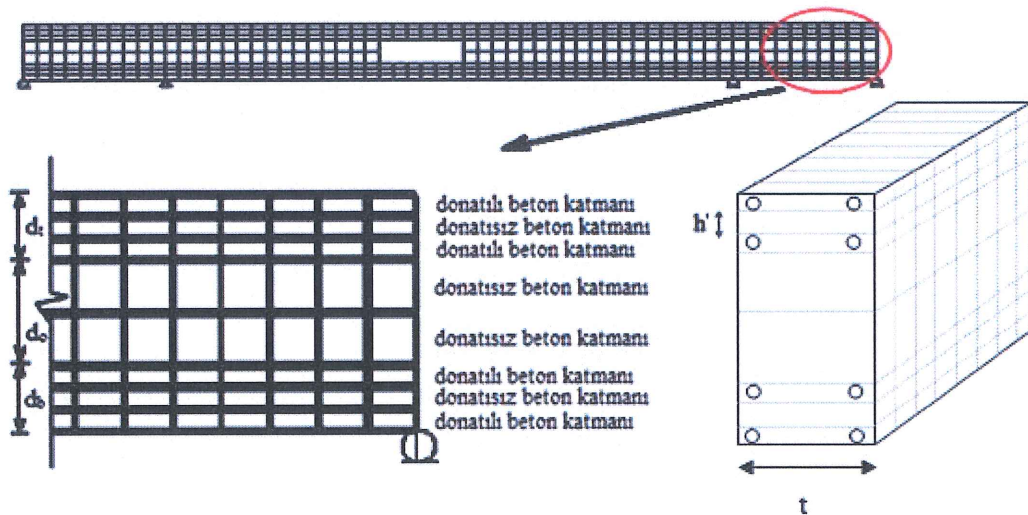
Kiriş	l (mm)	d_t (mm)	d_o (mm)	d_b (mm)	e_o (mm)	$a+l/2$ (mm)	s_t (mm)	s_b (mm)	$f'c$ (MPa)
R1	400	110	180	110	0	1000	40	40	30,4
R2	600	110	180	110	0	1000	40	40	30,4
R3	800	110	180	110	0	1000	40	40	33,5
R4	1000	110	180	110	0	1000	40	40	33,5
R5	1200	110	180	110	0	1000	40	40	29,8
R6	800	130	140	130	0	1000	50	50	29,8
R7	800	90	220	90	0	1000	30	30	35,1
R8	800	120	180	100	10	1000	45	35	35,1
R9	800	130	180	90	20	1000	50	30	34,8
R10	800	110	180	110	0	800	40	40	34,8
R11	800	110	180	110	0	1000	40	40	28,8
R12	800	110	180	110	0	1200	40	40	28,8
B1	800	110	180	110	0	2200	40	40	30,7
B2	800	110	180	110	0	1100	40	40	32,4
B3	800	110	180	110	0	650	40	40	35
C1	600	110	180	110	0	2200	40	40	35
C2	800	110	180	110	0	2200	40	40	30,7
C3	1000	110	180	110	0	2200	40	40	32,4
C4	800	130	140	130	0	2200	50	50	23
C5	800	90	220	90	0	2200	30	30	23

Burada l boşluğun uzunluğu, d_t boşluğun üstünde kalan bölgenin derinliği, d_o boşluğun derinliği, d_b boşluğun altında kalan bölgenin derinliği, e_o kirişin boyuna eksenine ile boşluğun boyuna eksenine arasındaki mesafe, $a+l/2$ boşluk merkezinin mesnete uzaklığı, s_t boşluğun üstü bölgesinin etriye aralığı, s_b boşluğun altı bölgesinin etriye aralığı, f'_c ise beton basınç dayanımıdır.

4.3. Deneysel Kirişlerin Modellenmesi

Boyut ve donatı detayları Şekil 4.2'de ve Tablo 4.1'de verilen geniş boşluklu kirişlerin modellenmesi, SAP2000 programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Modelleme adımlarının anlatımı C1 kirişi üzerinde örneklemeler yapılarak desteklenmiştir. Modelleme şu şekilde yapılmıştır:

İlk olarak model geometrisi oluşturulmuştur. Kiriş modelleri Şekil 3.5'te görüldüğü üzere, uygulanan yüke paralel doğrultuda tek katmandan oluşan kabuk elemanlarla modellenmiştir. Bu sebeple katman kalınlığı, kirişlerin derinliği değil kirişlerin genişliği olarak alınmıştır. Katman, Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, açıklık boyunca 100 mm genişlikte sonlu elemanlara bölünmüştür. Düşey doğrultuda ise donatıların bulunduğu alt ve üst bölgelerde daha küçük olmak üzere sekiz parçaya bölünmüştür. Mesh boyutları donatısız betondan oluşan orta bölgede $d_o/2 \times 100$ mm, donatılı betondan oluşan alt ve üst bölgelerde ise $d_t/3 \times 100$ mm ve $d_b/3 \times 100$ mm olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.3. C1 kirişinin sonlu eleman boyutu detayı

Modellemesi yapılan kirişlerin eğilmeden göçecek şekilde tasarlanması ve göçme modunun eğilmede kritik olması sebebiyle kayma donatı modellenmemiştir. Katmanlar donatının bulunduğu seviyelere göre donatılı beton katmanı ve donatısız beton katmanı olmak üzere iki tipte oluşturulmuştur. Donatılı beton katmanında bulunan donatının kalınlığı, eşdeğer kalınlık yöntemi temel alınarak Şekil 3.5'te görüldüğü üzere toplam donatı alanının mesh yüksekliğine oranı ile hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamanın örnekleme, C1 kirişi üzerinde anlatılmıştır. C1 kirişi boşluğun üstündeki ve altındaki bölgelerin her birinde 13 mm çapında 2 adet boyuna donatı içermektedir. Boşluğun üstündeki ve altındaki bölgelerin derinliği 110 mm'dir.

C1 kirişinin eşdeğer donatı kalınlığı hesabı şu şekilde yapılmıştır:

$$h' = \frac{d_t}{3} = \frac{110}{3} = 36,67 \text{ mm} \quad (3.1)$$

$$A_s(2\phi 13) = 265,46 \text{ mm} \quad (3.2)$$

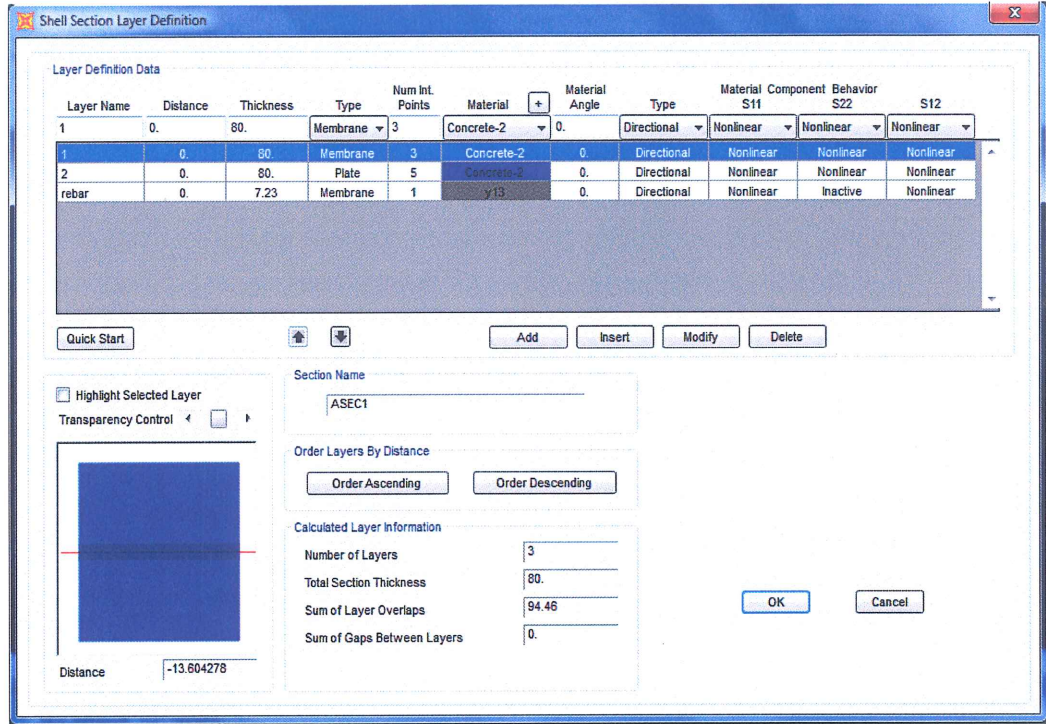
$$t' = \frac{A_s}{h} = \frac{265,46}{36,67} = 7,23 \text{ mm} \quad (3.3)$$

Burada h' mesh yüksekliği, b mesh genişliği, t' eşdeğer donatı kalınlığı ve A_s donatı alanıdır.

Tasarım yapılırken eğilme etkisindeki betonarme elemanlarda çatlamış kesite ait etkin eğilme rijitlikleri genellikle hesaba katılmaktadır. Kirişlerde çatlamış kesite ait etkin eğilme rijitliği, çatlamamış kesite ait eğilme rijitliğinin %40'ına eşittir [27]. Bu çalışmada Türk Deprem Yönetmeliği ışığında çatlamış kesit etkisi dikkate alınmıştır. Çatlamış kesit etkisi, beton katman kalınlıklarının, yani kiriş genişliklerinin, % 40'ı alınarak modele yansıtılmıştır. Başka bir deyişle 200 mm olan kiriş genişlikleri, % 60 azaltılarak 80 mm alınmıştır. Bu işlem adımları izlenerek her bir kiriş için Şekil 4.4'te gösterildiği gibi katmanlar oluşturulmuştur.

Donatısız beton katmanında, beton malzemesinden oluşan katman membran ve plak olmak üzere iki tip katmana ayrılmıştır. Membran tipindeki katman sadece eksenel gerilmeleri, plak tipindeki katman ise eğilme momentlerini taşıması amacı ile oluşturulmuştur. Donatılı beton katmanında ise bahsi geçen iki beton katmanına ek

olarak, eksenel gerilmeleri alması için donatı malzemesinden oluşan membran tipinde bir katman tanımlanmıştır.



Şekil 4.4. Donatılı beton katmanın tanımlanması

Sonlu elemanlarda gerilmeler ve şekil değiştirmeler entegrasyon noktası adı verilen noktalarda hesaplanmaktadır. İlk olarak entegrasyon noktalarında hesaplanan gerilmeler, daha sonra yazılım tarafından düğümlere ulaştırılmaktadır. Kullanıcı tarafından belirlenen entegrasyon noktası sayısı, her tabaka için 1-5 arasında seçilebilmektedir. Çoğu durumda membran ve plak davranışını yakalayabilmek için iki nokta yeterli olmasına rağmen, doğrusal olmayan davranışta donatının akma davranışını yakalayabilmek için daha çok entegrasyon noktası gerekebilmektedir. Fazla sayıda entegrasyon noktası kullanmak analiz süresini arttırmakta ve verimliliği düşürmektedir. Doğrusal olmayan malzemeler için katmanlı kabuğun kalınlığı boyunca 4-5 entegrasyon noktası tavsiye edilmektedir [25]. Bu çalışmada entegrasyon nokta sayıları, Şekil 4.4'te görüldüğü üzere beton malzemesinden oluşan membran tipindeki katmanda 3, plak tipindeki katmanda 5, donatı malzemesinden oluşan membran tipi katmanda ise 1 olarak seçilmiştir.

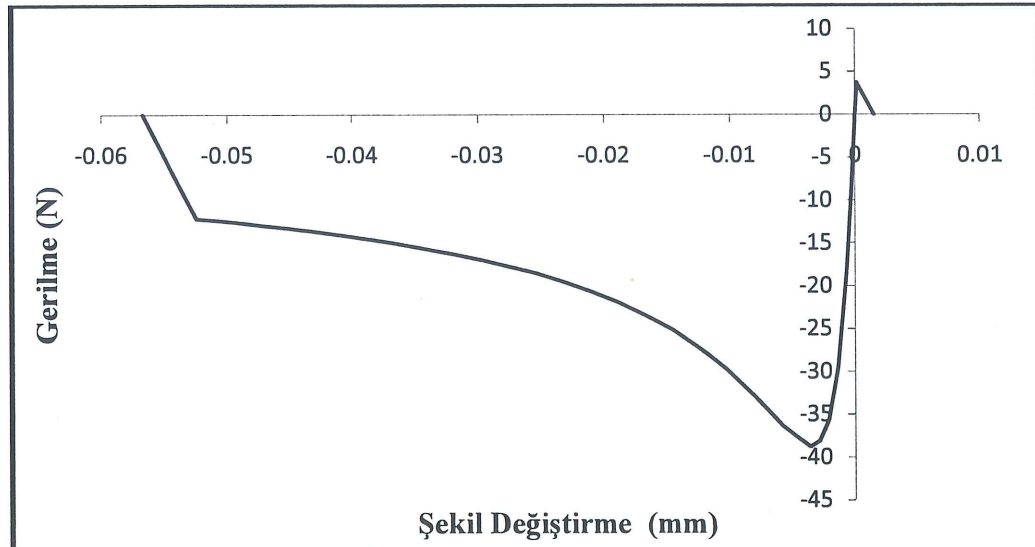
Kabuk elemanın iç gerilmeleri katmanların her birinde doğrusal olmayan özelliklerle tanımlanmıştır.

Beton ve donatı malzemeleri, gerçek malzeme davranışını modelleyebilmek amacıyla doğrusal olmayan özelliklerle tanımlanmıştır. Kirişlerin beton elastisite modülleri, Tablo 4.1’de verilen beton basınç dayanımları kullanılarak, $E=4750\sqrt{f_{ck}}$ (ACI 318-95) formülü ile hesaplanmış ve poisson oranı 0,2 olarak alınmıştır.

Betonun aksenal basınç altındaki davranışı Mander modeli esas alınarak modellenmiştir. Betonun aksenal basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışı SAP2000 programında donatı dayanımı, etriye çapı, her iki doğrultudaki donatı sayısı gibi değerler girilerek tanımlanmıştır.

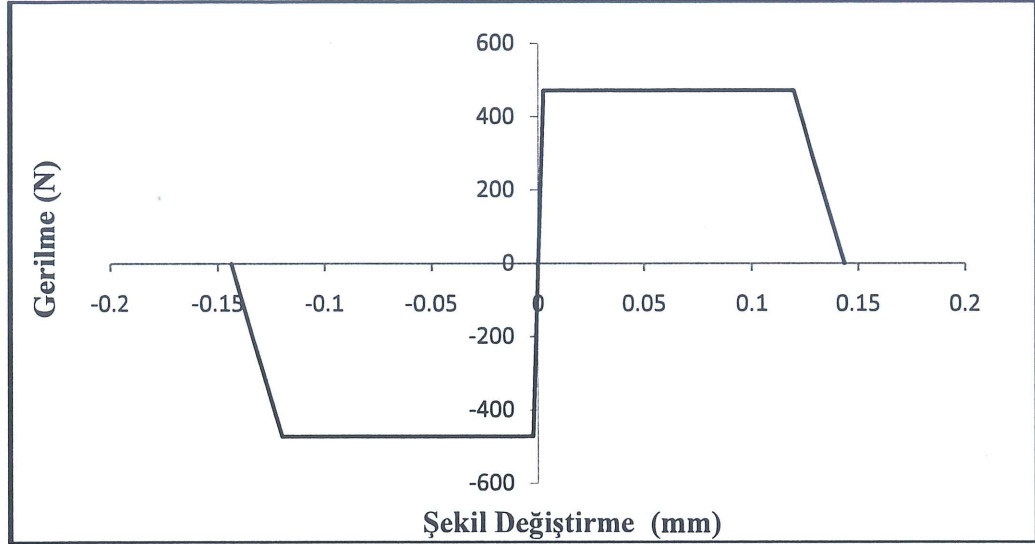
Betonun çekme gerilme-şekil değiştirme eğrisi ise doğrusal eğrilerle modellenmiştir. Betonun çatlama sonrası çekme davranışı, SAP2000 programının varsayılan özellikleri kullanılarak tanımlanmıştır. Aksenal çekme dayanımı, $f_{ct}=0,63\sqrt{f_c}$ (ACI 318-95) formülü ile hesaplanmıştır.

Modelde kullanılan betonun aksenal basınç ve çekme altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 4.5’te verilmiştir.



Şekil 4.5. Beton gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Donatı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi ise Şekil 4.6'da görüldüğü gibi elastoplastik olarak tanımlanmıştır. Kullanılan akma dayanımları Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.6. Donatı gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Modellemede kirişler, düşey doğrultuda tekil yük ile yüklenmiş ve deplasman kontrollü doğrusal olmayan analiz yöntemi ile analiz edilmiştir.

Modellemede yapılan kabuller aşağıda özetlemiştir:

1. Kirişler, uygulanan yüke paralel doğrultuda tek katmandan oluşan kabuk elemanlarla modellenmiştir. Katman, optimum sonucu elde edebilmek amacıyla açıklık boyunca 100 mm genişlikte sonlu elemanlara bölünmüştür. Düşey doğrultuda ise donatıların bulunduğu alt ve üst bölgelerde daha küçük olmak üzere sekiz parçaya bölünmüştür.
2. Kirişlerin eğilmeden göçecek şekilde tasarlanması ve göçme modunun eğilmede kritik olması sebebiyle kayma donatı modellenmemiştir.
3. Katmanlar donatının bulunduğu seviyelere göre donatılı beton katmanı ve donatısız beton katmanı olmak üzere iki tipte oluşturulmuştur. Donatılı beton katmanında bulunan donatının kalınlığı, eşdeğer kalınlık yöntemi temel alınarak toplam donatı alanının sonlu eleman yüksekliğine oranı ile hesaplanmıştır.
4. Kirişlerde çatlamış kesit etkisi dikkate alınmıştır. Ancak çatlamış kesit etkisi, beton katmanlarının kalınlıklarının % 40'ı alınarak modele yansıtılmıştır. Yani 200 mm olan beton katman kalınlığı değeri 80 mm olarak alınmıştır.

5. Donatısız beton katmanında, beton malzemesinden oluşan katman membran ve plak olmak üzere iki tip katmana ayrılmıştır. Membran tipindeki katman sadece aksenal gerilmeleri, plak tipindeki katman ise eğilme momentlerini taşıması amacı ile oluşturulmuştur. Donatılı beton katmanında ise bahsi geçen iki beton katmanına ek olarak, aksenal gerilmeleri alması için donatı malzemesinden oluşan membran tipinde bir katman tanımlanmıştır.
6. Gerilmelerin, şekil değiştirmelerin hesaplandığı entegrasyon noktası sayısı, membran tipindeki beton katmanında 3, plak tipindeki beton katmanında 5, membran tipindeki donatı katmanında 1 alınmıştır.
7. Beton malzemesinin aksenal basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrisi SAP2000 programı kullanılarak sargılı Mander modeli [27] ile, aksenal çekme altındaki gerilme-şekil değiştirmesi ise linear olarak tanımlanmıştır.
8. Donatı elasto-plastik kabul edilmiştir.
9. Kirişler, düşey doğrultuda tekil yük ile yüklenmiş ve deplasman kontrollü doğrusal olmayan analiz yapılmıştır.

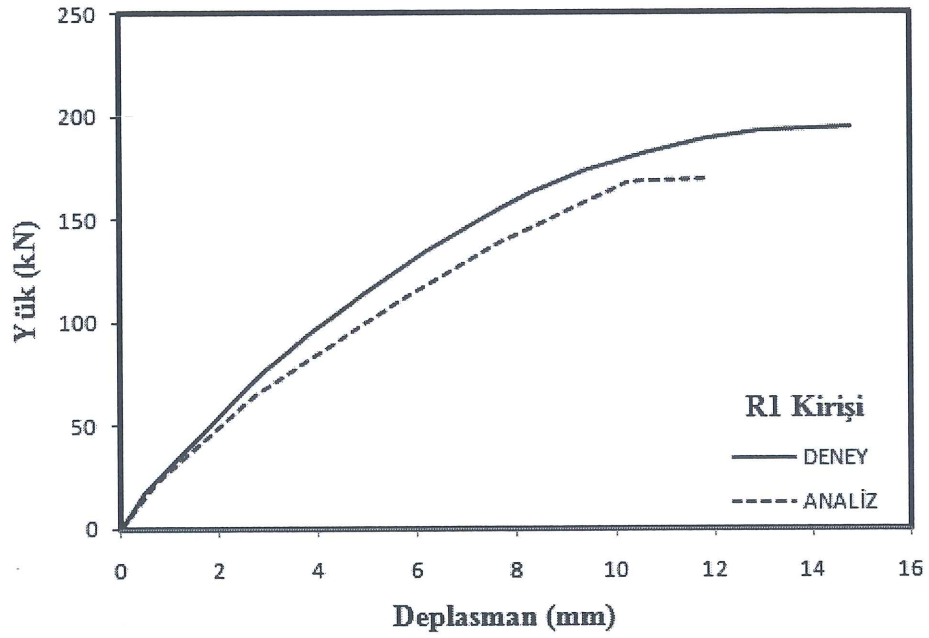
5. ANALİZ SONUÇLARI VE DENEYSEL VERİLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

5.1. Giriş

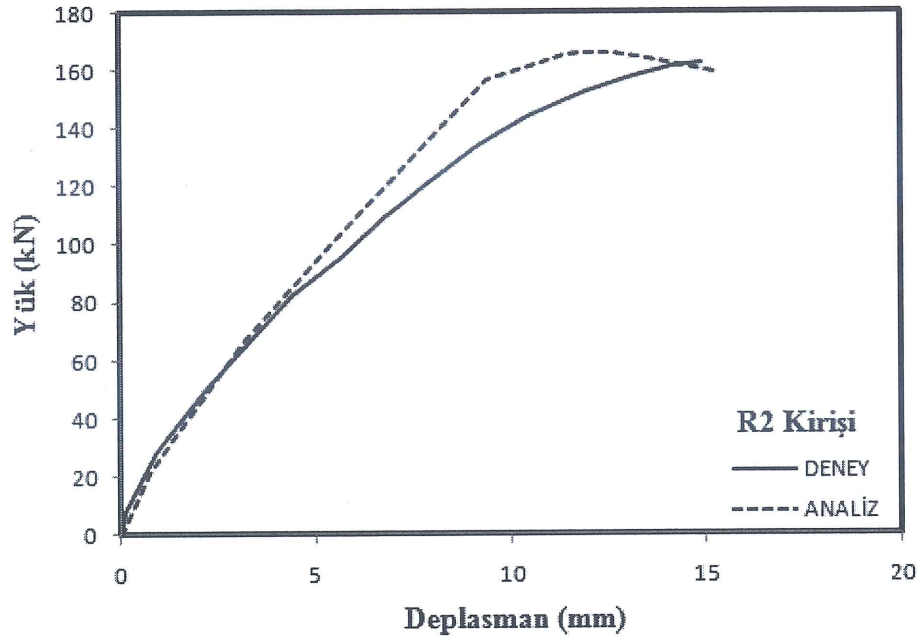
Bu bölümde, tüm kirişlerin yük-deplasman eğrileri, ayrıca B ve C serisindeki kirişler için deneyler sırasında farklı yük seviyelerinde kiriş boyunca elde edilen yer değiştirme değerleri, analizler sonucunda elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

5.2. Yük-Deplasman Eğrileri

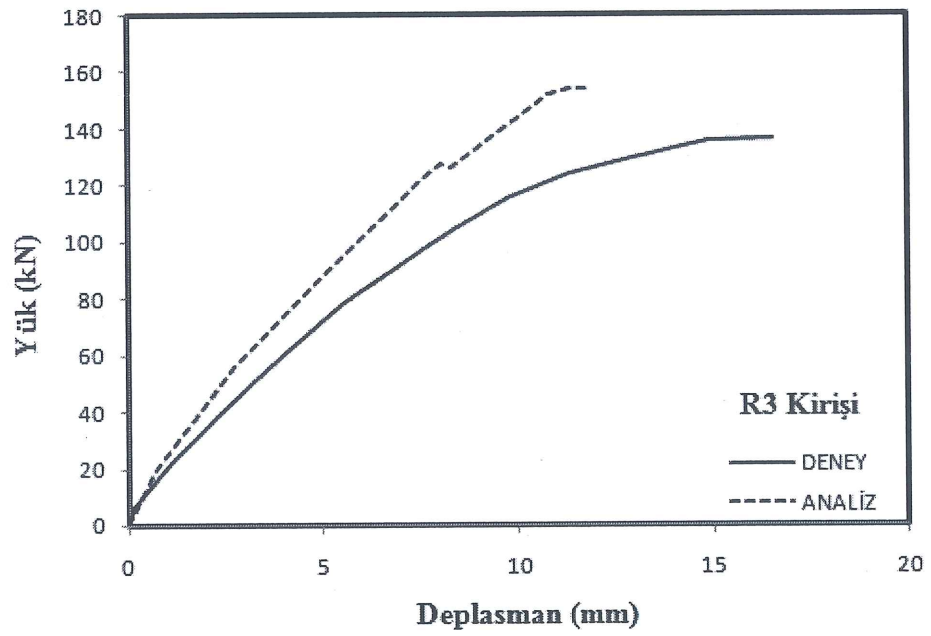
Kirişlerin yük-deplasman ilişkisi grafikleri Şekil 5.1 – Şekil 5.20’de verilmiştir.



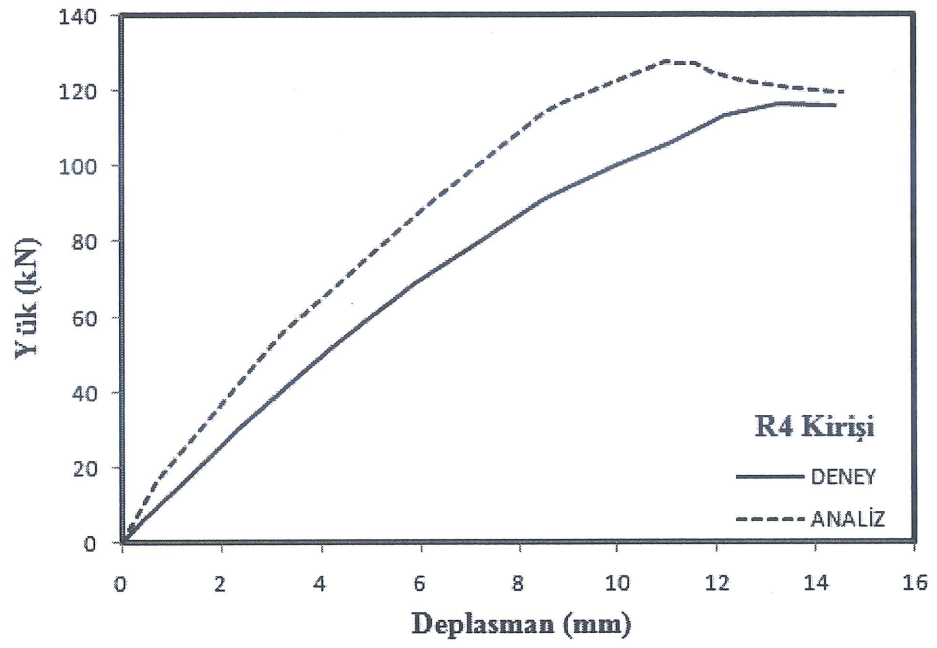
Şekil 5.1. R1 kirişi yük-deplasman ilişkisi



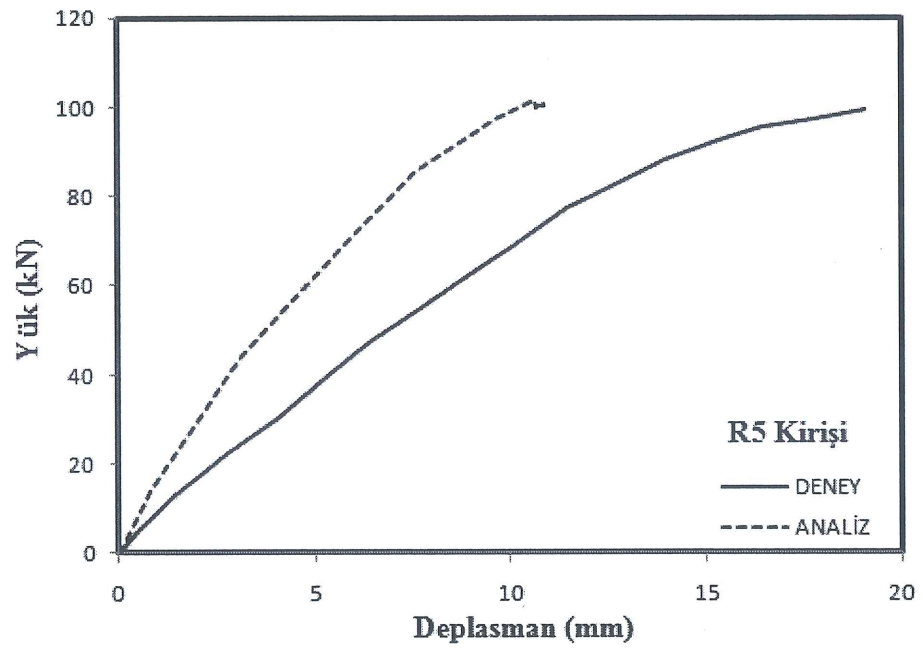
Şekil 5.2. R2 kirişi yük-deplasman ilişkisi



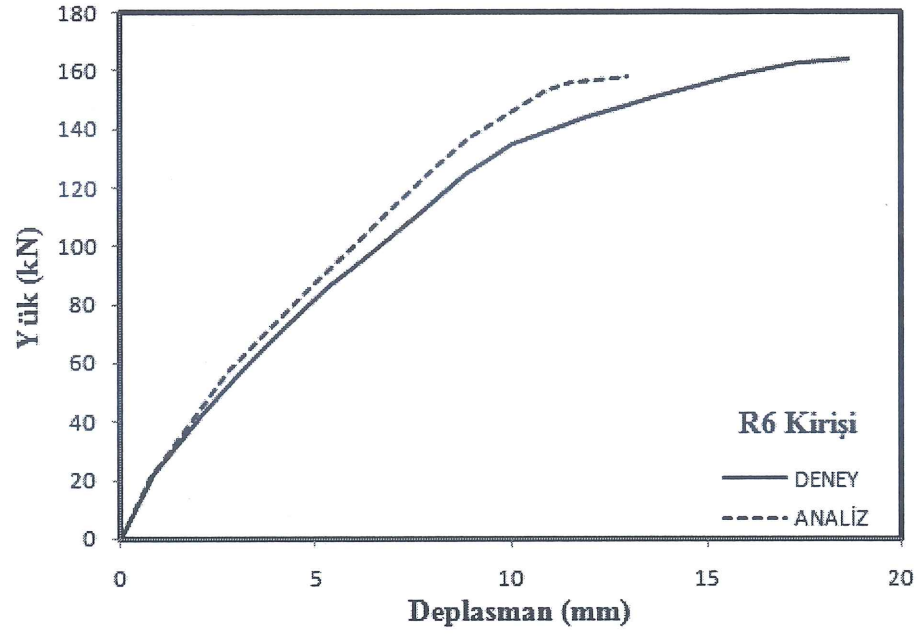
Şekil 5.3. R3 kirişi yük-deplasman ilişkisi



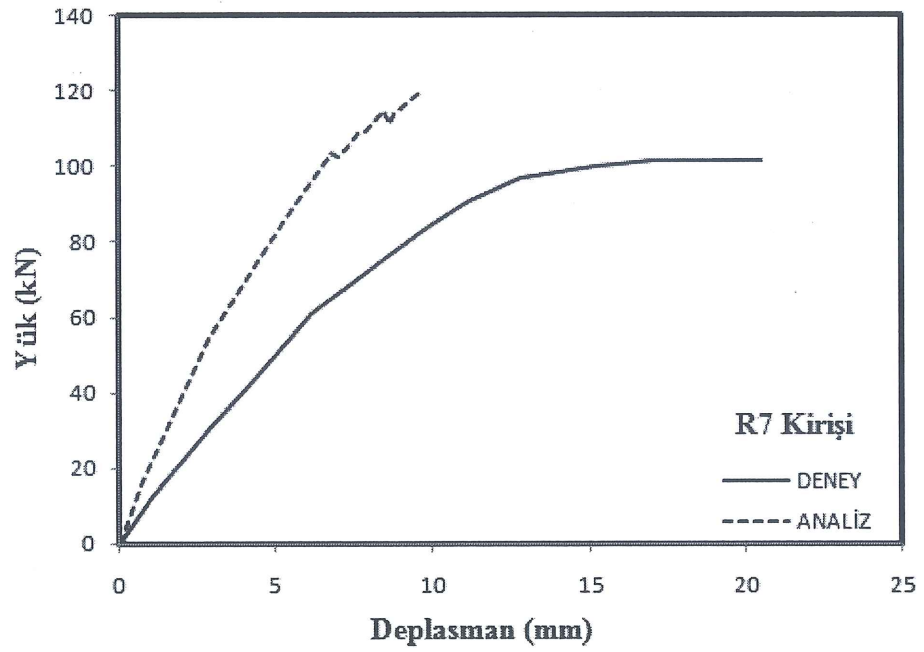
Şekil 5.4. R4 kirişı yük-deplasman ilişkisi



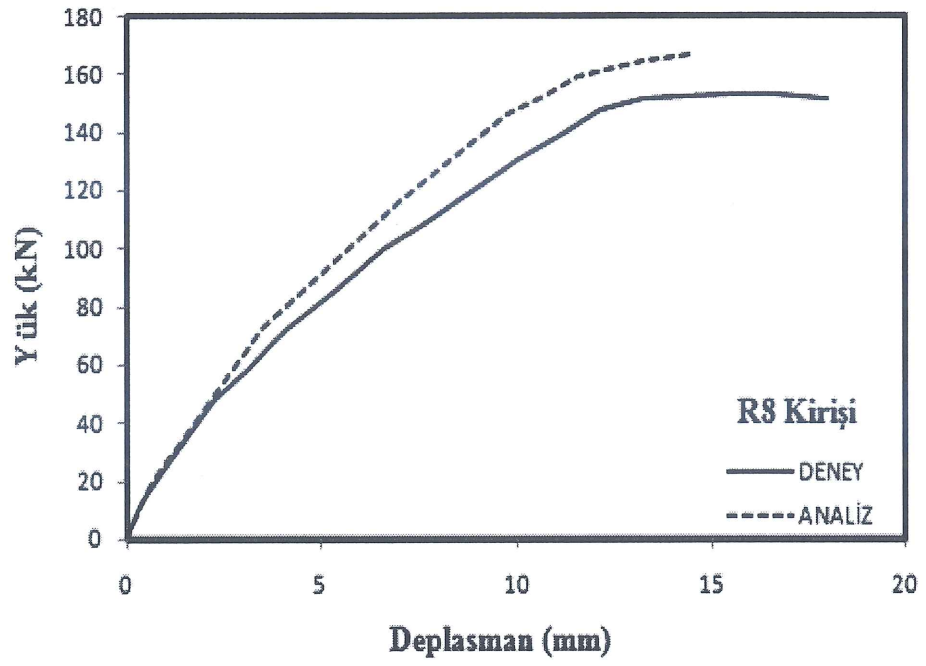
Şekil 5.5. R5 kirişı yük-deplasman ilişkisi



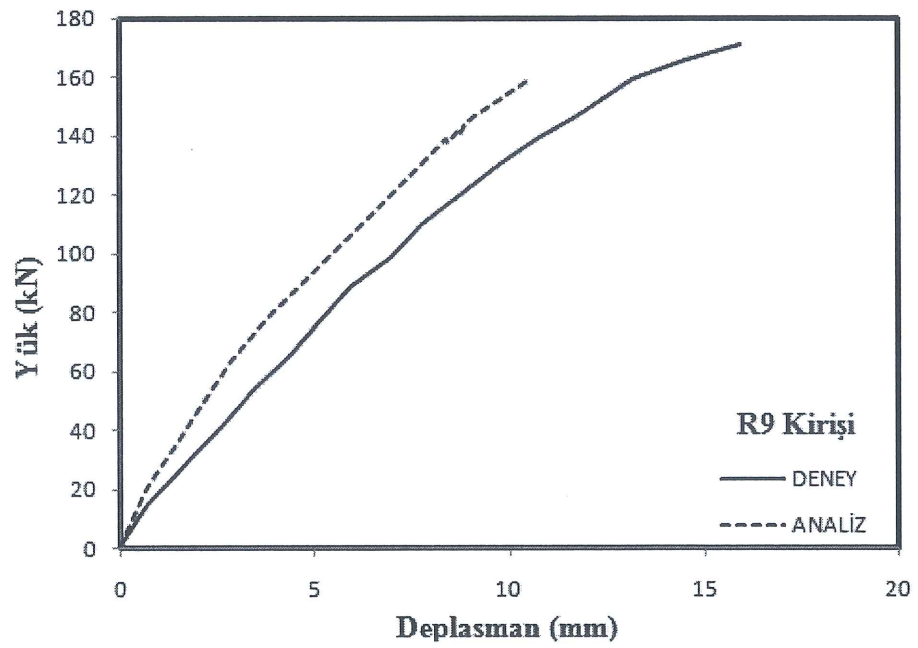
Şekil 5.6. R6 kirişi yük-deplasman ilişkisi



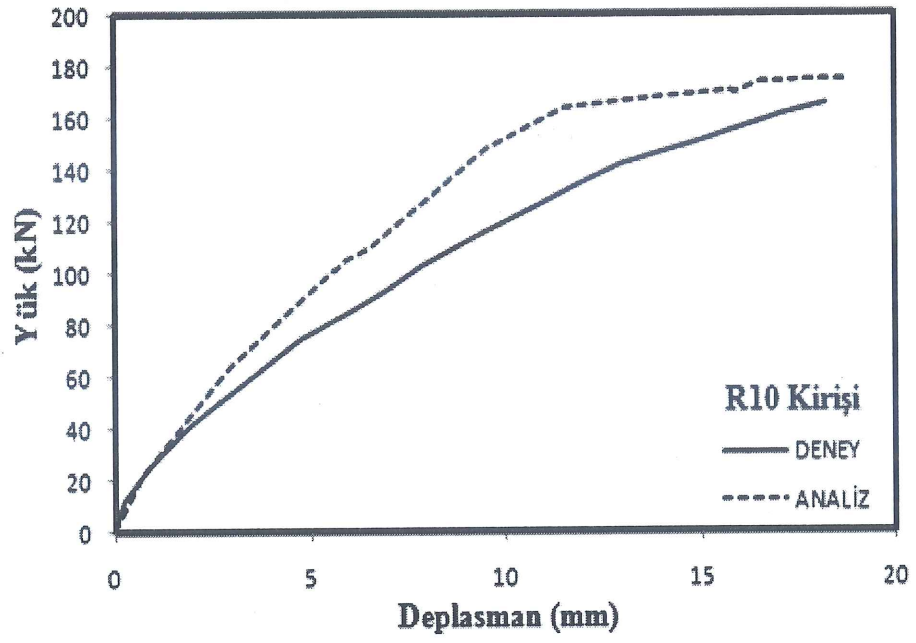
Şekil 5.7. R7 kirişi yük-deplasman ilişkisi



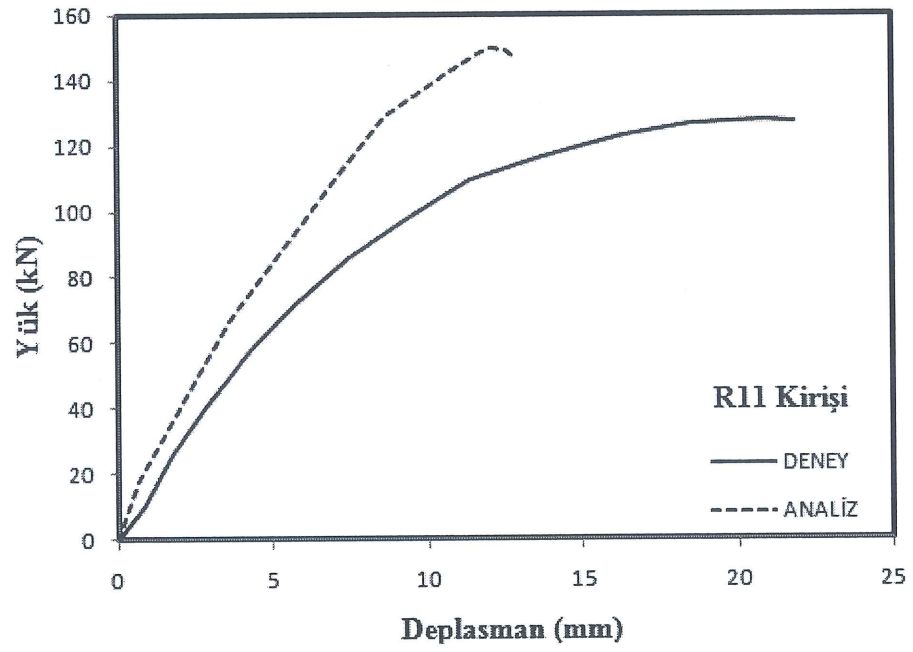
Şekil 5.8. R8 kirişi yük-deplasman ilişkisi



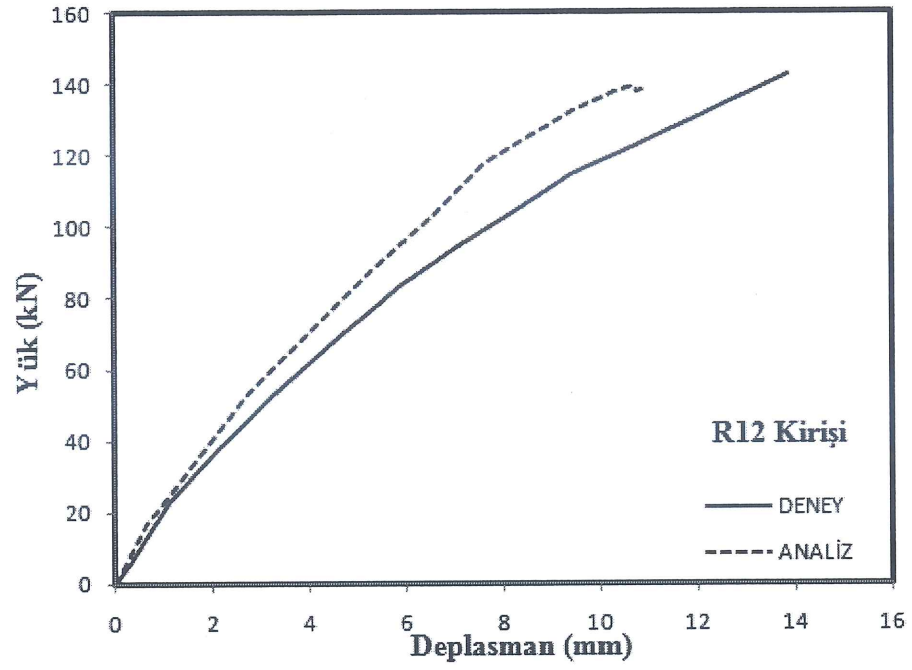
Şekil 5.9. R9 kirişi yük-deplasman ilişkisi



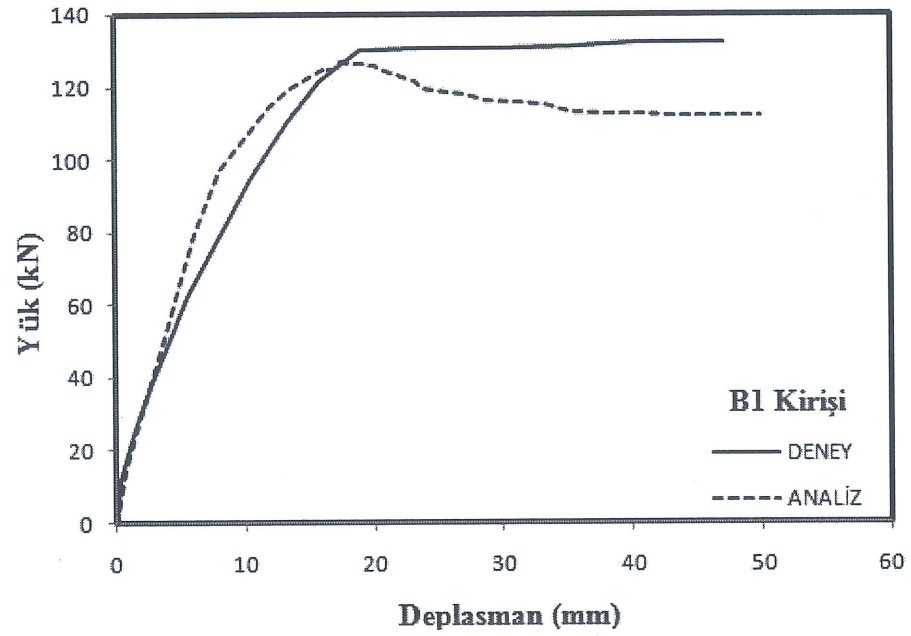
Şekil 5.10. R10 kirişi yük-deplasman ilişkisi



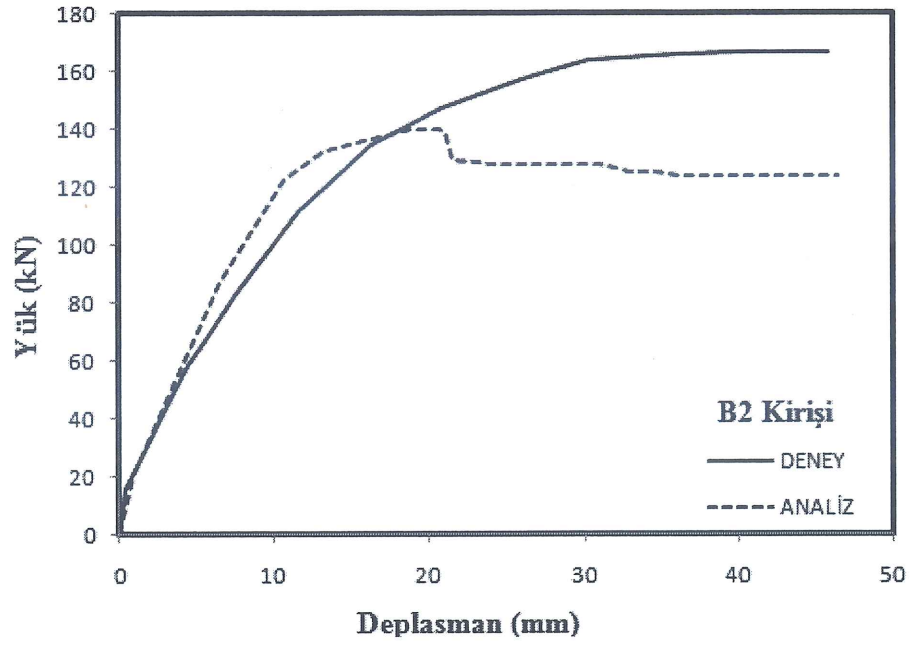
Şekil 5.11. R11 kirişi yük-deplasman ilişkisi



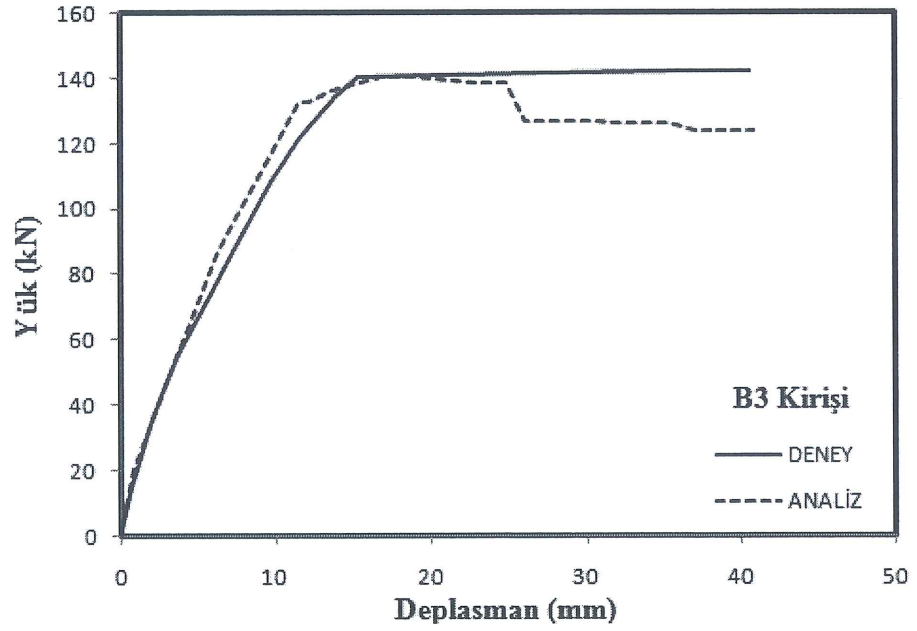
Şekil 5.12. R12 kirişi yük-deplasman ilişkisi



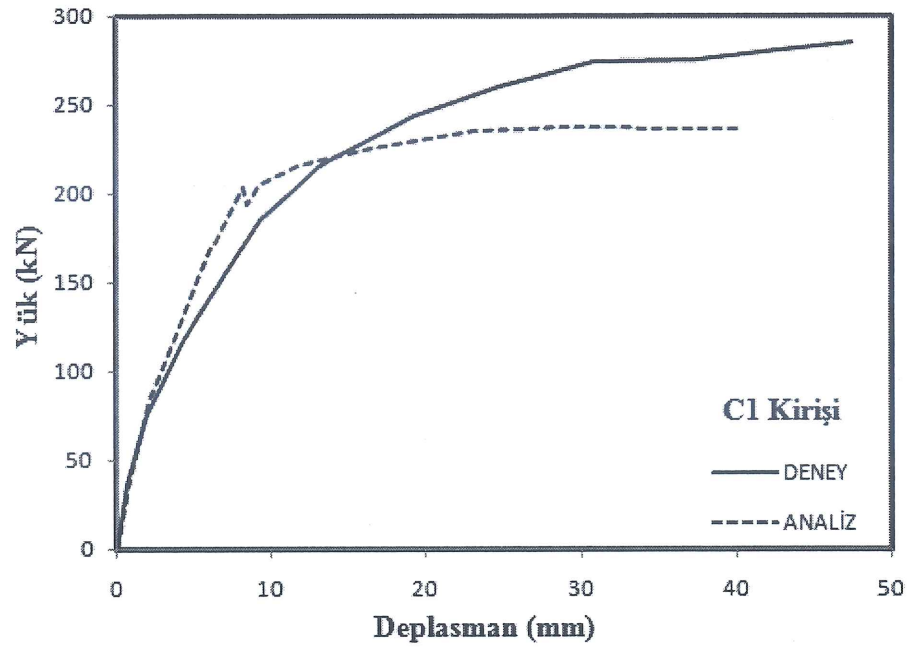
Şekil 5.13. B1 kirişi yük-deplasman ilişkisi



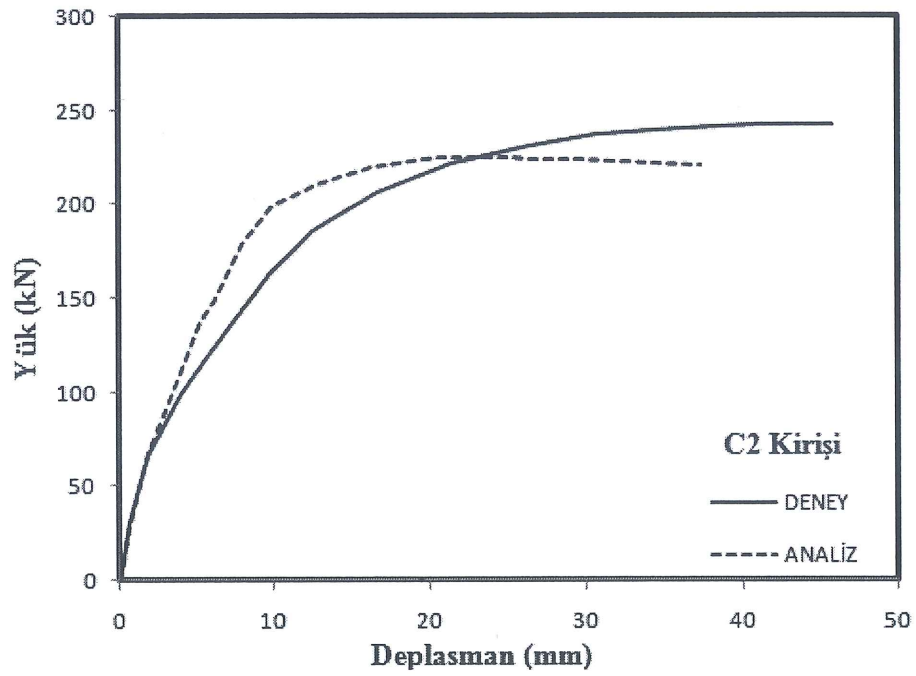
Şekil 5.14. B2 kirişi yük-deplasman ilişkisi



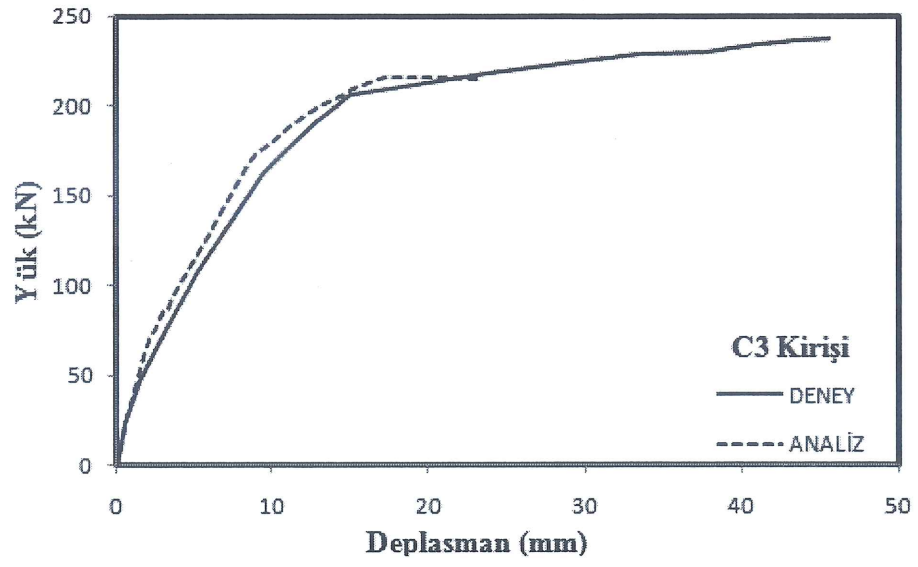
Şekil 5.15. B3 kirişi yük-deplasman ilişkisi



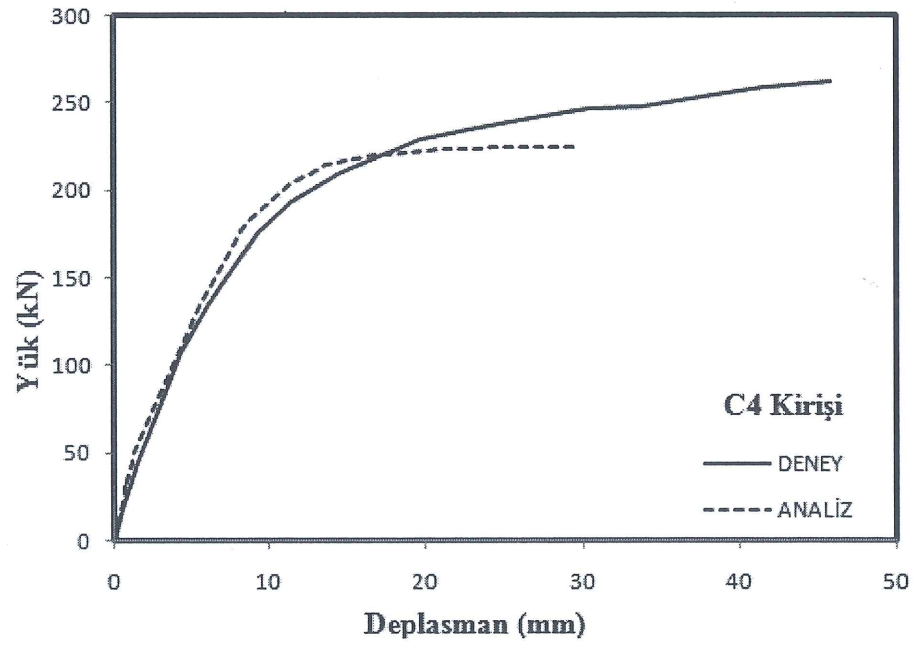
Şekil 5.16. C1 kirişi yük-deplasman ilişkisi



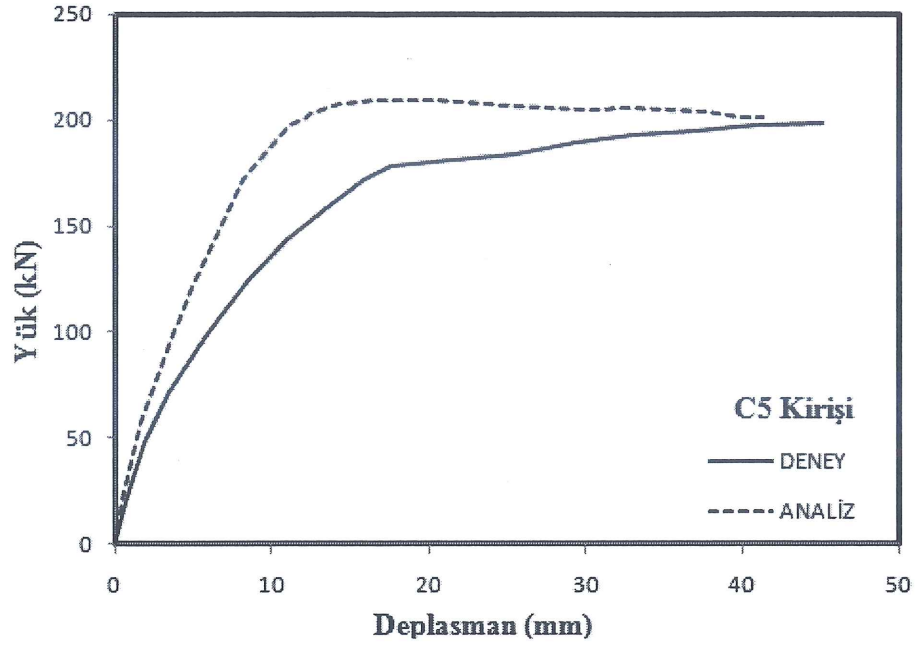
Şekil 5.17. C2 kirişi yük-deplasman ilişkisi



Şekil 5.18. C3 kirişi yük-deplasman ilişkisi



Şekil 5.19. C4 kirişi yük-deplasman ilişkisi



Şekil 5.20. C5 kirişi yük-deplasman ilişkisi

Kirişlerin yük-deplasman eğrileri incelendiğinde, analizden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla genel anlamda tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 5.1. R serisinde bulunan kirişlerin göçme anındaki deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılması

Kiriş	Yük (kN)			Deplasman (mm)		
	Deneysel	Analitik	$\frac{\text{Deneysel}}{\text{Analitik}}$	Deneysel	Analitik	$\frac{\text{Deneysel}}{\text{Analitik}}$
R1	194,3	169,3	1,15	14,8	11,8	1,25
R2	162,2	159,6	1,01	14,9	15,3	0,97
R3	136,5	153,3	0,89	16,5	11,9	1,38
R4	116	119,4	0,97	14,4	14,6	0,99
R5	99,3	100,3	0,99	19	10,9	1,74
R6	164,1	157,6	1,04	18,7	12,9	1,45
R7	101,5	119,6	0,85	20,5	9,6	2,13
R8	151,8	166,1	0,91	17,9	14,4	1,24
R9	170,9	159,4	1,07	15,9	10,5	1,51
R10	165,6	174,9	0,95	18,2	18,8	0,97
R11	127,4	147,2	0,86	21,8	12,8	1,7
R12	142,5	138,1	1,03	13,9	10,9	1,27
ORTALAMA	144,34	147,06	0,98	17	13	1,38
STANDART SAPMA	29,29	23,12	0,09	2,54	2,57	0,35

R serisinde bulunan kirişlerin göçme anındaki analiz sonuçları Tablo 5.1’de deneysel verilerle karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Boşluk uzunluğu 1200 mm olan R5 kirişinde ve boşluk derinliği 220 mm olan R7 kirişinde vierendeel etkisinin daha fazla hissedildiği gözlemlenmiştir.

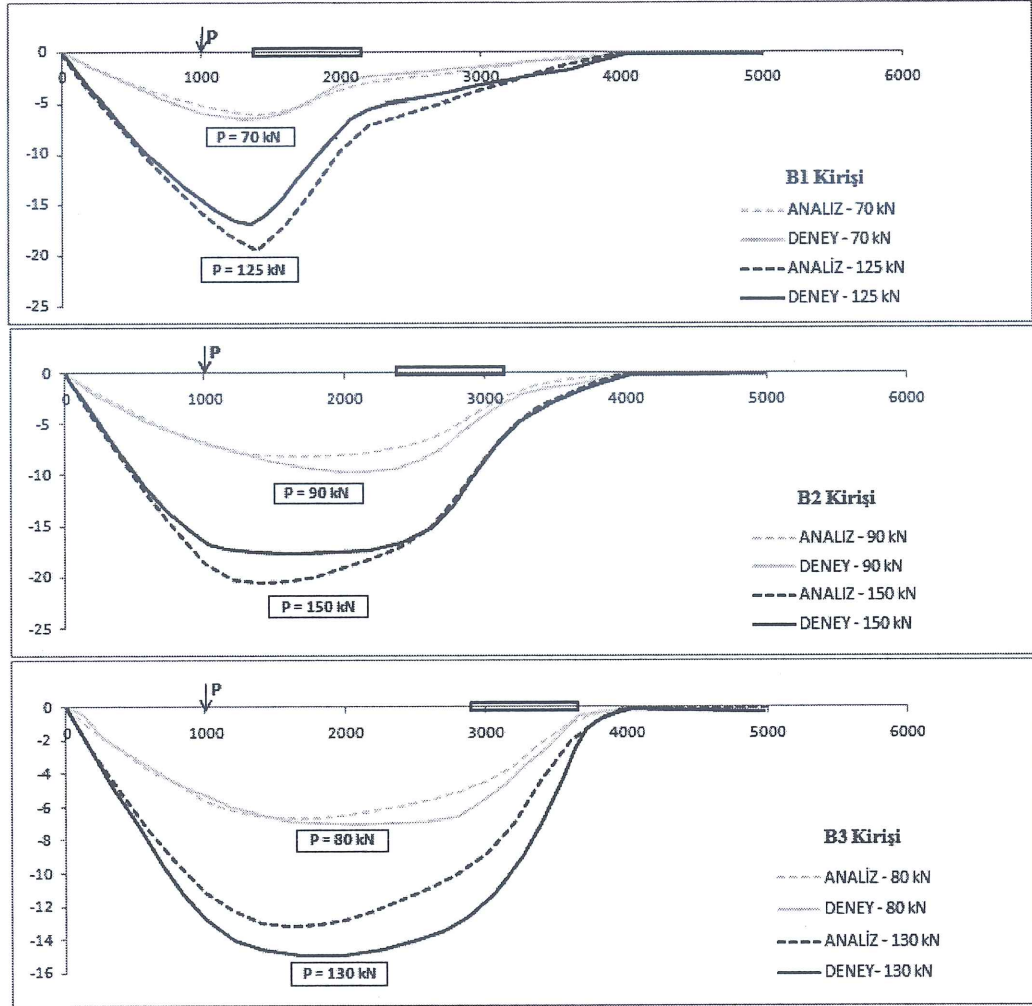
Tablo 5.2. B ve C serisinde bulunan kirişlerin göçme anındaki deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılması

Kiriş	Yük (kN)			Deplasman (mm)		
	Deneysel	Analitik	$\frac{\text{Deneysel}}{\text{Analitik}}$	Deneysel	Analitik	$\frac{\text{Deneysel}}{\text{Analitik}}$
B1	132	112	1,18	47,1	50	0,94
B2	166,3	123,4	1,35	45,8	46,4	0,99
B3	142,1	123,7	1,15	40,5	40,2	1,01
C1	285,1	236,6	1,2	47,6	40	1,19
C2	242,2	220,7	1,1	45,8	37,2	1,23
C3	237,6	214,5	1,11	45,5	23,3	1,95
C4	261,8	223,9	1,17	45,8	29,5	1,55
C5	197,8	201,1	0,98	45,1	45,3	0,99
ORTALAMA	203,9	181,99	1,15	45	39	1,23
STANDART SAPMA	60,35	52,63	0,10	2,15	8,93	0,35

B ve C serilerinde bulunan kirişlerin analiz sonuçları da Tablo 5.2’de görüldüğü üzere deneysel sonuçlarla uyumludur.

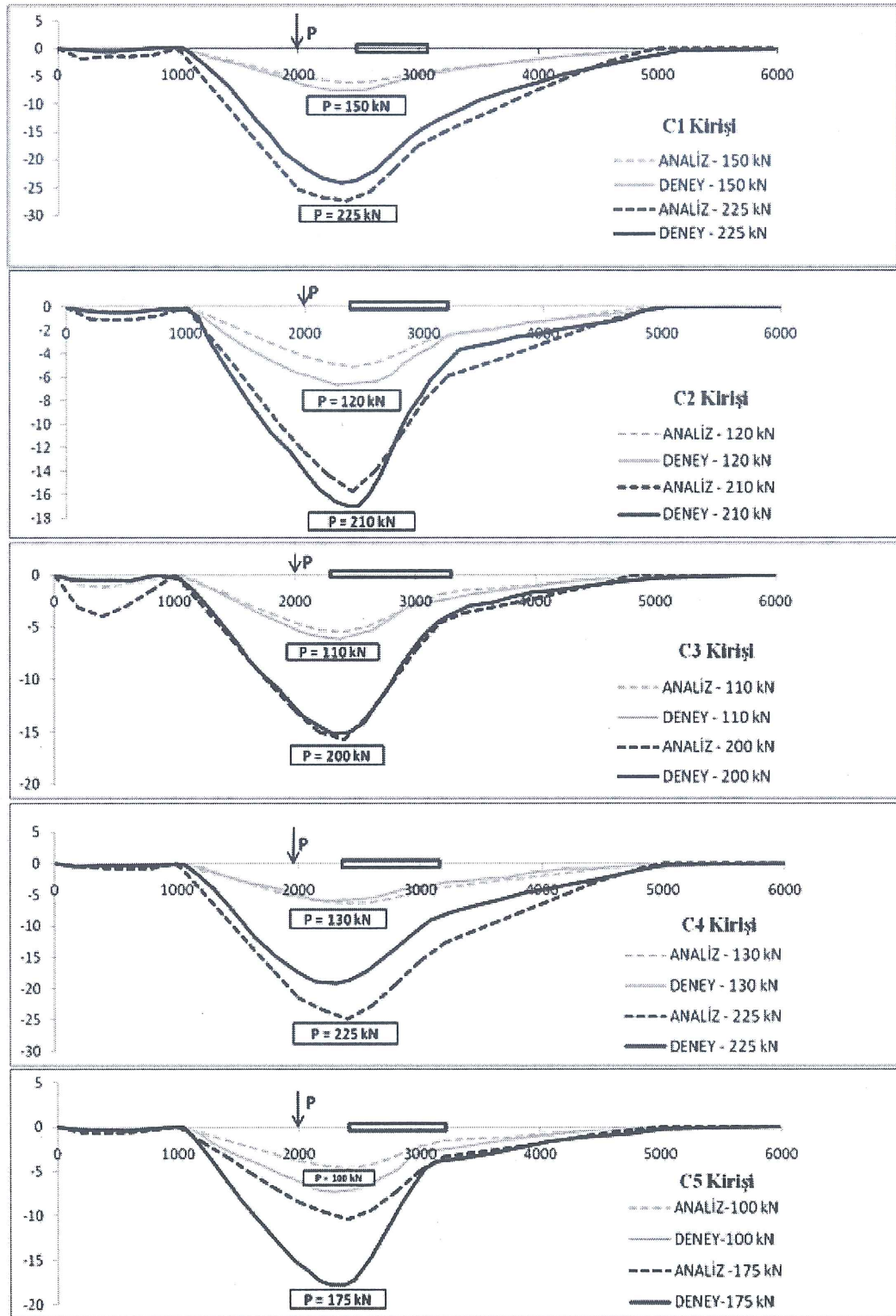
5.3. Kiriş Boyunca Deformasyon Profilleri

Kullanılan deneysel çalışmada, B ve C serilerinde bulunan kirişlerin farklı yük seviyelerindeki deforme olmuş şekilleri verilmiştir. Kirişlerin servis yükü ve göçme yükü seviyelerinde oluşan deformasyon profilleri incelenmiştir. Bu eğrilerden yararlanılarak analitik modelden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla birlikte Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de gösterilmiştir.



Şekil 5.21. B serisinde bulunan kirişlerin deforme olma şekilleri

Sonuçlar incelendiğinde, B ve C serilerine ait kirişlerin analitik modelden elde edilen sonuçlarının her iki yük seviyesinde de deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Yalnızca C5 kirişinde, vierendeel etkisinin daha fazla olması sebebiyle analiz sonuçları deneysel sonuçlardan bir miktar sapmıştır.



Şekil 5.22. C serisinde bulunan kirişlerin deforme olma şekilleri

6. MODELLEME İLE İLGİLİ YAPILAN PARAMETRİK ÇALIŞMALAR

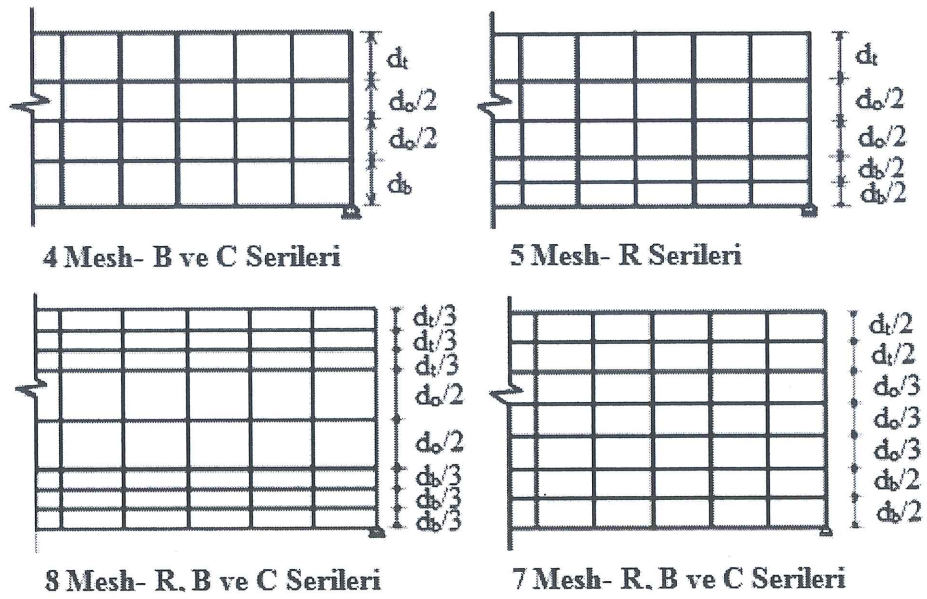
6.1. Giriş

Bu bölümde sonlu eleman boyutunun ve beton çekme modelinin analiz sonuçları üzerinde oluşturduğu etkileri incelemek amacıyla bir çalışma yapılmıştır.

6.2. Mesh Boyutunun Analiz Sonuçları Üzerindeki Etkisi

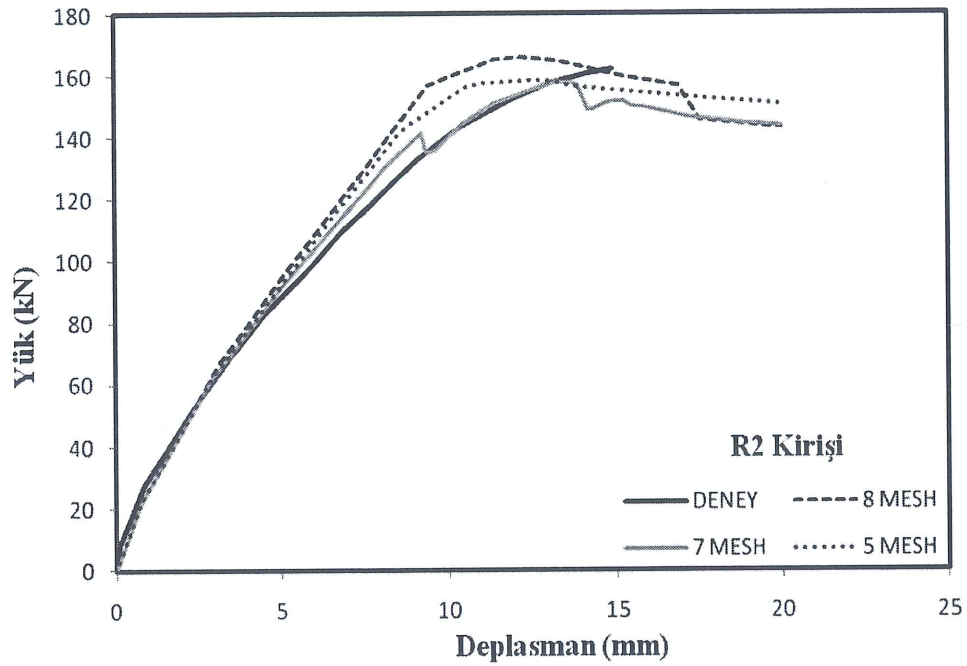
Sonlu elemanlardan oluşan bir modelde kullanılan elemanın sayısı çözümün doğruluğunu önemli ölçüde etkilemektedir. Elemanın çok küçük parçalara bölünmesi doğru sonuca yaklaştırırken analiz süresini uzamakta ve verimliliği düşürmektedir. Bu sebeple sonlu elemanlar yönteminde uygun mesh boyutunu seçmek oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, boyuna donatının yerleşimiyle uyumlu olacak şekilde 4 farklı mesh tipi tanımlanmıştır. Kirişler, Şekil 6.1’de görüldüğü üzere kiriş derinliği boyunca 4, 5, 7 ve 8 meshe bölünmüştür.

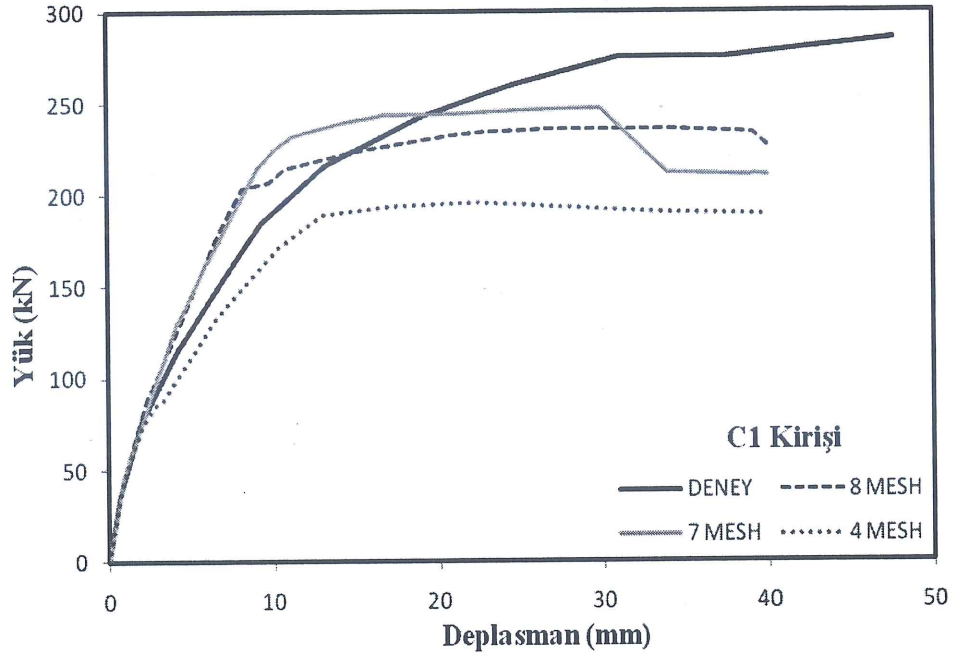


Şekil 6.1. Mesh boyutları

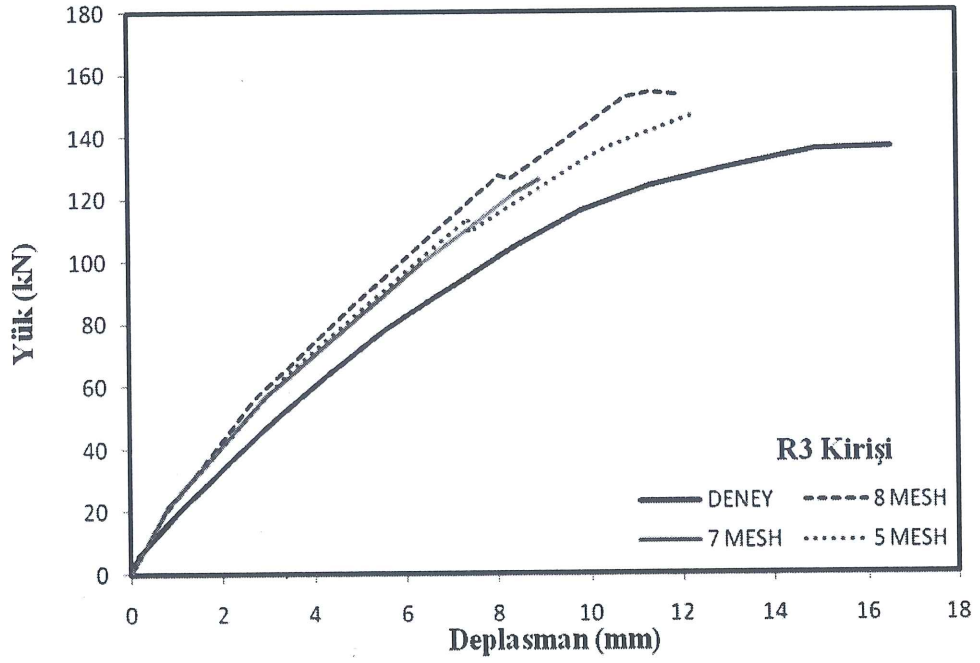
4 mesh, az sayıda sonlu eleman kullanımının analize etkisini incelemek amacıyla oluşturulmuştur. Ancak R serisinde bulunan kirişler boşluğun alt ve üst bölgelerinde bulunan donatı çaplarının birbirinden farklı olması sebebi ile 5 meshe bölünmüştür. 7 mesh, sonlu eleman boyutlarının olabildiğince birbirine yakın ölçülerde tutulmaya çalışıldığı durumdur. 8 mesh ise kirişleri derinliği boyunca donatı katmanlarının bulunduğu bölgelerde daha küçük elemanlara bölerek oluşturulmuştur. Mesh boyutunun analiz üzerindeki etkisi, boşluk uzunluğu 600 mm olan R2 ve C1 kirişleri, 800 mm olan R3, B3 ve C2 kirişleri ve 1000 mm olan R4 ve C3 kirişlerinde incelenmiştir. Analizden elde edilen sonuçlar Şekil 6.2 - Şekil 6.8’de verilmiştir.



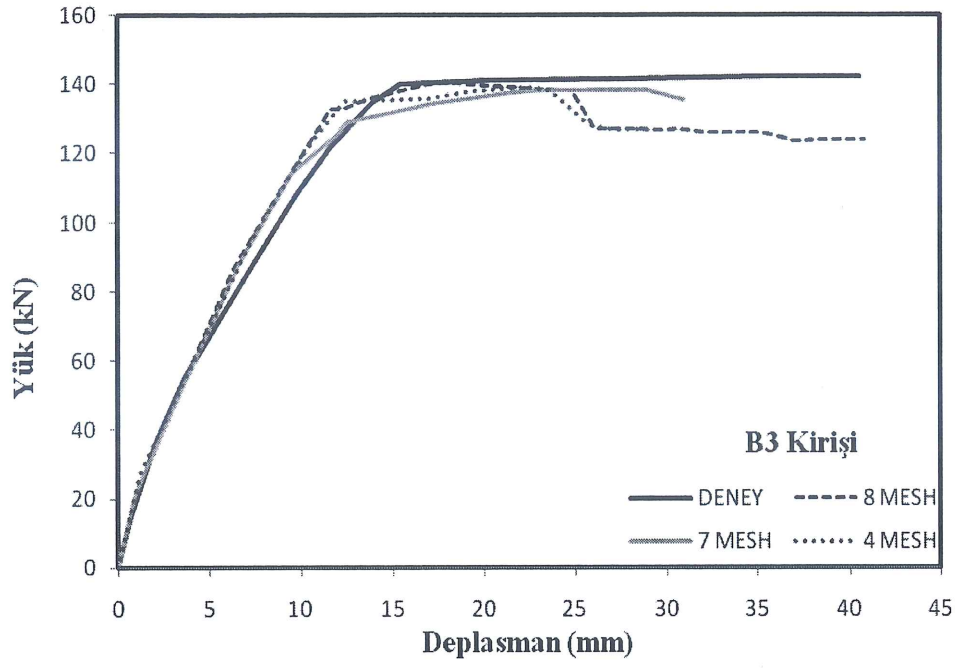
Şekil 6.2. Mesh boyutunun R2 kirişi üzerindeki etkisi



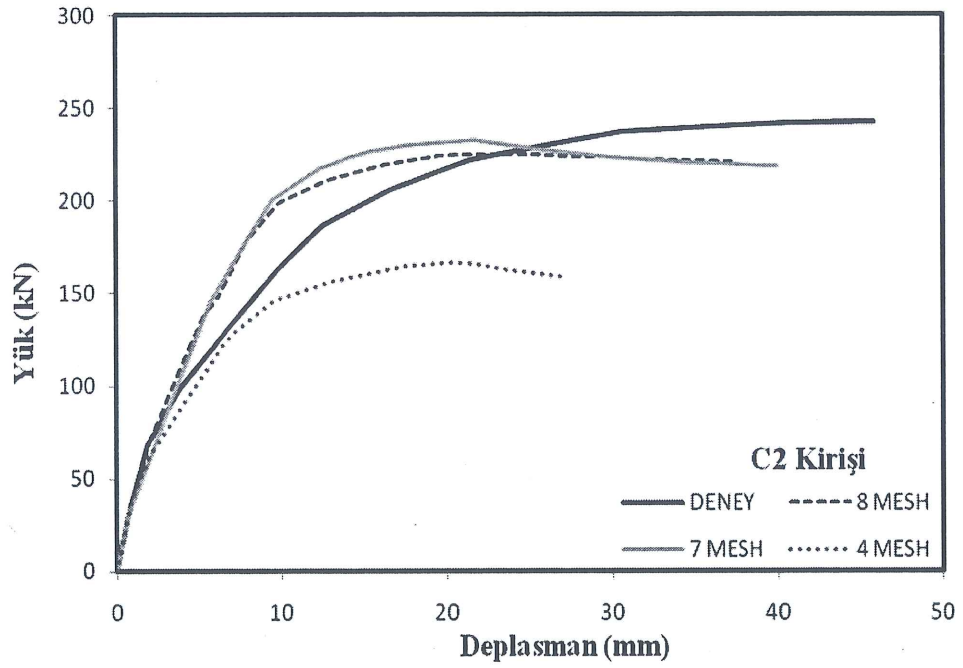
Şekil 6.3. Mesh boyutunun C1 kirişi üzerindeki etkisi



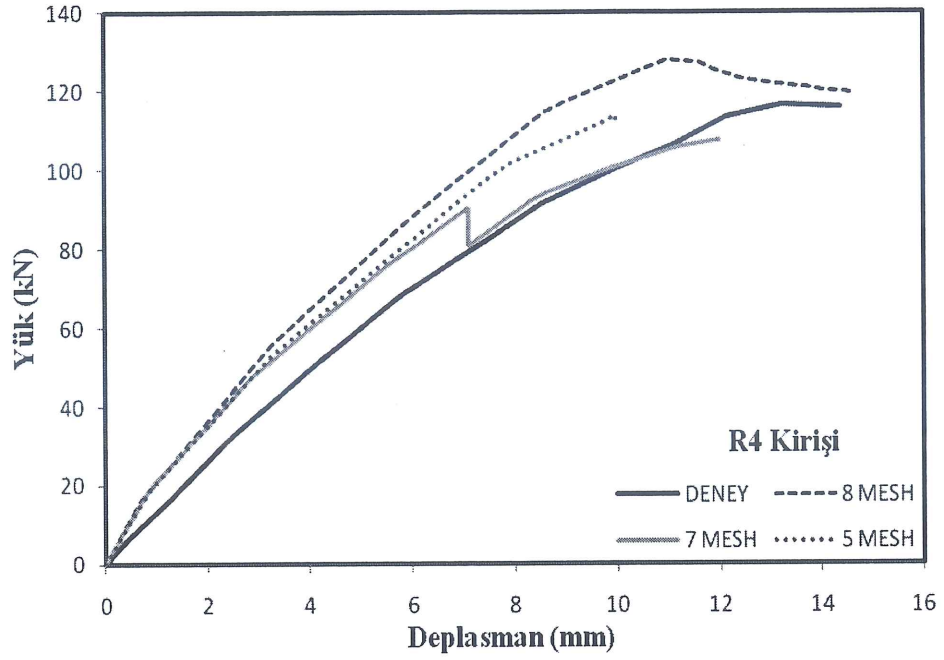
Şekil 6.4. Mesh boyutunun R3 kirişi üzerindeki etkisi



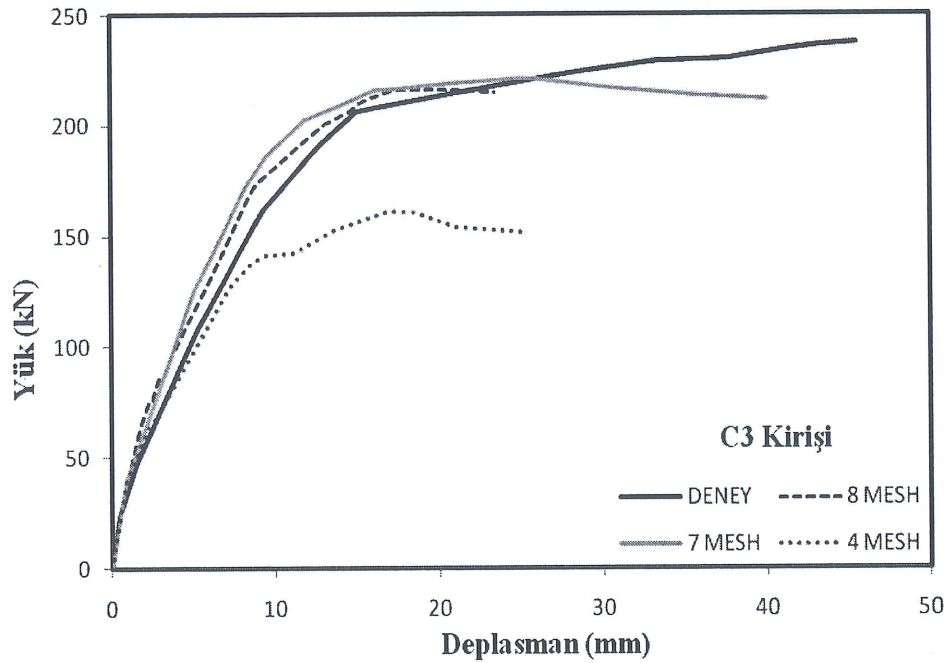
Şekil 6.5. Mesh boyutunun B3 kirişi üzerindeki etkisi



Şekil 6.6. Mesh boyutunun C2 kirişi üzerindeki etkisi



Şekil 6.7. Mesh boyutunun R4 kirişi üzerindeki etkisi



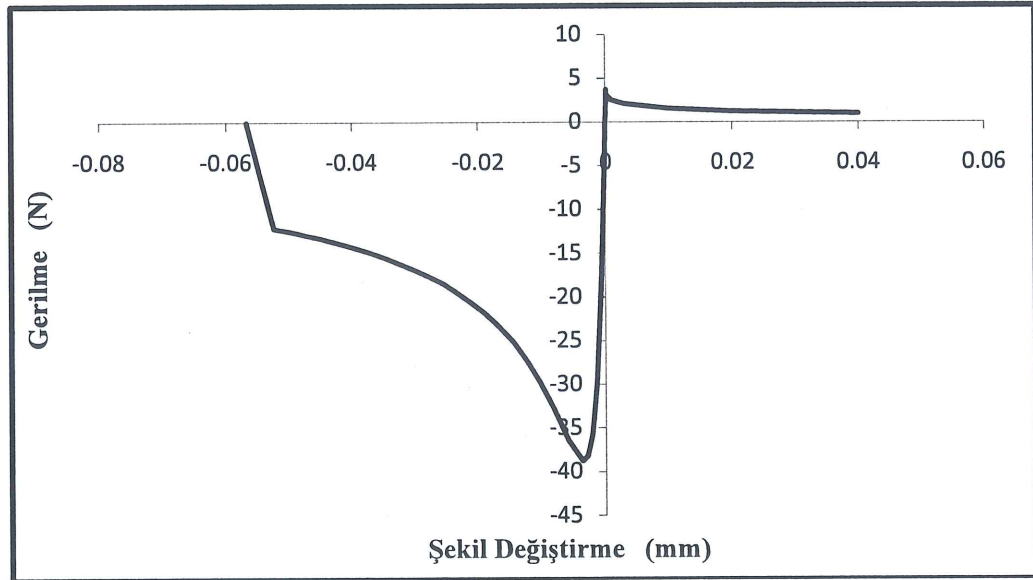
Şekil 6.8. Mesh boyutunun C3 kirişi üzerindeki etkisi

Bu çalışma sonucunda mesh boyutunun, R serisindeki basit mesnetli ve tek açıklıklı kirişlerin ve B serisindeki iki açıklıklı kirişlerin sonuçlarını önemli miktarda değiştirmedeği ancak C serisindeki sürekli ve üç açıklıklı kirişlerde ciddi sapmalara neden olduğu gözlemlenmiştir. C serisinde 8 parçaya bölünmüş modelleme sonuçları

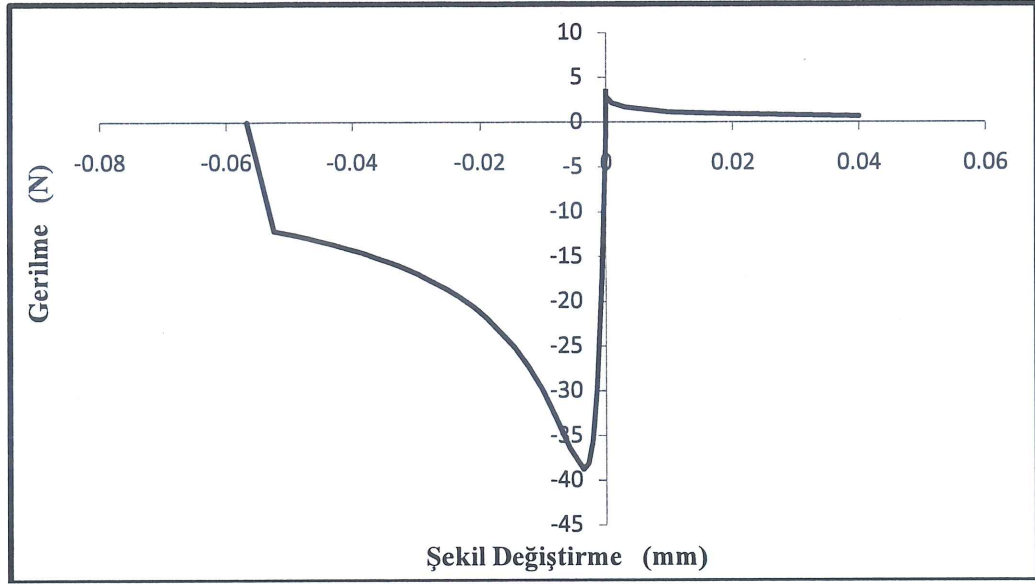
ile 7 parçaya bölünmüş modelleme sonuçlarının birbirine yakın olduğu ancak 4 parçaya bölünerek yapılmış modelleme sonuçlarında yük kapasitesinde diğer sonuçlara nazaran ciddi düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

6.3. Beton Çekme Modelinin Analiz Sonuçları Üzerindeki Etkisi

Eleman tasarımı yapılırken çatlama sonrası betonun çekme gerilmeleri genellikle ihmal edilmektedir. Ancak beton çatladıktan sonra çatlaklar arasında kalan sağlam beton çekme gerilmelerini taşımaya devam ederek yapının genel rijitliğine katkı sağlamaktadır. Bu sebeple, çatlama sonrası beton çekme gerilmelerini davranışa dahil eden iki beton çekme modeli ile modelleme yapılmış ve bu modellerin analiz üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan beton çekme modelleri, Vecchio ve Collins (1986) modeli [30] ve Collins ve Mitchell (1987) modelidir [31]. Beton çekme bölgeleri Vecchio ve Collins (1986) modeli ve Collins ve Mitchell (1987) modeli kullanılarak tanımlanan beton gerilme-şekil değiştirme eğrileri sırasıyla Şekil 6.9'da ve Şekil 6.10'da gösterilmiştir.

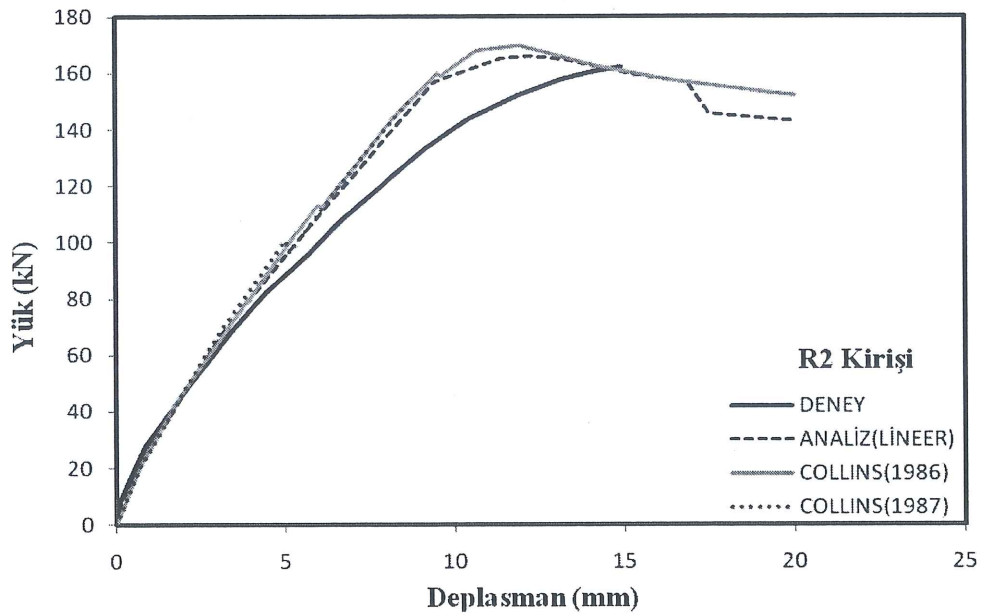


Şekil 6.9. Vecchio ve Collins (1986) modeli ile oluşturulan beton gerilme-şekil değiştirme eğrisi

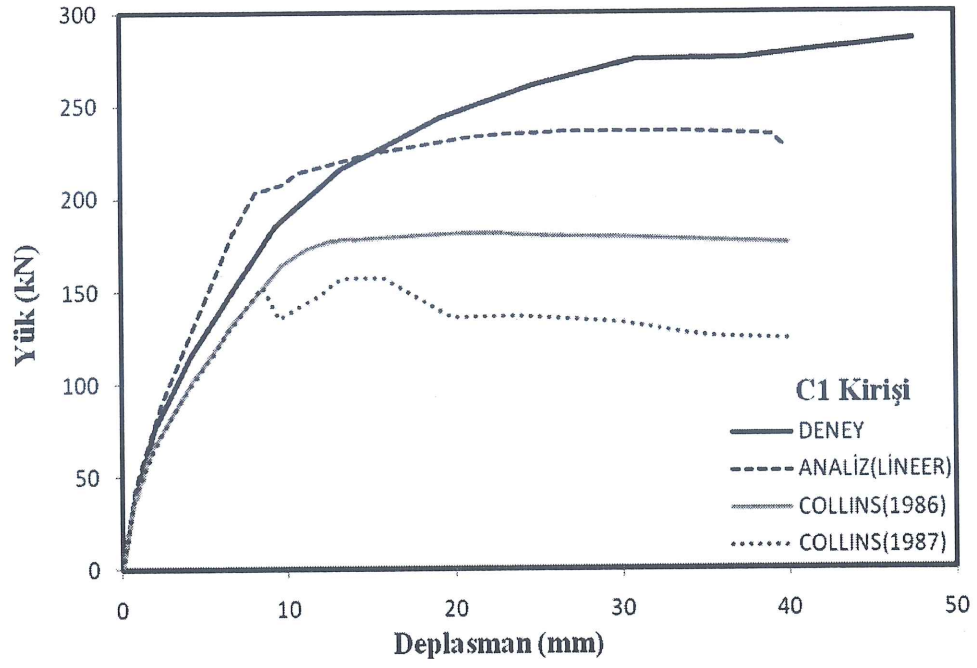


Şekil 6.10. Collins ve Mitchell (1987) modeli ile oluşturulan beton gerilme-şekil değiştirme eğrisi

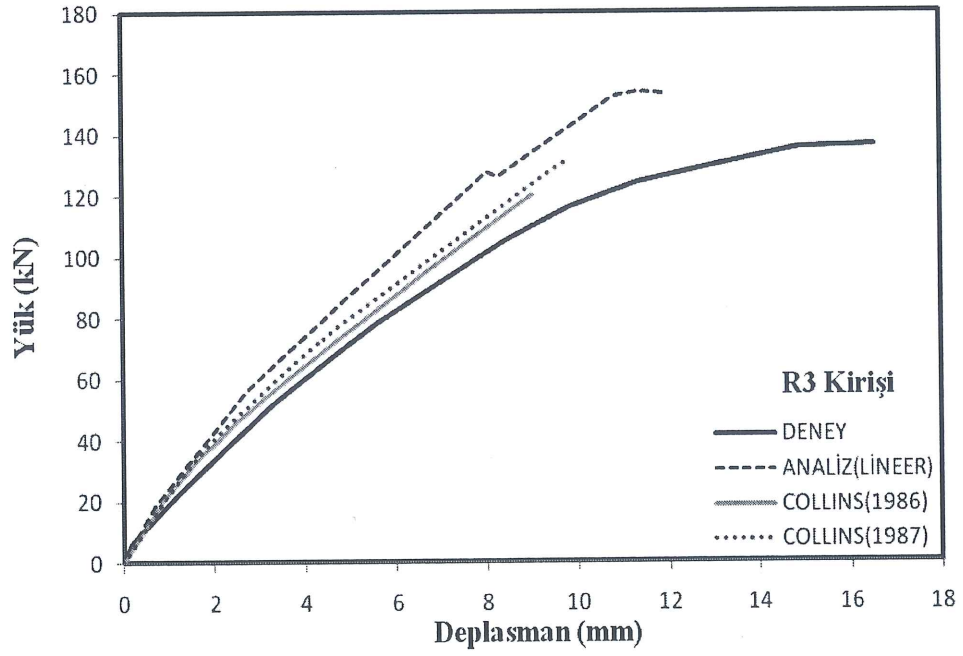
Elde edilen sonuçlar, çatlama sonrası beton çekme modelinin lineer tanımlandığı modelleme sonuçlarıyla ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Farklı beton çekme modelleri, boşluk uzunluğu 600 mm olan R2 ve C1 kirişleri, 800 mm olan R3, B3 ve C2 kirişleri ve 1000 mm olan R4 ve C3 kirişleri üzerinde denenmiştir. Analiz sonuçları aşağıdaki Şekil 6.11- Şekil 6.17’de verilmiştir.



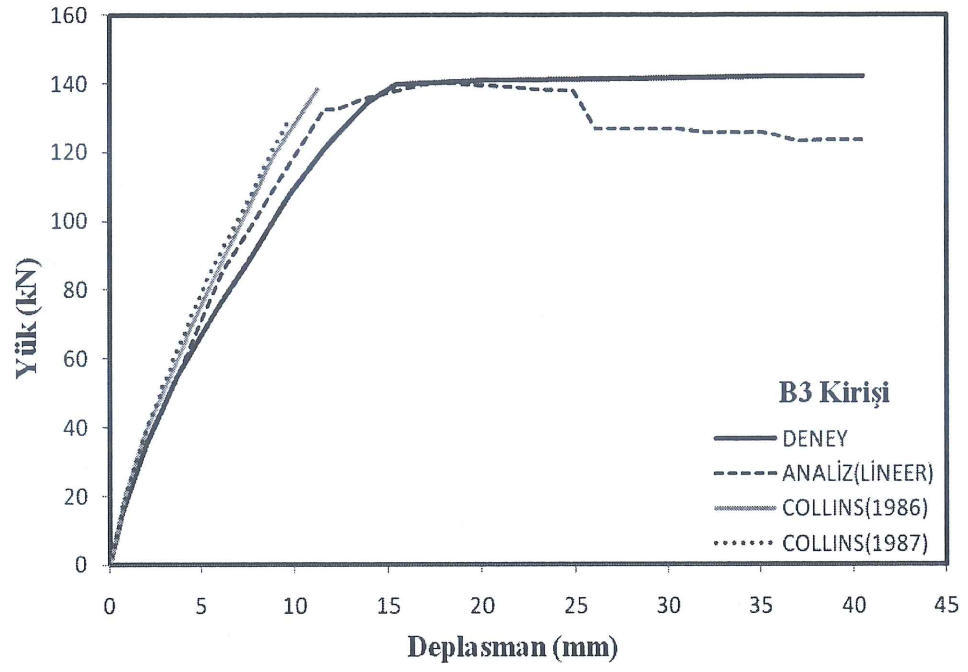
Şekil 6.11. Farklı beton çekme modellerinin R2 kirişi üzerindeki etkisi



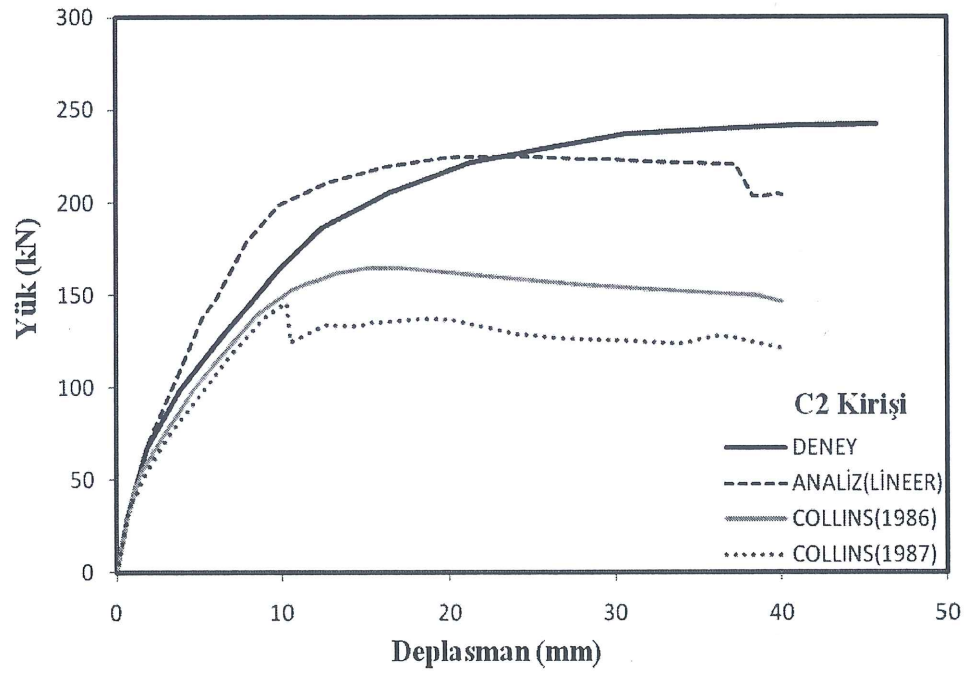
Şekil 6.12. Farklı beton çekme modellerinin C1 kirişi üzerindeki etkisi



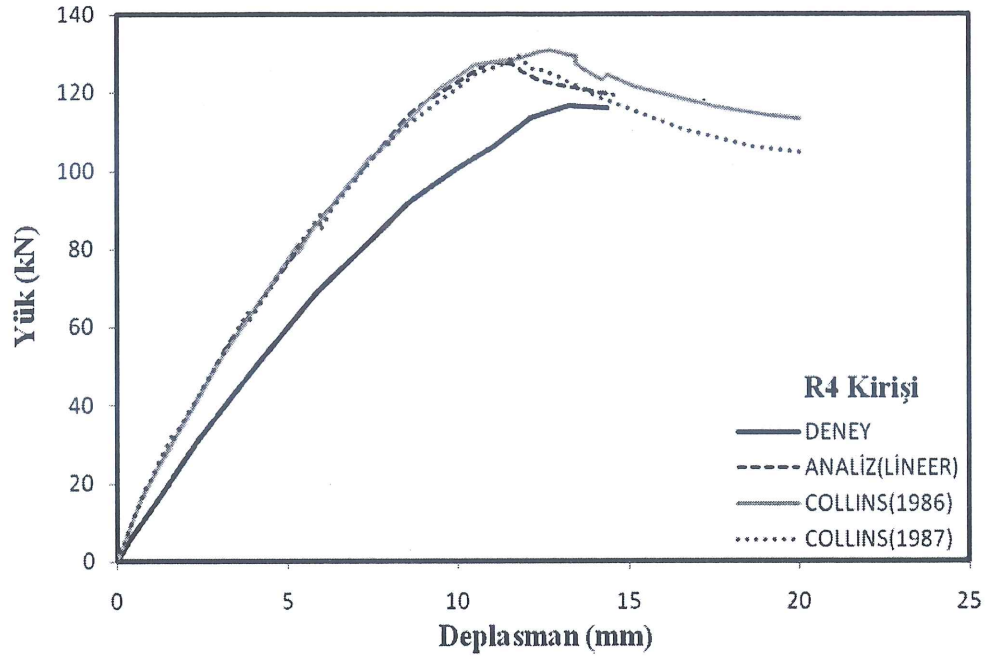
Şekil 6.13. Farklı beton çekme modellerinin R3 kirişi üzerindeki etkisi



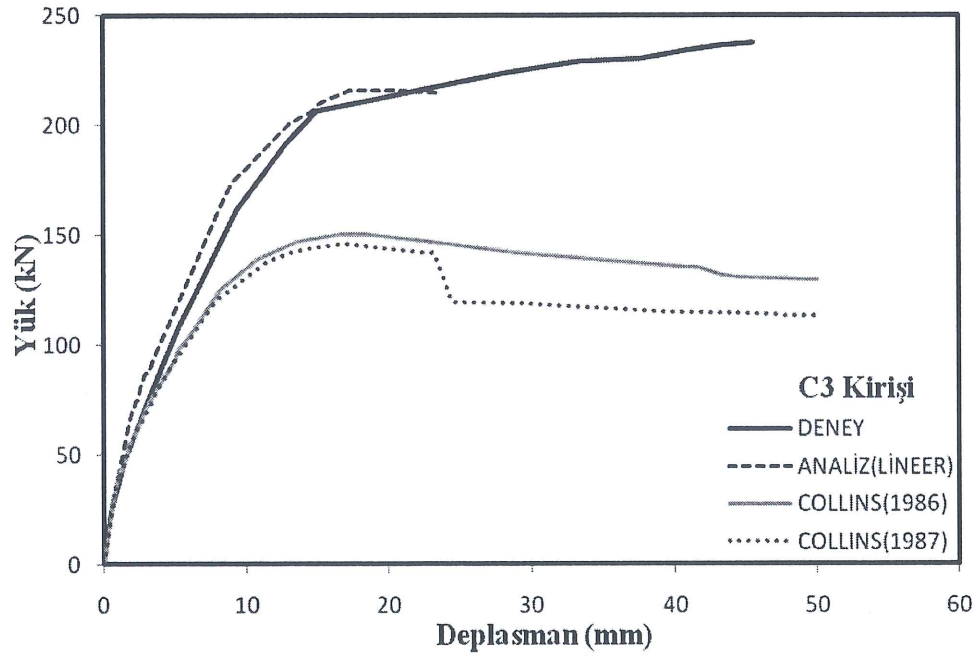
Şekil 6.14. Farklı beton çekme modellerinin B3 kirişi üzerindeki etkisi



Şekil 6.15. Farklı beton çekme modellerinin C2 kirişi üzerindeki etkisi



Şekil 6.16. Farklı beton çekme modellerinin R4 kirişi üzerindeki etkisi



Şekil 6.17. Farklı beton çekme modellerinin C3 kirişi üzerindeki etkisi

Farklı beton çekme modellerinin yük-deplasman ilişkisi üzerindeki etkisini gösteren analiz sonuçları incelenmiştir. Çalışma sonucunda, beton çekme modelinin R serisindeki basit mesnetli ve tek açıklıklı kirişlerin ve B serisindeki iki açıklıklı kirişlerin yük taşıma kapasitesini pek fazla değiştirmedeği ancak deformasyonlarda

bir miktar farklılaşma olduğu gözlemlenmiştir. C serisindeki sürekli ve üç açıklıklı kirişlerde ise Vecchio ve Collins (1986) [30] ve Collins ve Mitchell (1987) tarafından önerilen modelin [31] deformasyonları pek değiştirmedığı ancak yük taşıma kapasitesinde ciddi sapmalara neden olduğu gözlemlenmiştir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yürütülen çalışma kapsamında, gövdesinde geniş boşluk bulunan 20 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş numunesi bir sonlu eleman yazılım programı ile modellenmiştir. Modeller SAP2000 programı kullanılarak oluşturulmuştur. Analitik modelde kirişler, doğrusal olmayan katmanlı kabuk elemanlarla modellenmiştir. Çatlama kesit etkisi, katmanlı kabuk eleman kalınlığının % 40'ı alınarak modele yansıtılmıştır. Kirişlerin analizi düşey doğrultuda deplasman kontrollü doğrusal olmayan analiz ile yapılmış ve elde edilen yük-deplasman eğrileri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Analiz sonuçlarının genel anlamda deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Analitik model ile elde edilen sonuçların, boşluk uzunluğu veya derinliği arttıkça deneysel sonuçlardan uzaklaştığı gözlemlenmiştir. Özellikle boşluk uzunluğunun veya derinliğinin diğer kirişlere nazaran daha büyük olduğu R5, R7 kirişlerinde vierendeel paneli etkisinin daha fazla hissedildiği gözlemlenmiştir.

Çalışma kapsamında, mesh boyutunun ve beton çekme modelinin değişken olarak seçildiği parametrik bir çalışma yapılmıştır. İlk olarak farklı mesh boyutlarının analiz sonuçları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda, C serisinde bulunan kirişlerin az sayıda mesh ile oluşturan analitik modellerinde, kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin doğru sonuçtan oldukça uzaklaştığı gözlemlenmiştir. Diğer mesh boyutları ile kurulan analitik modellerin sonuçlarının deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

Ardından farklı beton çekme modellerinin analiz sonuçları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bahsi geçen çekme modellerinde, çatlama sonrası beton çekme gerilmelerinin beton davranışına katkısı farklı eğrilerle tanımlanmıştır. Çalışma sonucunda çekme sertleşmesinin R ve B serisindeki kirişlerin yük taşıma kapasitesini pek fazla değiştirmede ancak deformasyonlarda bir miktar farklılaşma olduğu gözlemlenmiştir. C serisindeki kirişlerde ise Vecchio ve Collins (1986) [30] ve Collins ve Mitchell (1987) tarafından önerilen modelin [31] deformasyonları pek

değiştirmediği ancak yük taşıma kapasitesinde ciddi sapmalara neden olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda beton çekme modellerinin kirişlerin mesnetlenme koşullarına ve açıklık sayısına bağlı olarak farklı sonuçlar verebileceği d ş n lmekte ve gelecekte yapılacak olan çalışmalarda bu farklılığın incelenip olumlu ya da olumsuz yönlerinin tartışılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Jabbar S., Hejazi F., Mahmod H. M., Effect of an Opening on Reinforced Concrete Hollow Beam Web Under Torsional, Flexural, and Cyclic Loadings, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2016, **13**(8), 1576-1595.
- [2] Ahmed A., Fayyadh M. M., Naganathan S., Nasharuddin K., Reinforced Concrete Beams with Web Openings: A State of The Art Review, *Materials & Design*, 2012, **40**(September), 90-102.
- [3] Mansur M. A., Effect of Openings on The Behaviour and Strength of R/C Beams in Shear, *Cement and Concrete Composites*, 1998, **20**(6), 477-486.
- [4] Mansur M. A., Tan K. H., *Concrete Beams with Openings: Analysis and Design*, 1.First Edition, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA, 1999.
- [5] Nasser K. W., Acavalos A., Daniel H. R., Behaviour and Design of Large Openings in Reinforced Concrete Beams, *ACI Journal*, 1967, **64**(3), 25-33.
- [6] Mansur M. A., Tan K. H., Lee S. L., Collapse Loads of R/C Beams with Large Openings, *Journal of Structural Engineering*, 1984, **110**(11), 2602-2618.
- [7] Barney G. B., Corley W. G., Hanson J. M., Parmelee R. A., Behavior and Design of Prestressed Concrete Beams With Large Web Openings, *PCI Journal*, 1977, **22**(6), 32-61.
- [8] Mansur M. A., Tan K. H., Lee S. L., Design Method for Reinforced Concrete Beams with Large Openings, *ACI Journal*, 1985, **82**(4), 517-524.
- [9] Mansur M. A., Lee Y. F., Tan K. H., Lee S. L., Tests on RC Continuous Beams with Openings, *Journal of Structural Engineering*, 1991, **117**(6), 1593-1606.
- [10] Mansur M. A., Huang L. M., Tan K. H., Lee S. L., Deflections of Reinforced Concrete Beams with Web Openings, *ACI Structural Journal*, 1992, **89**(4), 391-397.
- [11] Tan K. H., Mansur M. A., Huang L. M., Reinforced Concrete T-Beams with Large Web Openings in Positive and Negative Moment Regions, *ACI Structural Journal*, 1996, **93**(3), 277-289.
- [12] Daniel J. J., Revathy J., Experimental Investigation on Flexural Strength of Beams with Opening, *International Journal of Research in Management & Technology*, 2014, **4**(2), 141-143.

- [13] Herrera L., Lemnitzer A., Cyclic Performance of RC Beams with Web Openings, *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, İstanbul, Turkey, 25-29 August 2014.
- [14] Mansur M. A., Tan K. H., Lee Y. F., Lee S. L., Piecewise Linear Behavior of RC Beams with Openings, *Journal of Structural Engineering*, 1991, **117**(6), 1607-1621.
- [15] Tan K. H., Mansur M. A., Design Procedure for Reinforced Concrete Beams with Large Web Openings, *ACI Structural Journal*, 1996, **93**(4), 404-410.
- [16] Elçi H., Büyük Boşluklu Betonarme Kirişlerin Statik-Betonarme Analizi, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 2005, **437**, 17-24.
- [17] Abdalla H., Kennedy J. B., Dynamic Analysis of Prestressed Concrete Beams with Openings, *Journal of Structural Engineering*, 1995, **121**(7), 1058-1068.
- [18] Ehmann S., Schnellenbach-Held M., Behaviour and Design of Reinforced Concrete Beams with Large Openings, *Proceedings of The Fourth International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, Cachan, France, 28 May- 1 June 2001.
- [19] Ramadan O. M., Abdelbaki S. M., Saleh A. M., Alkhatabi A. Y., Modeling of Reinforced Concrete Beams with and without Opening by Using Ansys, *Journal of Engineering Sciences*, 2009, **37**(4), 845-858.
- [20] Ramadan O. M., Metwally K. G., Shaban W. M., Proposed Recommendations for The Design of Reinforced Concrete Beams with Openings, *The 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics*, Incheon, Korea, 25-29 August 2015.
- [21] Arslan G., Mesh Size Effect on Load Carrying Capacity of the Reinforced Concrete Beams without Stirrups by Using Drucker-Prager and Cracking Concrete Fracture Criteria, *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2004, **22**(3), 34-42.
- [22] Rezaei R. S., Sonlu Elemanlar Yöntemi ile (SAP2000 Uygulamaları) 3D Kiriş Analizi, <https://rezashirzad.files.wordpress.com/2012/02/sonlu-elemanlar-yc3b6ntemi-ile-3d-fram-modellenmesi.pdf> (Ziyaret Tarihi: 19 Nisan 2017).
- [23] Noh H. C., Nonlinear Behavior and Ultimate Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Natural Draught Cooling Tower Shell, *Engineering Structures*, 2006, **28**(3), 399-410.
- [24] Schwetz P. F., Gastal F. P. S. L., Silva F. L. C. P., Numerical and Experimental Study of a Waffle Slab Designed to Serve As a Tennis Court Floor, *IBRACON Structures and Materials Journal*, 2013, **6**(3), 375-391.

- [25] Öksüz Ü. C., Simplified Modeling for Assessing Collapse Resistance of Steel Gravity Frames with Composite Floor Systems, Master of Science in Engineering, The University of Texas, Austin, 2014.
- [26] Bessa V., Schwetz P. F., Numerical Analysis of Waffle Slabs in Flexure Considering The Effects of Concrete Cracking, *IBRACON Structures and Materials Journal*, 2015, 8(2), 225-247.
- [27] DBYBHY 2007, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara, 2007.
- [28] Kharal Z., Tension Stiffening and Cracking Behaviour of GFRP Reinforced Concrete, Master's of Applied Science, University of Toronto, Department of Civil Engineering, Toronto, 2014.
- [29] Machinery P., How Crack Widths Affect Bond Behaviour, <http://www.piles-machinery.lv/en/anchoring-products/ischebeck-titan/for-designers>, (Ziyaret tarihi: 22 Mart 2017).
- [30] Vecchio F. J., Collins M. P., The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, *ACI Journal*, 1986, 83(2), 219-231.
- [31] Lee S. C., Cho J. Y., Vecchio F. J., Model for Post-yield Tension Stiffening and Rebar Rupture in Concrete Members, *Engineering Structures*, 2011, 33(5), 1723-1733.
- [32] Güler M. S., Şen S., Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler, *Ordu Üniv. Bil. Tek. Derg.*, 2015, 5(1), 56-66.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Erdoğan H., **Bostan S.**, Nonlinear Finite Element Modeling of RC Continuous Beams with Web Opening, *2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering*, Nevşehir, Turkey, 8-10 May 2017.

ÖZGEÇMİŞ

Seda Bostan 1993'te Sinop'ta doğdu. Lise öğrenimini Sinop Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2011 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2015 yılında mezun oldu. Aynı yıl içerisinde Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitime başladı. 18.08.2015-01.04.2016 tarihleri arasında Mimar Sinan Yapı Denetim Ltd.Şti'de çalıştı. 02.04.2016- 20.05.2016 tarihleri arasında Eksen Mühendislik'te çalıştı.