

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Düzenli Boşluklu Betonarme Kirişlerin Şehim Değerlerinin Elde Edilmesinde
Kullanılacak Etkili Eylemsizlik Momenti İfadelerinin Araştırılması

Ece CEYLAN

NİSAN 2018

İnşaat Anabilim Dalında Ece CEYLAN tarafından hazırlanan DÜZENLİ BOŞLUKLU BETONARME KİRİŞLERİN SEHİM DEĞERLERİNİN ELDE EDİLMESİNDE KULLANILACAK ETKİLİ EYLEMSİZLİK MOMENTİ İFADELERİNİN ARAŞTIRILMASI adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. İlker KALKAN

İnşaat Anabilim Dalı Başkanı

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

Doç. Dr. İlker KALKAN

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Mehmet BARAN _____

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

Üye :Yrd. Doç. Dr. Mahmut Cem YILMAZ _____

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

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

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



Sevgili Aileme

ÖZET

DÜZENLİ BOŞLUKLU BETONARME KİRİŞLERİN SEHİM DEĞERLERİNİN ELDE EDİLMESİNDE KULLANILACAK ETKİLİ EYLEMSİZLİK MOMENTİ İFADELERİNİN ARAŞTIRILMASI

CEYLAN, Ece

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. İlker KALKAN

Nisan 2018, 81 sayfa

Betonarme yapılarda kullanımı zorunlu olan mekanik, elektrik vb. tesisat boruları ve kanallarının kiriş gövdesinden geçirilmesi çoğu zaman karşılaşılan bir durumdur. Betonarme kirişlerin gövdesinde düzenli boşluklar bırakılması iletim kanallarının geçişini ve boşluklar nedeniyle meydana gelen gerilme birikmelerinin kirişin açıklığı boyunca dağılmasını sağlamaktadır. Kısa ve derin kirişler haricinde dolu gövdeli bütün eğilme elemanlarında eğilme kaynaklı deformasyonlar, kesme kaynaklı deformasyonlara göre önemli derecede büyük olduğu için, kesme deformasyonları genellikle göz ardı edilir. Ancak, boşluklu betonarme kirişlerde sadece eğilme etkisinden kaynaklanan sehım değerlerinin hesaba katılmasının yeterli olmadığı ve bu eğilme deformasyonlarına ek olarak boşluk çevresindeki kayma gerilmelerinin etkisiyle ortaya çıkan deformasyonların da önem kazandığı daha önceki çalışmalarda ortaya konulmuştur. Özellikle Vierendeel tipi panel davranışı gösteren gövde boşluklu kirişlerde ortaya çıkan deformasyonların sadece eğilme kaynaklı deformasyonların çok üstünde değerlere ulaştığı, geçmiş deneysel çalışmalarda belirlenmiştir. Bu çalışmanın amacı, düzenli boşluklu betonarme kirişlerin kullanım yükleri altındaki sehımlerinin belirlenmesi için gerekli analitik bağıntıların belirlenmesidir. Bu amaçla, geçmiş çalışmalarda önerilmiş olan ve eğilme ile kayma

deformasyonlarını hesaba katan analitik bağıntılar, farklı boşluk geometrilerine (dairesel, kare ve üçgen) göre yeniden düzenlenmiş ve deneysel çalışmalar ışığında farklı boşluk geometrilerini hesaba katan bir katsayı geçmiş bağıntılara dahil edilmiştir. Geçmiş deneysel verilerin analizi, özellikle kare boşluklu kirişlerin boşluk köşelerinde ortaya çıkan gerilme yığılmalarının etkisiyle, geçmiş analitik bağıntılarla elde edilen hesap değerlerinin deneysel değerlere göre kayda değer ölçüde küçük kalmasına sebep olduğunu göstermiştir. Bu nedenle kare boşluk geometrileri için tanımlanan sehım katsayısı, dairesel boşluklu kirişlere göre önemli derecede büyüktür.

Anahtar kelimeler: Boşluklu Betonarme Kiriş, Kullanım Yüğü Sehimi, Eğilme Deformasyonu, Çapraz Donatı, Vierendeel Panel Davranışı.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVE MOMENT OF INERTIA EXPRESSIONS USED FOR ESTIMATING THE DEFLECTION VALUES OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH MULTIPLE REGULAR TRANSVERSE OPENINGS

CEYLAN, Ece

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, Ph. D. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İlker KALKAN

April 2018, 81 pages

Mechanical, electrical and service pipes and ducts, whose use in reinforced concrete (RC) structures is compulsory, are generally passed through the webs of beams. The presence of multiple regular web openings in the beams provides the distribution of the stress concentrations, caused by the openings, along the beam span. In all solid flexural members, except the short and deep ones, the deformations associated with bending are significantly greater than the deformations associated with shear, and therefore, the shear deformations are usually ignored. However, the previous studies in the literature put forth that only accounting for the vertical deflections associated with flexure is not sufficient and the deformations, stemming from the shear stresses around the openings, in addition to the flexural deformations becomes more of a concern in RC beams with openings. In RC beams with web opening, exhibiting Vierendeel panel action in particular, the deflection values measured in experimental studies were found to be much greater than the deflection values associated with flexure. The aim of the present study is to develop analytical formulations for estimating the deflections of RC beams with openings under service loads. For this

purpose, the analytical equations proposed in the previous studies, which simultaneously account for the flexural and shear deformations in RC beams, were modified to account for the opening geometry (circular, square and triangular) and a multiplier regarding the effect of the opening geometry was incorporated into the formulae in the light of the previous experimental studies. Analysis on previous experimental data indicated that due to the effect of the stress concentrations, particularly in beams with square openings, the values calculated from the available analytical equations remain considerably below the experimental values. Consequently, the deflection multipliers for the beams with square opening geometries are selected much greater than the respective values for the beams with circular openings.

Key words: Reinforced Concrete Beam with Openings, Service-Load Deflection, Flexural Failure, Diagonal Reinforcement, Vierendeel Truss Behavior

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin tamamında bana yol gösteren, tezimin hazırlanması esnasında destek ve yardımını eksik etmeyen kıymetli danışman hocam Doç. Dr. İlker KALKAN'a, çalışmalarıyla ufkumu açan Sayın Doç. Dr. Sabahattin AYKAÇ'a teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bana destek olan, aynı sıraları paylaştığım değerli arkadaşım Arş. Gör. Saruhan KARTAL'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca her koşulda arkamda olup sevgi ve desteklerini esirgemeyen kıymetli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Kaynak Özetleri.....	4
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	17
2. MATERYAL VE YÖNTEM	19
2.1. İncelenen Deney Elemanları.....	19
2.2. Deney Düzeni.....	24
3. ANALİTİK ÇALIŞMA	25
3.1. Eğilme Etkisi Sonucu Oluşan Sehimler Hesabı.....	26
3.1.1. Eğilme Momenti Hesabı.....	27
3.2. Kesme Etkisi Sonucu Oluşan Sehimler Hesabı.....	32
4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR	36
4.1. Eylemsizlik Momenti Değerlerinin Elde Edilmesi.....	36
4.2. Deneysel ve Analitik Sehim Eğrilerinin Elde Edilmesi.....	39
4.2.1. Dairesel Boşluklu Deney Kirişlerinin Yük-Sehim Grafikleri.....	40
4.2.2. Kare Boşluklu Deney Kirişlerinin Yük-Sehim Grafikleri.....	44
4.2.3. Üçgen Boşluklu Deney Kirişlerinin Yük-Sehim Grafikleri.....	48
4.3. Düzeltme Katsayısı ‘ α ’ nın Hesaplanması.....	51
4.4. Analitik Sehim Eğrilerinin Yeniden Düzenlenmesi.....	56
4.4.1. Dairesel Boşluklu Deney Kirişlerinin Revize Yük-Sehim Grafikleri.....	57
4.4.2. Kare Boşluklu Deney Kirişlerinin Revize Yük-Sehim Grafikleri.....	60
4.5. Toplam Analitik Sehim Formüllerinin Elde Edilmesi.....	65

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	66
5.1. Sonuçlar	66
5.2. Öneriler	69
KAYNAKLAR	70
EKLER	73
EK 1 Deney Kirişlerinin Yük-Sehim Grafikleri.	73



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Boşluksuz Referans Kirişlerinin Boyut ve Donatı Detayları	22
2.2. Kare Boşluklu Kirişlerinin Boyut ve Donatı Detayları.....	22
2.3. Üçgen Kirişlerinin Boyut ve Donatı Detayları.....	23
2.4. Dairesel Boşluklu Kirişlerinin Boyut ve Donatı Detayları	23
2.5. Deney Düzeni ve Plastik Göçme Mekanizması Aykaç vd. [1].....	24
3.1. Todeschini vd. [18] Beton Gerilme-Birim Deformasyon Modeli.....	27
3.2. Kirişlerin Boyutları, Yükleme Durumu, Kiriş Modeli ve Diyagramları.....	31
3.3. Vierendeel Panel Göçme Mekanizması	32
3.4. Kirişin Yükleme ve Göçme Durumuna Göre Eğilme ve Kesme Sehim Diyagramları	35
4.1. Kirişin Çatlamamış Kesit Modeli	37
4.2. RCb Kirişi Yük-Sehim Grafiği	40
4.3. RCxb Kirişi Yük-Sehim Grafiği	40
4.4. RCcb Kirişi Yük-Sehim Grafiği	41
4.5. RCxcb Kirişi Yük-Sehim Grafiği.....	41
4.6. CLX Kirişi Yük-Sehim Grafiği.....	42
4.7. CMX Kirişi Yük-Sehim Grafiği	42
4.8. CHX Kirişi Yük-Sehim Grafiği	43
4.9. RRxn Kirişi Yük-Sehim Grafiği	44
4.10. RRxb Kirişi Yük-Sehim Grafiği	44
4.11. RRxcn Kirişi Yük-Sehim Grafiği	45
4.12. RRxcb Kirişi Yük-Sehim Grafiği	45
4.13. SL Kirişi Yük-Sehim Grafiği	46
4.14. SM Kirişi Yük-Sehim Grafiği.....	46
4.15. SH Kirişi Yük-Sehim Grafiği.....	47
4.16. TS Kirişi Yük-Sehim Grafiği.....	48
4.17. TN Kirişi Yük-Sehim Grafiği	48
4.18. TB Kirişi Yük-Sehim Grafiği.....	49
4.19. Kirişlerin Yükleme Durumu, Kesme ve Moment Diyagramları.....	52

4.20.	RCb Kirişli Revize Yük-Sehim Grafiği	57
4.21.	RCxb Kirişli Revize Yük-Sehim Grafiği	57
4.22.	RCcb Kirişli Revize Yük-Sehim Grafiği	58
4.23.	RCxcb Kirişli Revize Yük-Sehim Grafiği	58
4.24.	CLX Kirişli Revize Yük-Sehim Grafiği.....	59
4.25.	CMX Kirişli Revize Yük-Sehim Grafiği	59
4.26.	CHX Kirişli Revize Yük-Sehim Grafiği	60
4.27.	RRxn Kirişli Revize Yük-Sehim Grafiği	60
4.28.	RRxb Kirişli Revize Yük-Sehim Grafiği	61
4.29.	RRxcn Kirişli Revize Yük-Sehim Grafiği	61
4.30.	RRxcb Kirişli Revize Yük-Sehim Grafiği	62
4.31.	SL Kirişli Revize Yük-Sehim Grafiği.....	62
4.32.	SM Kirişli Revize Yük-Sehim Grafiği.....	63
4.33.	SH Kirişli Revize Yük-Sehim Grafiği	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

	<u>Sayfa</u>
2.1. Kirişlerin Özellikleri	21
4.1. Dairesel Boşluklu Kirişlerin Sehim ve ' α_c ' Katsayısı Değerleri	54
4.2. Kare Boşluklu Kirişlerin Sehim ve ' α_s ' Katsayısı Değerleri	54
4.3. Üçgen Boşluklu Kirişlerin Sehim ve ' α_T ' Katsayısı Değerleri	55



SİMGELER DİZİNİ

f_{ck}	Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_c	Betonun silindirik basınç dayanımı
δ_{an}	Analitik eğilme sehim
E_c	Betonun elastisite modülü
I_{ef}	Etkili eylemsizlik momenti
M_{cr}	Eğilmede deneysel çatlama momenti
M_a	P yüküne karşılık gelen eğilme momenti
P	Düşey yük
P_{sr}	Servis yükü (kullanım yükü)
b	Kiriş genişliği
h	Kiriş yüksekliği
I_c	Çatlamamış kesit eylemsizlik momenti
I_{cr}	Çatlamış kesit eylemsizlik momenti
C_{s3}	Dış donatı basınç kuvveti
C_{s4}	İç donatı basınç kuvveti
T_{s1}	Dış donatı çekme kuvveti
T_{s2}	İç donatı çekme kuvveti
C_c	Beton bloğun kuvveti
A_s	Çekme donatısı alanı
A_b	Basınç donatısı alanı
A_{s1}	Dış çekme donatısı alanı
A_{s2}	İç çekme donatısı alanı
A_{s3}	İç basınç donatısı alanı
A_{s4}	Dış basınç donatısı alanı
f_s	Çeliğin gerilmesi
ϵ_s	Çeliğin birim deformasyonu
ϵ_{cs}	Betonun servis yükü altındaki maksimum birim deformasyonu
ϵ_{cu}	Betonun kırılma anındaki birim deformasyonu
ϵ_y	Çeliğin akma birim deformasyonu

f_y	Donatı akma dayanımı
E_s	Donatı elastisite modülü
β_1	C_c 'nin hesaplanmasında bir değer
x	C_c 'nin hesaplanmasında bir değer
ϵ_c	Betonun basınç bölgesindeki birim deformasyonu
ϵ_o	Betonun maksimum gerilmedeki birim deformasyonu
f_c	Todeschini beton gerilme değeri
c	Tarafsız eksen derinliği
k_2	Beton bloğun moment kolunun hesaplanmasında kullanılan bir katsayı
d_1	T_{s1} kuvvetinin moment kolu
d_2	T_{s2} kuvvetinin moment kolu
d_3	C_{s3} kuvvetinin moment kolu
d_4	C_{s4} kuvvetinin moment kolu
$(EI)_{eq}$	Azaltılmış eğilme rijitliği
I_{eq}	Azaltılmış eylemsizlik momenti
δ_v	Analitik kesme sehimi
V	Boşluğa etki eden kesme kuvveti
l_e	Plastik mafsallar arası etkili uzaklık
l_o	Plastik mafsallar arası gerçek uzaklık
I_t	Üst kirişçiğin etkili eylemsizlik momenti
I_b	Alt kirişçiğin etkili eylemsizlik momenti
d_o	Boşluk derinliği
b_o	Boşluk genişliği
y_1	Çatlamamış dönüştürülmüş kesitin geometrik merkezinin en dış basınç lifine uzaklığı
d	Çekme donatısı etkili derinliği
d_b	Çekme donatısı etkili derinliği
n	Donatı elastisite modülünün beton elastisite modülüne oranı (modüler oran)

δ_t	Toplam sehim
δ_{exp}	Deneysel sehim
α_c	Dairesel boşluklu kirişlerin analitik sehim düzeltme katsayısı
α_s	Kare boşluklu kirişlerin analitik sehim düzeltme katsayısı
α_t	Üçgen boşluklu kirişlerin analitik sehim düzeltme katsayısı



1.GİRİŞ

Yapılarda kullanımı lüzumlu olan mekanik, elektrik, su tesisat borularının ve kanallarının kat kirişlerinin altından geçmesi, kat kullanılabilir yüksekliklerinde azalmaya, asma tavan imalatı gereksinimine ve kirişlerde kapasite azalması ile deformasyon artışlarına yol açmaktadır. Özellikle kat kullanılabilir yüksekliklerinin azalması, yapının toplam yüksekliğinin artmasına ve bunun sonucu olarak yapının kendi ağırlığında ve maliyetinde artışlara sebep olmaktadır. Tesisat kanalları ve borularının kiriş gövdesinde bırakılan boşluklardan geçirilmesi ise kullanılabilir kat yüksekliklerini arttırarak, asma tavan ihtiyacını ortadan kaldırmakta ve daha ekonomik ve işlevsel bir tasarıma imkân sağlamaktadır.

Proje aşamasında kirişler gövde boşluklu olarak tasarlanmamışsa, beton sertleştikten sonra boruların ve kanalların geçişi için boşlukların açılması, kiriş davranış ve dayanımı üzerinde kabul edilemeyecek derecede olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir. Sertleşmiş betonun delinmesi, delik çevresinde büyük gerilme yığılmaları ve çatlaklara yol açarak, kirişin dayanım ve rijitliğinde büyük azalmalara ve kullanım yükü deformasyonlarında önemli artışlara sebep olmaktadır. Ayrıca, kiriş donatıları boşluklar düşünülerek tasarlanmadığı için boşlukların açılması sırasında donatılara da zarar verilebilmektedir.

Gövde boşlukları, kirişlerin dayanım ve rijitliklerinde önemli kayıplara sebep olmakta ve kiriş rijitliklerinin azalmasıyla kullanım yükleri altındaki deformasyonlar artmaktadır. Betonarme kirişlerde kiriş açıklığı boyunca sadece bir veya iki gövde boşluğu bırakıldığı durumlarda, bu gövde boşluklarının mesnetlere yakın bölgelerde yer alması tercih edilmektedir. Ancak, kesme kuvvetlerinin büyük, eğilme momentlerinin ise küçük olduğu mesnet bölgelerinde bulunan bu boşluklar, nihai kırılmanın genellikle eğilme taşıma gücüne ulaşmadan çok önce kesme taşıma gücünün yitilmesi sonucu ortaya çıkan ve oldukça gevrek bir kırılma türü olan kesme kırılması şeklinde gerçekleşmesine neden olmaktadır. Boşluklu kirişlerin kesme davranışı yerine eğilme davranışına yönelmesi ve sünek davranış göstermesi için kiriş üzerindeki boşluk sayısının arttırılması ve açıklık boyunca çok sayıda

düzenli boşluk bulundurulması seçeneği ön plana çıkmaktadır. Kiriş açıklığı boyunca bırakılan düzenli gövde boşlukları, gerilmelerin birden çok boşluk üzerine dağıtılması ve gerilme birikmelerinin önüne geçilmesi gibi faydalar sağlayacaktır.

Yapılarda, elektrik, telefon-veri, havalandırma, ısıtma-soğutma, su, yangın, kanalizasyon vb. hizmetlerin temini için iletim kanalları ve borulara gereksinim olması, kat kirişlerinde birçok boşluk bırakılmasını gerektirmektedir. Bu gerekliliğin yanı sıra, kiriş açıklığı boyunca bırakılacak çok sayıda düzenli gövde boşluğu, kirişin daha estetik bir görünüme kavuşmasını da sağlamaktadır. Kat kullanılabilir yüksekliklerini arttırmaları ve estetik görünümleri gibi sebeplerle, çelik yapılarda kiriş uzunluğu boyunca düzenli birçok boşluğun yer aldığı petek kirişler yaygın olarak kullanılmaktadır. Betonarme ve öngerilmeli beton kirişlerde ise düzenli boşluk bırakılması henüz yaygınlık kazanmamış bir tasarım şekli olmakla birlikte son yıllarda rağbet görmeye başlamıştır.

Geçmişte boşluklu betonarme kirişler üzerine yapılmış olan diğer çalışmaların aksine Aykaç ve arkadaşları [1-4], betonarme kirişlerde açıklık boyunca düzenli gövde boşluğu bırakılması tasarım esası üzerinde durmuş ve bu konuda birçok deneysel ve analitik çalışma yapmıştır. Bu çalışmalarda, kesme kuvvetlerinin daha etkin olduğu mesnet bölgelerinde bırakılan boşlukların yanı sıra, eğilme momenti etkisinin daha çok önem kazandığı açıklık orta bölgesinde de yer alan boşluklar sayesinde, boşluk çevresi gerilme birikmelerinin önüne geçilmesi ve kiriş açıklığı boyunca daha dengeli bir gerilme dağılımına ulaşılması hedeflenmiştir. Bu dengeli gerilme dağılımıyla kirişin sünek davranması sağlanmış ve gevrek olan kesme kırılmasının önüne geçilmiştir. Farklı boşluk geometrileri (üçgen, dikdörtgen, dairesel) ve boşluk çevresi farklı donatı düzenleri (boşluk çevresindeki kirişçiklerde ve dikmelerde etriyeler, bir boşluğun alt köşesiyle diğer boşluğun üst köşesi doğrultusunda uzanan sürekli çapraz donatılar ve boşlukların hemen sağ ve solunda tam etriyeler) incelenerek, düzenli boşluklu betonarme kirişlerin gevrek olan Vierendeel panel davranışı yerine sünek olan eğilme davranışına yönelmeleri amaçlanmıştır. Kalkan [4], düzenli boşluklu betonarme kirişlerin servis yükü sehimlerinin tahmin edilmesinde kullanılacak formüller üzerinde durmuş ve boşluklu kirişlerdeki deformasyonları, eğilme kaynaklı deformasyonlar ve boşluk çevresindeki kayma

gerilmeleri ile bağlantılı deformasyonlar olmak üzere iki kısımda incelemiştir. Dündar [3] tarafından gerçekleştirilen dikdörtgen ve dairesel düzenli boşluklu betonarme kiriş deneylerinden elde edilen deneysel sehim verilerinin Kalkan [4] tarafından geliştirilen teorik formüllerden elde edilen analitik değerlerle karşılaştırılması sonucu, düzenli boşluklu betonarme kirişlerin kullanım yükü sehimlerinin analitik formüllerle kısmen tahmin edilebildiği, fakat analitik değerlerin deneysel değerlerin altında kaldığı belirlenmiştir. Boşluk çevresindeki kayma gerilmeleri ve gerilme birikmelerinin sebep olduğu çatlaklarla ilgili olarak ortaya çıkan deneysel ve analitik değerler arasındaki bu farkların, büyük oranda boşluk geometrisine de bağlı olduğu belirlenmiştir. Örneğin dairesel boşluklu kirişlerde analitik sehim değerleriyle deneysel sehim değerlerinin daha yakın olması, kare boşlukların aksine dairesel boşlukların sivri köşelere sahip olmaması ve gerilmelerin boşluk kenarı boyunca daha düzenli dağılmasıyla açıklanmıştır. Mevcut tez çalışmasının asıl amacı, farklı boşluk geometrisine sahip düzenli boşluklu betonarme kirişlerin kullanım yükü düzlem içi sehimlerinin hesaplanmasında kullanılacak formüller geliştirilmesidir. Bu bağlamda, farklı çalışmalarda test edilmiş kirişlerin sehim verileri, Kalkan [4] tarafından geliştirilmiş formüllerden elde edilecek analitik değerlerle karşılaştırılacak ve deneysel değerlerle analitik değerler arasındaki uyum araştırılacaktır. Farklı boşluk geometrisi ve boşluk çevresi donatı düzenlerine sahip kirişlerin deneysel sehim değerleri ile analitik sehim değerleri arasındaki oranların belirlenmesiyle, mevcut formüllerin daha gerçekçi tahminler üretmesini sağlayacak katsayılar önerilecektir.

1.1. Kaynak Özetleri

Günümüze kadar gövde boşluğuna sahip betonarme kirişlerin dayanım ve davranışları ile ilgili birçok deneysel ve analitik çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda boşluk geometrileri ve ebatları, boşlukların kirişteki konumları, boşluk sayıları, beton dayanımı ve boyuna donatı miktarı değişken olarak kullanılarak incelemelerde bulunulmuştur. Gövde boşluğu bulunduran betonarme kirişlerle ilgili yapılan çalışmaların bir kısmından aşağıda bahsedilmiştir:

Mansur vd. (1991), gövdesinde dikdörtgen enine boşluk içeren 8 adet betonarme sürekli kirişi test etmiştir. Kirişler, dikdörtgen kesitlidir ve tüm kirişlerin içerdikleri boyuna donatı miktarı ve düzeni aynıdır. Gövde boşluğunun boyutu, boşluğun kiriş gövdesindeki konumu ve kirişin açıklık sayısı, çalışmanın temel değişkenleri olarak seçilmiştir. Boşluk ebatlarının artışının kiriş mukavemeti ve rijitliğinde düşüşe neden olduğu, boşluğun açıklığın yüksek momente maruz kalan bölgelerinde bulunmasının da kirişte erken göçme, erken donatı akması ve büyük deplasmanlar ortaya çıkmasına neden olduğu görülmüştür. Boşluğun konumu, göçme modunu etkilememekle birlikte göçme anındaki yük değerini etkilemiştir. Genel olarak, açıklığın yüksek moment bölgesinde yer alan boşluklar nedeniyle daha küçük yüklerde göçme meydana gelmektedir. Bu araştırma çerçevesinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

1. Sürekli kirişte boşlukların iki ucu plastik mafsallı oluşumu için en zayıf yerlerdir.
2. Gövde boşluğunun ya boyundaki ya da derinliğindeki artış, erken çatlamaya, daha büyük deformasyonlara ve bariz Vierendeel deformasyonlarına neden olmaktadır. Boşluk boyutundaki artış göçme modunu etkilememekle birlikte göçme anındaki yük değerini düşürmektedir.
3. Boşluğun açıklıktaki yerinin, çatlama yüküne etkisi çok az olmaktadır. Fakat boşluk, moment değerinin büyük olduğu bölgede konumlandığında kirişte daha büyük deplasmanlara ve daha küçük yük değerlerinde göçmeye neden olmaktadır.

Vierendeel etkisine bağlı olarak oluşan göçme ve deformasyon modu gövde boşluğunun bulunduğu konumdan neredeyse hiç etkilenmemektedir. [5]

Tan vd. (1996), her biri ya negatif moment ya da pozitif moment etkisinde, büyük gövde boşlukları bulunan 15 adet ‘T’ kesitli betonarme sürekli kirişi test etmiştir. Deneyle, daha önce de belirlendiği üzere gövde boşluklarının varlığının basit mesnetli kirişlerde çatlama sonrası rijitliğin yanı sıra çatlama ve göçme dayanımında da azalmalara neden olduğunu göstermiştir. Test sonuçları, kirişin gövde boşluğu kısmında Vierendeel panel davranışının oluştuğunu doğrulamıştır. Aynı ebatlarda birden fazla boşluğa sahip kirişler, dayanım ve kullanılabilirlik açısından tek boşluğa sahip kirişlere göre daha iyi performans göstermektedir. Uygulanan kesmenin kirişçiklerin eğilme rijitliğine göre kirişçikler arasında paylaşımının gerçekçi olduğu bulunmuştur. Araştırma çerçevesinde şu sonuçlar çıkarılmıştır:

1. Genel olarak, sürekli kirişlerde gövde boşluklarının varlığı çatlama ve göçme dayanımının yanı sıra çatlama sonrası rijitliği de azaltmaktadır.
2. Birden fazla boşluklu bir kiriş dayanım ve kullanılabilirlik performansı bakımından tek boşluklu kirişe tercih edilir. Erken göçmeden kaçınmak için, kirişin ardışık boşlukları arasındaki dikmelerin kalınlığı toplam kiriş derinliğinin yarısından az olmamalı ve bu dikmeler yeterli miktarda donatıya sahip olmalıdır.
3. Geniş dikdörtgen boşluk içeren sürekli T kirişin boşluk kısmında Vierendeel panel benzeri davranış gösterdiği doğrulanmıştır. Eğilme ve kesme etkisi altında kirişçikler bunların yaklaşık açıklık ortasında bulunan dönüm noktalarında çift eğrilikli eğilme gösterir.
4. Kirişe uygulanan toplam kesme kuvveti, boşluk üstü ve altında bulunan kirişçiklere bunların eğilme rijitliğiyle orantılı olarak paylaştırılabilir. Sürekli kirişlerde bu dağıtım hem servis yükü hem de nihai yükler altında boşluk konumunun negatif veya pozitif moment bölgelerinde yer aldığına bakılmaksızın uygulanabilir. [6]

Ashour ve Rishi (2000), gövde boşluğu bulunduran iki açıklıklı 16 adet derin sürekli betonarme kirişi test etmiştir. Tüm test numuneleri aynı geometriye ve aynı alt ve üst boyuna donatı düzenine sahiptir. Ana parametreler, boşluk boyutu, boşluğun konumu ve boşluk çevresindeki donatı düzeni olarak belirlenmiştir. Testlerden elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Boşluk boyutuna, boşluk çevresinde yer alan donatı miktarı ve donatı özelliğine bakılmaksızın, boşluğun konumuna bağlı olarak iki göçme modu gözlenmiştir. Bu iki farklı göçme modu, gövde boşluklarının kesme açıklığı içinde veya dışında yer almasından kaynaklanmıştır. İki göçme modunda da kirişlerde çapraz çatlaklar meydana gelmiştir. Dış kesme açıklığında boşluk bulunduran kirişlerde çapraz çatlaklar, boşluk köşesi ile son mesnet ve boşluk köşesi ile yük plakası arasında ilerlemiştir. Diğer ana çapraz çatlak ise yük plakası ile mesnet merkezi arasında uzanmıştır. İç kesme açıklığında boşluk bulunduran kirişlerde çapraz çatlaklar ise boşluk köşesi ile merkez mesnet ve boşluk köşesi ile yük plakası arasında ilerlemiştir.
 2. Gövde boşluğunun iç kesme açıklığında bulunması dış kesme açıklığında bulunmasına göre kiriş taşıma kapasitesini daha fazla azaltmaktadır.
 3. Boşluk çevresindeki donatıların düzeni ve boşluk ebatları, göçme modunu çok etkilememekte olup, bu değişkenlerin göçme yüklerini üzerindeki etkisi daha kayda değer düzeydedir.
 4. Boşluk çevresindeki düşey donatılar, yatay donatılara göre kirişin kesme kapasitesine daha önemli bir katkıya sahiptir.
 5. Mesnet reaksiyonları boşluğun boyutundan ve konumundan etkilenmiştir.
 6. Dış kesme açıklığı bölgesinde küçük gövde boşluğu bulunan derin sürekli kirişler, bu kirişlerin eşdeğeri olan boşluksuz referans kirişlerine en yakın davranışı göstermiştir.
- [7]

Tan vd. (2001), yaptıkları çalışmada üzerine gelen fazla kesme kuvvetini azaltabilecek şekilde tasarlanmış, dairesel boşluk bulunduran 7 adet T kesitli kiriş test etmiştir. Deney numuneleri, sürekli kirişin negatif moment bölgesinde meydana gelen yükleme durumuna benzer bir durum elde etmek amacıyla ters çevrilerek teste tabi tutulmuştur. Test sonuçları, boşluk çevresinde donatı kullanılması koşuluyla kirişte oluşan çatlakların ve nihai dayanımın korunabileceğini göstermiştir. Gövde boşlukları etrafında kullanılan çapraz donatıların kirişçiklerin kesme kuvvetine karşı yeterli direnç göstermesi durumunda, boşlukların üst ve altında küçük etriye kullanımının gerekli olmadığı görülmüştür. Küçük dairesel boşluklar bulunduran, kesme ve eğilme etkisi altında bulunan betonarme kirişler üzerinde yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

1. Dairesel boşluk bulunduran kirişlerin tasarımı, ACI 318 yönetmeliği [8] yaklaşımına göre yapılabilir. Bu yöntem, gövde boşluğu nedeniyle betonun kesme mukavemetine olan katkısındaki azalmayı içerir, kiriş tipi ve çerçeve tipi olmak üzere iki farklı kesme göçme modunu dikkate alır. Kiriş tipi göçme modunda çapraz çatlakların kiriş boyunca ilerleyip göçmeye neden olduğu, çerçeve tipi göçme modunda ise gövde boşluklarının alt ve üstünde yer alan kirişçiklerin her birinde bağımsız oluşan çapraz çatlakların kırılmasıyla göçmenin olduğu değerlendirilmiştir.
2. Çapraz donatılar, çatlak genişliğinin kabul edilebilir bir seviyede tutulması için elzemdir. Bu çapraz donatıların miktarı boşluklu betonarme kirişlere uygulanan kesmenin en az %50'sini taşıyabilecek yeterlilikte olmalıdır.
3. Deney sonuçları, kullanılan çapraz donatıların yalnızca kesme çatlaklarını sınırlamadığını aynı zamanda kesme donatısı olarak işlev gördüğünü göstermiştir.
4. Yeterli miktarda çapraz donatı bulundurulduğunda kirişe uygulanan kesme kuvveti, kirişçikler arasında, bunların kesit alanları ile orantılı olarak dağıtılabilir.
5. Dolu gövdeli kirişler için maksimum kesme kuvvetini sınırlayan ACI 318 yönetmeliği [8] yöntemi, aynı zamanda küçük boşluklar bulunduran kirişler için de kullanılabilir. [9]

Yang vd. (2006), gövde boşlukları bulunan beton dayanımı 24 MPa, 50 MPa ve 80 MPa olan üç farklı betonarme derin kiriş grubunda, gövde boşluklarının kiriş davranışına etkisi ile ilgili deneysel ve analitik çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada 160 x 600 mm kesitli ve 2400 mm boyunda olan değişken boyutlu dikdörtgen boşluklara sahip veya boşluk bulundurmeyen toplam 32 adet kiriş kullanılmıştır. Beton dayanımı, kesme açıklığının kiriş derinliğine oranı, boşluğun genişliği ve boşluğun derinliği deneylerde temel değişkenler olarak alınmıştır. Açıklık uzunluğu 2100 mm olan kirişlerde gövde boşlukları, kirişlerin kesme açıklığı bölgesinin merkezine yerleştirilmiştir. Kirişler basit mesnetli olacak şekilde 2 noktalı yükleme altında test edilmiştir. Çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Deneysel kirişlerin açıklık ortasındaki düşey yer değiştirme değerlerinin ilk yükleme anında boşluk derinliği ve genişliğinden etkilenmediği ancak diyagonal çatlaklar meydana geldikten sonra söz konusu deplasman değerlerinin boşluk derinliği ve genişliğinden belirgin şekilde etkilendiği görülmüştür. Beton dayanımının boşluklu kirişlerin rijitliğini fazlaca etkilemediği tespit edilmiştir.
2. Beton dayanımının, boşluk boyutlarının ve kesme açıklığının kiriş derinliğine oranının artması ile birlikte en büyük çatlak genişliğini gösteren eğik düzlemin eğiminin azaldığı görülmüştür.
3. Derin kirişlerde beton dayanımının nihai kesme mukavemeti üzerindeki etkisi, boşluksuz kirişlerden ziyade boşluklu kirişlerde belirgin olarak azalmıştır.
4. Eğik çatlakların ilk ortaya çıkışından sonra, kesme açıklığının kiriş derinliğine oranının artmasıyla kiriş rijitliği de kademeli olarak düşmüş, açıklığın ortasındaki deplasman artmıştır.
5. Beton dayanımı kirişlerin rijitliğini etkilemekte ve bu dayanımın rijitlik üzerindeki etkisi kesme açıklığı-kiriş derinlik oranı düştükçe artmaktadır. Ancak boşluğun varlığıyla azalan rijitlik yüzünden boşluklu kirişin rijitliği beton dayanımından çok az etkilenmektedir.

6. Rijitliğin azalmasının eğik çatlaklarla yakından ilişkili olduğu gözlenmiştir. [10]

Yang ve Ashour (2007), 2 adet boşluk bulunduran 10 tane derin, sürekli, betonarme kirişi teste tabi tutmuşlardır. İncelenen temel değişkenler; kesme açıklığı-toplam kiriş derinliği oranı, boşlukların konumu ve ebatlarıdır. Çalışmada düzenli boşluklu betonarme kirişlerde iki adet göçme modu belirlenmiştir. Bunlardan ilki, iç kesme açıklığında boşluk bulunduran veya küçük boşluklu yani boşluk oranı 0.025-0.037 civarında olan kirişlerde gerçekleşen göçme tipi, ikincisi ise boşluk oranı 0.037 değerinin üzerinde olan kirişlerde gerçekleşen göçme tipidir. Bu iki göçme modunun da kesme açıklığı-toplam kiriş yüksekliği oranı göz önüne alınmadan boşluk yeri ve ebatından etkilendiği gözlenmiştir. Dış kesme açıklığı içindeki boşluk alanı oranı 0.025 olan kirişin normal yük kapasitesinin, bunlara eşdeğer boşluksuz kirişlerin yük kapasitelerine yakın olduğu belirlenmiştir. Boşlukları olan derin ve sürekli kirişlerde, iç kesme açıklığındaki boşluk ebatının artmasıyla birlikte boşluklu, derin ve basit mesnetli kirişlere benzer şekilde yük kapasitesinde hızlı bir düşüş göstermiştir. Bu çalışmalar ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Kesme açıklığı-toplam kiriş derinliği oranına bakılmaksızın iki göçme modunun boşluk yeri ve ebatından etkilendiği gözlenmiştir. Dış kesme açıklığı içinde boşluk bulunduran kirişlerde göçme modunun geçişi, boşluk alanının kesme açıklığı alanı oranına bağlıdır.
2. İç kesme açıklığı içinde boşluk bulunduran kirişlerdeki çapraz çatlakların genişliklerinin dış kesme açıklığında boşluk bulunduranlardaki çatlak genişliklerinden büyük olduğu görülmüştür.
3. Dış kesme açıklığı içinde boşluk alanı oranı 0.025 olan kirişler için normal yük ve kesme kapasitesi değerlerinin, bunlara eşdeğer yalın kirişlere yakın olduğu görülmüştür.
4. İç kesme açıklığında boşluk bulunduran derin sürekli ve derin basit kirişlerin tümünde artan boşluk oranına karşın normal yük kapasitesinin azaldığı görülmüştür.

5. Dış kesme açıklığında boşluk bulunan kirişlerin normal yük kapasitesi; iç kesme açıklığında boşluk bulunan hem sürekli hem de basit kirişlerin normal yük kapasitesinden daha yüksektir.
6. Sürekli boşluklu, derin kirişlerin kesme kapasitesi aynı boşluk ebatına sahip basit derin kirişlerden biraz daha yüksektir. [11]

Dündar (2008), yüksek lisans tez çalışması kapsamında, 4 adet kare, 4 adet dairesel boşluklu kiriş ve 2 adet boşluksuz (referans) kirişi test etmiştir. Deney parametreleri, boyuna donatı oranı, boşluk geometrisi, çapraz donatı kullanımı ve dikmelerde etriye kullanımı olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları, değişen parametrelerin dayanıma, sünekliğe, kesme davranışına ve rijitliğe etkileri açısından değerlendirilmiştir. Deneysel çalışma sonunda elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Boşluklu kirişlerin neredeyse tamamında referans kiriş dayanımına ulaşılmış olup bazı numunelerde hedeflenen dayanımlar az da olsa aşılmıştır.
2. Neredeyse tüm elemanlar oldukça sünek davranmış, bazı elemanlarda referans kirişinin süneklik değerlerinin 1,5-2 katına ulaşılmıştır. Kare boşluklu, çok donatılı olan kirişlerin dikmelerinde oluşan hasarlar olası gevrek kırılmaları önlemiştir. Ancak bu hasarlar sebebiyle dayanımda yaklaşık %10'luk kayıplar olabileceği düşünülmüştür.
3. Kiriş gövdesindeki tek bir boşlukta gerilme yığılmalarının oluşumunu engellemek amacıyla kiriş üzerinde birçok düzenli boşluk oluşturulması sayesinde kırılma açıklığının büyük bölümüne yayılmış eğilme kırılması şeklinde gerçekleşmiştir. Bazı elemanlar ise eğilme dayanımına ulaştıktan ve yeterince süneklik gösterdikten çok sonra kesme kırılması ile göçmüştür.
4. Dairesel boşluklu elemanların, kare boşluklu elemanlara göre daha yüksek dayanım, süneklik ve rijitlik değerlerine ulaştığı görülmüştür.

5. Kare boşluklu elemanların dikmelerinde etriye kullanılmaması durumunda, dikmelerde büyük kesme çatlakları oluştuğu görülmüştür. Oluşan bu çatlakların istenmeyen gevrek kırılmalara neden olduğu görülmüştür. Çok donatılı kirişlerde süneklikten ödün verilmesi gerekeceğinden bu durumlarda kare boşluklu kirişler yerine dairesel boşluklu kirişlerin yapılması önerilmiştir.
6. Dairesel boşluklu elemanların dikmelerinde, kare boşluklu kirişlerdeki gibi ağır düzeyde hasar oluşmamıştır. Dairesel boşlukların dikmelerinde etriye kullanımı süneklik üzerinde olumsuz bir etki oluşturmamıştır.
7. Kirişlerde çapraz donatı kullanımının süneklik, rijitlik ve dayanım üzerinde olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür. İleri deformasyon aşamalarında çapraz donatıların gerildiği ve başlıklar arasındaki yük aktarımını başarıyla sağladığı görülmüştür. [3]

Eğriboz (2008), yüksek lisans tez çalışması kapsamında, boşluk geometrisi, çapraz donatının malzeme cinsi ve düzenlemesi ile boyuna donatı oranını deney değişkenleri olarak dikkate almıştır. Aynı boyutlara sahip 3 adet referans deney elemanı ile 3'er adet dairesel veya kare boşluklara sahip özdeş elemanlardan oluşan toplam 9 adet deney elemanı tek düze yükler altında test edilmiştir. Deney sonuçları, dayanım, süneklik ve eğilme rijitliği bakımından değerlendirildiğinde genel olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Kiriş gövdesindeki boşlukların, düzenli ve eşit boyutlu olması ile maksimum moment, kirişin kesme açıklığının ortasında, maksimum kesme kuvveti ise mesnet bölgesinde oluşmuştur. Gerilme yığılmalarının bütün kirişe yayıldığı görülmüştür.
2. Az veya normal donatı oranına sahip, çapraz donatılı, dairesel boşluklu kirişlerin, aynı donatı özelliklerine sahip kare boşluklu kirişlere kıyasla referans kirişlere daha yakın davranış gösterdiği gözlenmiştir.
3. Boşluklu kirişlerde donatı oranının artmasıyla süneklik, dayanım ve rijitlik değerlerinin azaldığı gözlenmiştir.

4. Boşluk çevresinde, çelik kablo kullanımının çapraz donatı kullanımına göre daha iyi sonuçlar verdiği, çelik kablo kullanımının taşıma kapasitesi ve sünekliği arttırdığı görülmüştür.
5. Az ve normal donatılı dairesel boşluklu kirişler, referans (boşluksuz) kirişlere veya kare boşluklu kirişlere göre daha sünek bir davranış göstermiştir. Fazla donatı oranındaki boşluklu kirişlerde ise süneklik, dayanım ve eğilme rijitliği değerlerinin referans kirişlere göre azaldığı görülmüştür. [12]

Aykaç ve Yılmaz (2011), bünyesinde dairesel veya üçgen şeklinde düzenli boşluklar bulunduran altı adet kiriş ile üç adet boşluksuz kirişi test etmiştir. Boşluk geometrisi ve donatı oranı deney değişkenleri olarak seçilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

1. Gerilme yığılmalarının tek bir boşlukta yoğunlaşmasını önlemek ve bu yığılmaların yayılmasını sağlamak amacıyla çok sayıda düzenli boşluk oluşturulmuştur. Bu uygulama, yalnızca yüksek donatı oranlı kirişlerde başarısız olmuştur. Taşıma gücünü tüm kirişlerde eğilme kapasitesi belirlemiştir.
2. Düşük donatı oranına sahip, dairesel ve üçgen boşluklu kirişler referans kirişin davranışına yakın, oldukça sünek davranış göstermiştir. Çalışmada, bu sünek davranış ile birlikte düşük donatı oranına sahip boşluklu kirişlerin kullanımı güvenli olarak nitelenmiştir. Analiz sonucunda bulunan eğilme taşıma gücünün bir miktar azaltılması ile kayma deformasyonlarının ihmal edilebileceği yani boşluksuz kesit hesabı yapılabileceği düşünülmüştür. Öngörülen azaltma miktarı dairesel boşluklu kirişlerde %10, üçgen boşluklu kirişlerde %20'dir.
3. Normal donatı oranına sahip dairesel boşluklu kirişler oldukça sünek, üçgen boşluklu kirişler ise yeterli ölçüde sünek davranış göstermiştir. Bununla birlikte düşük donatı oranlı kirişlerde iki boşluk türü içinde önerilen dayanım azaltma katsayılarının orta donatılı kirişlerde de kullanılabileceği görülmüştür.

4. Farklı donatı düzenleme teknikleri kullanılarak yüksek donatı oranlı kirişlerde de düşük ve orta donatı oranlı kirişlerde olduğu gibi yeterli bir başarı elde edileceği düşünülmüştür.
5. Boşluklar nedeniyle kirişlerin eğilme rijitliklerinde %10 ile %30 arasında bir azalma gözlenmiştir. Bu nedenle sehim hesaplarında eğilme rijitliklerindeki bu azalma miktarlarına dikkat edilmelidir.
6. Yapım kolaylığı, daha iyi dayanım ve davranış göstermiş olması nedeniyle dairesel boşluklu kirişlerin kullanımının daha uygun olabileceği tavsiye edilmiştir. [2]

Amiri ve Masoudnia (2011), 150x250 mm kesitli, 2 m açıklığa sahip ve açıklık boyunca 7 farklı çapta (150, 130, 120, 110, 100, 80, 60 mm) dairesel ve 150 mm çapında dairesel boşluğa eş değer boşluk alanlı kenar uzunluğu 133 mm boyutunda kare boşluklu kirişleri test etmiştir. Kirişlerin gövdesinde iki adet boşluk bulunmakta olup bu kirişleri sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz etmiştir. Bu araştırma özellikle boşluksuz kirişin yük sehim eğrilerinin davranışı ile dairesel ve kare boşluklu kirişlerin nihai yük kapasitesine olan etkisini içermektedir. Bunun yanı sıra dairesel boşlukla eş alanlı kare boşluğun kirişe etkileri diğer kirişlerle karşılaştırılmıştır. Deneylemlerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

1. Dairesel boşluk çapının kiriş derinliğinin %48'inden küçük olduğu durumlarda kirişin her kesme açıklığında bir boşluk bırakılması kirişin taşıma gücünü önemli ölçüde etkilememiş neredeyse boşluksuz kiriş davranışına ulaşılmıştır. Bu kirişlerin açıklık ortasında göçme modu eğilmedir.
2. Kiriş derinliğinin %48 inden büyük çapta dairesel boşluğa sahip kirişlerin taşıma kapasitesinin en az %26 azaldığı görülmüştür. Bu kirişlerde kesme göçmesi düşük yük seviyelerinde gerçekleşmiştir.
3. Dairesel boşluklu kiriş, eşdeğer alana sahip kare boşluklu kirişten, % 9 daha yüksek bir taşıma gücüne ulaşmıştır. [13]

Aykaç vd. (2013), toplamda 9 adet dikdörtgen kesitli, kiriş uzunluğu boyunca sürekli boşlukları olan kirişi test etmiştir. Boşluk çevresindeki çapraz donatılar, eğilme momenti-eksenel kuvvet şemalarına göre beklenen göçme modu olan Vierendeel etkisine bağlı olarak numunelerin beklenenden önce göçmesini etkin bir şekilde engellemiştir. Boyuna donatılar, boşluk çevresinde olan tam etriyeler ve kirişçiklerdeki kısa etriyeler, kiriş tipi ve çerçeve tipi kesme göçmesini engellemiştir. Plastik göçme bölgesinin uzunluğu, tek boşluklu kirişlere kıyasla çok sayıda boşluğu kapsayacak şekilde artmıştır.

Numuneler düşük, orta ve yüksek donatı oranlı olmak üzere üç farklı gruptan oluşmaktadır. Her bir grupta boşluksuz referans kirişler, kare boşluklu ve dairesel boşluklu kirişler mevcuttur. Her kiriş 12 eşit aralıklı (düzenli) boşluk, farklı miktarlarda boyuna donatı, kiriş tipi kesme göçmesini önlemek için boşlukların kenarlarında kiriş derinliği boyunca uzanan tam etriyeler ve çerçeve tipi kesme göçmesini önlemek için alt ve üst kirişçiklerde kısa etriyeler içermektedir. İlave olarak, dairesel boşluklu kirişler donatı çeliği şeklinde veya kiriş derinliği boyunca uzanan parçalı veya sürekli kablolar formunda çapraz donatı içermektedir. Kirişler, uçlarından basit mesnetli olup altı noktali eğilmeye tabi tutulmuştur. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

1. Boşluk köşeleri arasında dikmeler boyunca uzanan çapraz donatıların, kayma göçmesini ve kirişin Vierendeel panel davranışından kaynaklanan erken göçmesini önlemek için etkili bir yöntem olduğu bulunmuştur. Dairesel boşluklu kirişler ve boşlukları çevreleyen çapraz donatılar, eğilme donatı oranına bakılmaksızın kirişin nihai eğilme kapasitesine ulaşmasını sağlamıştır.
2. Boyuna donatılar, boşluklara bitişik tam etriyeler ve kirişçiklerdeki kısa etriyeler, boşluklu kirişlerin kesme göçmesinin önlenmesinde etkili olmuştur.
3. Birden fazla boşluklu betonarme kirişlerin plastik göçme şekilleri tek boşluklu kirişlerden farklıdır. Teste tabi tutulan yüksek ve orta donatı oranlı, kare boşluklu iki kirişte mafsalların ikisi son mesnetin yakınındaki boşluğun alt ve üst kirişçiklerinde oluşmuş, geri kalan iki mafsal üçüncü boşluğun kirişçik uçlarında ortaya çıkmıştır.

Sonuç olarak Vierendeel etkisinin eğilme direncine katkı sağlayan gerilmeleri, kirişlerin daha büyük bir bölgesine dağılmıştır.

4. Çapraz donatı bulunmayan kirişlerde alt ve üst kirişçiklerin, uygulanan yük arttıkça iki ayrı kiriş olarak davranmaya yatkın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum yük kapasitelerinde düşüşe neden olmuştur. Şayet boşlukların etrafında çapraz donatı kullanılırsa, eşdeğer beton bloğu üst kirişçik içinde kaldığı sürece boşluklu bir kirişin tahmini eğilme kapasitesine ulaştığı veya bunu aştığı belirlenmiştir.
5. Çapraz donatı kullanımının boşluğu olan bir kirişin sünekliğine ve enerji sönümleme kapasitesine önemli derecede katkı sağladığı görülmüştür. Ayrıca kirişteki çekme donatısı artışı boşluk etkisini artıracığından, bu artışın rijitlikte düşüşe neden olduğu görülmüştür.
6. Kirişçiklerde mafsal oluşumu ve kirişçiklerin ayrı ayrı davranmasını engellemede çapraz donatıların etkin olduğu belirlenmiştir. [1]

Kalkan (2014), çalışmasında düzenli boşluklara sahip betonarme kirişlerin düzlem içi eğilme davranışları ile servis yükleri altındaki sehimlerini incelemiştir. Literatürde mevcut olan eğilme ve boşluk çevresindeki kayma etkilerini hesaba katan denklemlerden elde edilen analitik değerlerle Dündar [1] tarafından test edilen ikisi boşluksuz ve sekizi düzenli boşluklu olmak üzere toplam 10 adet betonarme kirişin deneysel sehim değerleri ve yük-sehim eğrileri karşılaştırmıştır. Deney kirişlerinde ve yapılan bu analiz çalışmasında boşluk geometrisi (dairesel veya kare) ve boyuna donatı oranı temel değişkenler olarak alınmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenmiştir:

1. Eğilme taşıma gücüne ulaşılması ile göçme gerçekleşen boşluklu betonarme kirişlerde yük-sehim eğrilerinin başlangıç bölümü, sadece eğilme etkisi altında hesaplanmış analitik eğrilerle uyum içinde olmakta ve düşük yük seviyelerinde Vierendeel kayma davranışının etkili olmadığı görülmektedir.
2. Vierendeel panel davranışı ile göçme gerçekleşen boşluklu betonarme kirişlerin yük-sehim eğrilerinin başlangıç bölümü, eğilme etkisi altında hesaplanmış sehimlere

kayma deformasyonları sonucu ortaya çıkan sehımlerin eklenmesiyle hesaplanan analitik eğrilerle uyum içindedir. Bu nedenle, Vierendeel panel davranışı gösteren kirişlerde boşluk çevresi kayma deformasyonlarının etkisi tüm yükleme durumlarında ihmal edilemeyecek seviyededir.

3. Boşluklu kirişlerin servis yükleri seviyesine ulaşıldığında boşluk çevresindeki kayma deformasyonlarının etkisi önemli düzeyde olmaktadır. Bu nedenle, göçme moduna bağlı olmaksızın tüm boşluklu kirişlerin servis yüklerine karşılık gelen sehım değerleri, kayma ve eğilme sehımlerinin toplanmasıyla elde edilmelidir.

4. Vierendeel panel davranışı ile göçme gerçekleşen boşluklu betonarme kirişlerin deneysel sehım değerlerinin, kayma ve eğilme sehımlerinin toplanmasıyla bulunan analitik sehım değerlerinden daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Bu nedenle Vierendeel nihai göçme davranışı göstermesi beklenen kirişlerin, kayma ve eğilme sehımleri toplamının %30 düzeyinde arttırılarak kullanım yükü sehımleri hesaplanması önerilmektedir. [4]

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez kapsamında, düzenli gövde boşluklarına sahip betonarme kirişlerin kullanım yükleri altında yapacakları düşey sehimlerin tahmin edilebilmesinde kullanılacak formüllerin elde edilmesi hedeflenmektedir. Mevcut betonarme yapı yönetmelik ve standartlarında boşluklu kirişlerin kullanılabilirlik sınır durumlarını belirleyen formüller bulunmadığı için, bu çalışmada geliştirilen sehim formülünün çok önemli bir eksiği gidermesi hedeflenmektedir.

TS 500 yönetmeliğinde [14] ve farklı ülkelerde kullanılan betonarme yapıların tasarım esaslarını belirleyen yönetmelik ve standartlarda betonarme kirişlerin sehimlerinin hesaplanmasında kullanılacak çeşitli formüller sunulmaktadır. Fakat bu formüllerden hiçbiri boşluklu kirişlerin sehim değerlerinin hesaplanması için uygun değildir. Betonarme kirişlerde bırakılan gövde boşlukları, boşluksuz kirişlerde ortaya çıkan eğilme kaynaklı sehimlere ek olarak boşluk çevresindeki kayma gerilmeleri kaynaklı ilave sehimlerin önem kazanmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla sadece eğilme kaynaklı sehimleri hesaba katan mevcut sehim formülleri, boşluklu betonarme kirişlerde geçerliliğini yitirmektedir. Ayrıca, mevcut sehim ifadeleri boşluk etkisiyle eğilme rijitliğinde ortaya çıkan azalmaları da hesaba katmamaktadır. Bu bilgilerin ışığı altında, bu çalışmada geliştirilmesi hedeflenen sehim formülünün boşluklu betonarme kirişlerdeki boşluk etkisiyle ortaya çıkan ilave kayma sehimlerini hesaba katarken, aynı zamanda boşluk etkisiyle eğilme sehimlerinde ortaya çıkan artışları da göz önüne alması beklenmektedir.

Daha önce Kalkan [4] tarafından yapılan analitik çalışmada, düzenli boşluklu betonarme kirişlerde ortaya çıkan eğilme ve Vierendeel panel tipi kayma gerilmelerinin etkisiyle ortaya çıkan sehimlerin hesaplanması için ayrı ayrı formüller geliştirilmiş ve sunulmuştur. Ancak, eğilme ve kayma gerilmesi kaynaklı hesap değerlerinin toplanmasıyla elde edilen analitik sehimlerin, özellikle Vierendeel tipi göçmeye maruz kalan kirişlerde deneysel değerlerin önemli derecede altında kaldığı tespit edilmiştir. Deneysel ve analitik değerler arasındaki bu farkların, özellikle sivri köşeli boşlukların köşelerinde ortaya çıkan gerilme birikimleri ile bağlantılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Mevcut çalışmanın asıl amacı, deneysel ve analitik sehim değerleri arasındaki bu farkın ortadan kaldırılabilmesi için analitik formüle eklenmesi dştnlen ve boşluk geometrisine bağlı olan bir katsayının geçmiş deney sonuçlarına bağlı olarak tanımlanması ve belirlenmesidir. Bu bağlamda, literatürde üçgen, kare ve dairesel boşluklu bütün deney kirişlerine ait sehim verileri analiz edilecek, deneysel ve analitik sehim değerleri arasındaki fark tanımlanacak ve bir katsayıya ulaşılacaktır. Bu katsayının da tanımlanmasıyla, Kalkan [4] tarafından daha önce geliştirilen formül son haline getirilerek, yapısal betonarme yönetmeliklerine uygun duruma gelecektir.



2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. İncelenen Deney Elemanları

Bu çalışmada Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında Dündar [3] , Eğriboz [12] ve Yılmaz [15] tarafından test edilen toplam beş adet boşluksuz, yedişer adet düzenli kare ile dairesel boşluklu ve üç adet düzenli üçgen boşluklu betonarme kirişin deney sonuçları kullanılmıştır. Tüm deney numunelerinin genişliği 150 mm, yüksekliği 400 mm ve kiriş boyu 4 m olarak tasarlanmıştır. Bu elemanlarda boyuna donatı miktarı, boşlukların çevresinde çapraz donatı kullanımı, boşlukların sağ ve solundaki dikmelerde etriye kullanımı ile boşluk geometrisi deney değişkenleri olarak seçilmiştir. Kirişlerin donatı detayları ile boşluk geometrileri Çizelge 2.1’de ve Şekil 2.1-2.4’te verilmektedir.

Dairesel boşluklu kirişlerin kiriş gövdesinde, çapı 200 mm olan 12 adet dairesel boşluk oluşturulmuştur. Bu kirişlerde boşluklar arası dikmelerin genişliği 100 mm olarak seçilmiştir. Kare boşluklu kirişlerde kiriş gövdesinde 200 mm x 200 mm boyutunda 12 adet eş kare boşluklar oluşturulmuştur. Bu elemanlarda da boşluklar arası dikmelerin genişliği 100 mm olarak seçilmiştir. Üçgen boşluklu kirişlerde ise kiriş gövdesinde, yüksekliği 200 mm ve kenar uzunluğu 231 mm olan 15 adet eşkenar üçgen boşluk oluşturulmuştur. Üçgenler arasındaki çapraz kolların genişliği ise 100 mm olarak seçilmiştir.

Dündar’ın [3] deney kirişleri olan ve Kalkan [4] tarafından incelenen RBn, RBb, RRxn, RRxcn, RRxb, RRxcb, RCb, RCcb, RCxb, RCxcb kirişlerinin isimlerindeki ikinci harf, boşluk şeklini göstermektedir. “B” boşluksuz kirişi, “R” kare boşluklu kirişi, “C” ise dairesel boşluklu kirişi belirtmektedir. “x” harfi boşlukların iki yanındaki dikmelerde çapraz donatı bulunma halini, “c” harfi ise boşluklar arasındaki dikmelerde yatay etriye bulunma halini göstermektedir. Kirişlerdeki çapraz donatı 10 mm çaplı çelik kabloların bir boşluğun alt yüzünden yanındaki ikinci boşluğun üst yüzüne doğru uzanacak ve her iki kiriş yüzünde de alttan ve üstten boşlukları saracak şekilde döşenmiştir. Elemanların isimlerinin son harfi ise, boyuna donatı miktarını

ifade etmektedir. Buna göre, “n” harfi normal donatılı, “b” harfi ise çok donatılı kirişleri simgelemektedir. Her bir eleman için donatı oranları Çizelge 2.1’de verilmiştir.

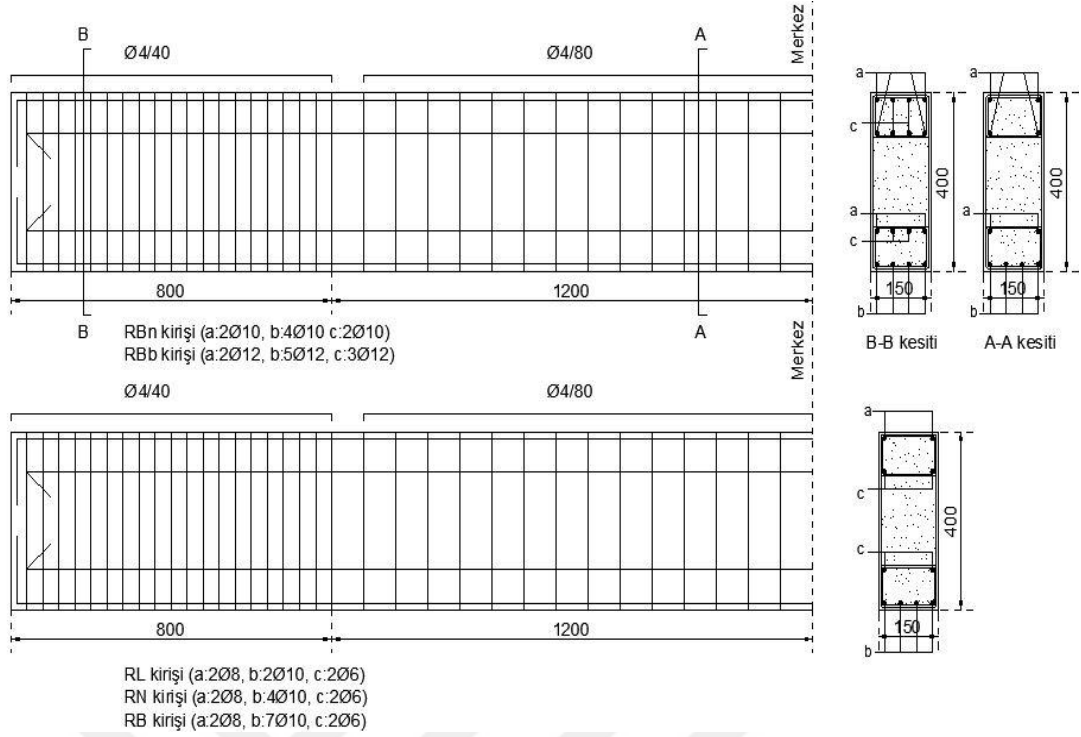
Aykaç vd. [1] deney kirişleri olan RL, RM, RH, SL, SM, SH, CLX, CMX, CHX kirişlerinin isimlerindeki ilk harf kirişlerin gövdelerindeki boşluk türünü göstermektedir. “R” boşluksuz referans kirişi, “S” kare boşluklu kirişi, “C” ise dairesel boşluklu kirişi belirtmektedir. Kare boşluklu kirişlerde çapraz donatı bulunmamakta olup dairesel boşluklu CLX, CMX, ve CHX kirişlerindeki “X” harfi çapraz donatıyı göstermektedir. Bu çapraz donatılar, boşlukları CHX kirişinde 660 mm uzunluğunda 10 mm çaplı sürekli kablolar şeklinde, CMX kirişinde ise 90 mm uzunluğunda 10 mm çaplı parçalı kablolar ile sarmıştır. CLX kirişinde ise çapraz donatı olarak kablolar yerine 600 mm uzunluğunda 10 mm çapında boşluğun sağ ve soluna yerleştirilen 4 adet nervürlü donatı kullanılmıştır (Şekil 2.4). Elemanların isimlerinin son harfi ise, boyuna donatı oranını göstermektedir. Buna göre, “L” harfi az donatılı, “M” harfi normal donatılı “H” harfi ise çok donatılı kirişleri simgelemektedir. Bu boşluklu kirişlerin tamamının dikmelerinde etriye bulunmaktadır. Donatı oranları Çizelge 2.1’de her bir eleman için ayrı ayrı verilmiştir.

Aykaç ve Yılmaz [2] deney kirişleri olan TS, TN, TB kirişlerinde ise “T” harfi üçgen boşluk şekli için kullanılmış olup ikinci harflerden “S” harfi az donatı, “N” harfi normal donatı, “B” harfi ise fazla donatı miktarını ifade etmektedir. Bu üçgen boşluklu kirişlerin dikmelerinde etriye bulunmaktadır.

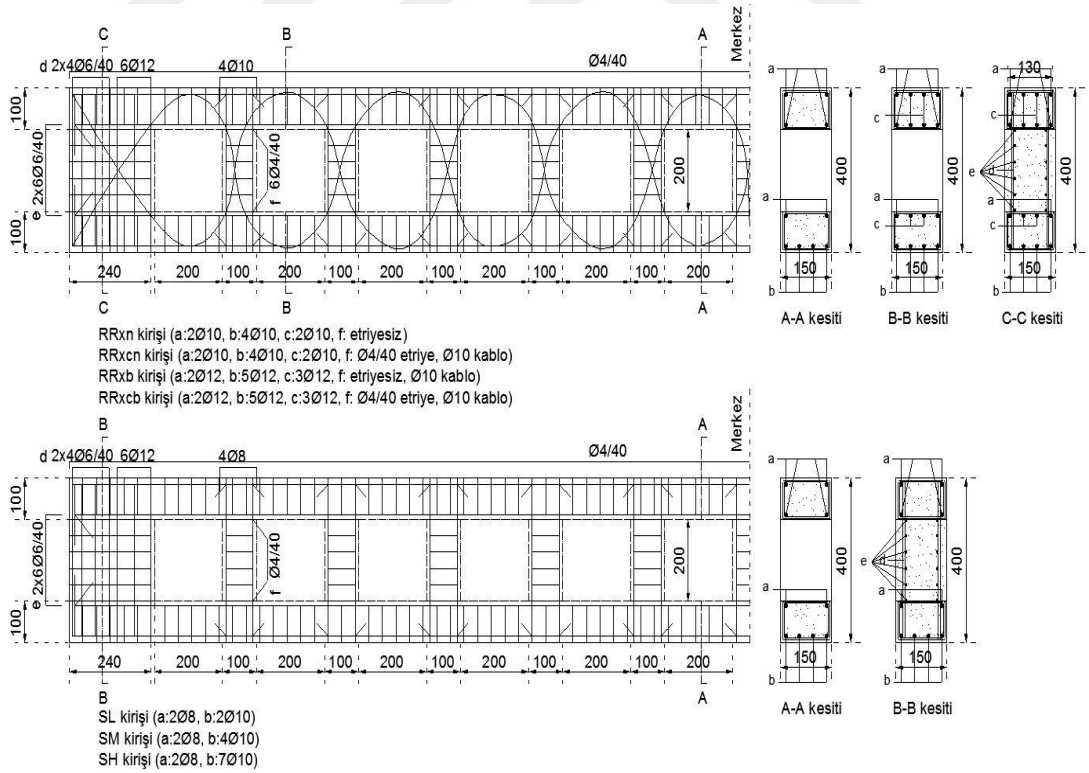
Deney kirişlerinde kullanılan S420 sınıfı nervürlü boyuna donatıların Ø10 ve Ø12’lik çubuklarının akma dayanımları sırasıyla 480 ve 550 MPa; çekme dayanımları ise sırasıyla 700 ve 650 MPa olarak ölçülmüştür. Analitik hesaplarda da bu değerler kullanılmıştır. Deney elemanlarında betonunun karakteristik ve standart silindir basınç dayanımları Çizelge 2.1’de sırasıyla verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kirişlerin Özellikleri

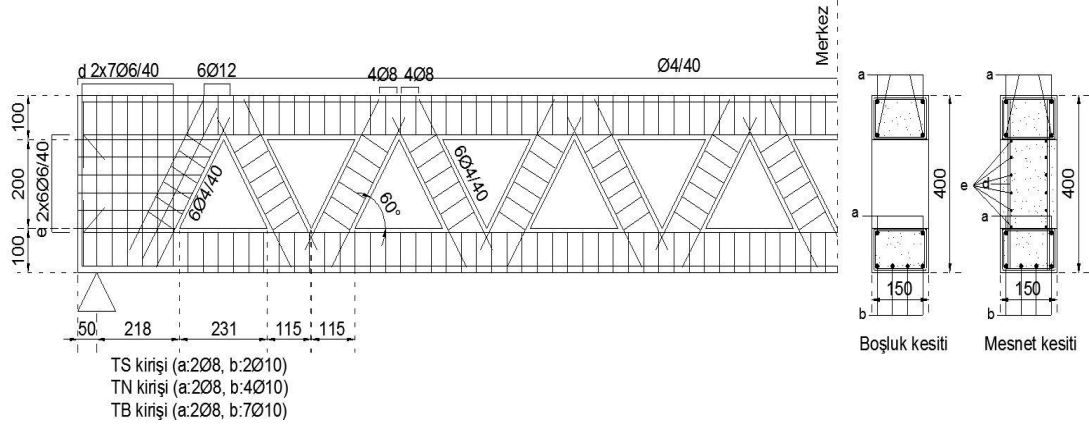
Kiriş	Boşluk	Boyuna Donatı Oranı	Basınç Donatısı	Çekme Donatısı	Donatı Oranı	Dikmelerde Etriye	Çapraz Donatı	Beton Dayanımı (Mpa) f_{ck}/f'_c
RBn	Yok	Normal	2Ø10	2Ø10 & 4Ø10	0.0079	-	-	21/26.6
RBb	Yok	Yüksek	2Ø12	2Ø12 & 5Ø12	0.0131	-	-	29/32.6
RL	Yok	Az	2Ø8	2Ø6 & 2Ø10	0.0036	-	-	22
RM	Yok	Normal	2Ø8	2Ø6 & 4Ø10	0.0061	-	-	20
RH	Yok	Yüksek	2Ø8	2Ø6 & 7Ø10	0.0098	-	-	21
RRxn	Kare	Normal	2Ø10	2Ø10 & 4Ø10	0.0079	Yok	Ø10 kablo	22/26.9
RRxcn	Kare	Normal	2Ø10	2Ø10 & 4Ø10	0.0079	Ø4/40	Ø10 kablo	22/26.9
RRxb	Kare	Yüksek	2Ø12	2Ø12 & 5Ø12	0.0131	Yok	Ø10 kablo	21/26.6
RRxc b	Kare	Yüksek	2Ø12	2Ø12 & 5Ø12	0.0131	Ø4/40	Ø10 kablo	21/26.6
SL	Kare	Az	2Ø8	2Ø8 & 2Ø10	0.0045	Ø4/40	Yok	22
SM	Kare	Normal	2Ø8	2Ø8 & 4Ø10	0.0070	Ø4/40	Yok	20
SH	Kare	Yüksek	2Ø8	2Ø8 & 7Ø10	0.0111	Ø4/40	Yok	21
RCb	Daire	Yüksek	2Ø12	2Ø12 & 5Ø12	0.0131	Yok	Yok	21/26.6
RCcb	Daire	Yüksek	2Ø12	2Ø12 & 5Ø12	0.0131	Ø4/40	Yok	21/26.6
RCxb	Daire	Yüksek	2Ø12	2Ø12 & 5Ø12	0.0131	Yok	Ø10 kablo	22/26.9
RCxc b	Daire	Yüksek	2Ø12	2Ø12 & 5Ø12	0.0131	Ø4/40	Ø10 kablo	22/26.9
CLX	Daire	Az	2Ø8	2Ø8 & 2Ø10	0.0045	Ø4/40	2Ø10 çapraz donatı	22
CMX	Daire	Normal	2Ø8	2Ø8 & 4Ø10	0.0070	Ø4/40	Ø10 kablo	20
CHX	Daire	Yüksek	2Ø8	2Ø8 & 7Ø10	0.0111	Ø4/40	Ø10 kablo	21
TS	Üçgen	Az	2Ø8	2Ø8 & 2Ø10	0.0045	Ø4/40	Yok	22
TN	Üçgen	Normal	2Ø8	2Ø8 & 4Ø10	0.0070	Ø4/40	Yok	20
TB	Üçgen	Yüksek	2Ø8	2Ø8 & 7Ø10	0.0111	Ø4/40	Yok	21



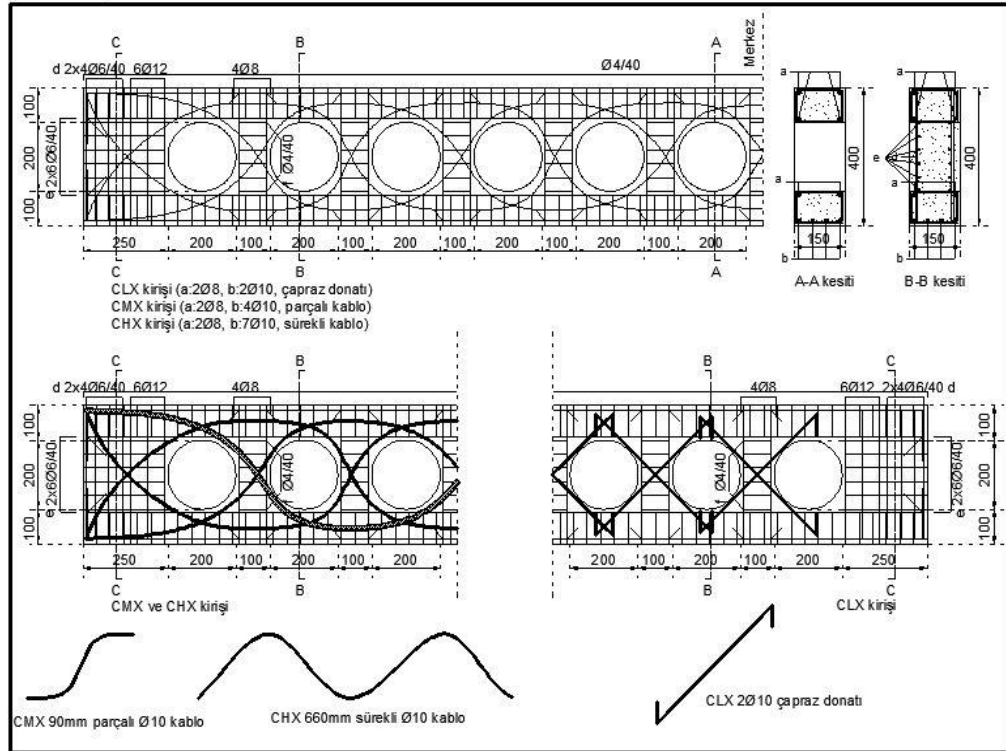
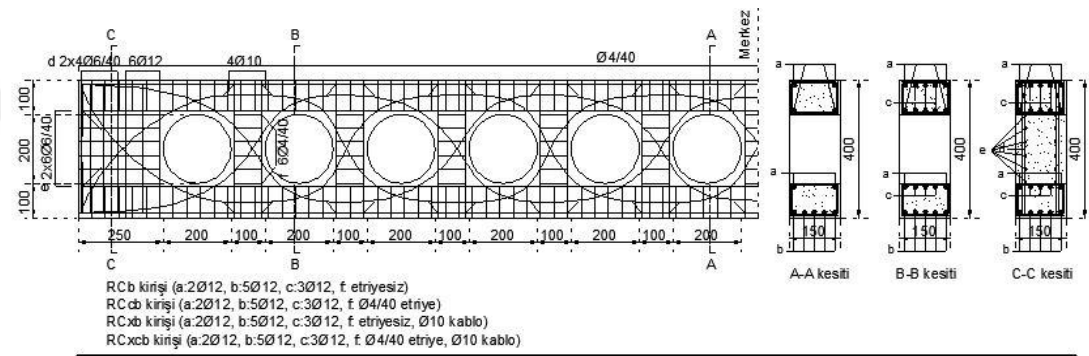
Şekil 2.1. Boşluksuz Referans Kirişlerinin Boyut ve Donatı Detayları



Şekil 2.2. Kare Boşluklu Kirişlerinin Boyut ve Donatı Detayları



Şekil 2.3. Üçgen Boşluklu Kirişlerinin Boyut ve Donatı Detayları

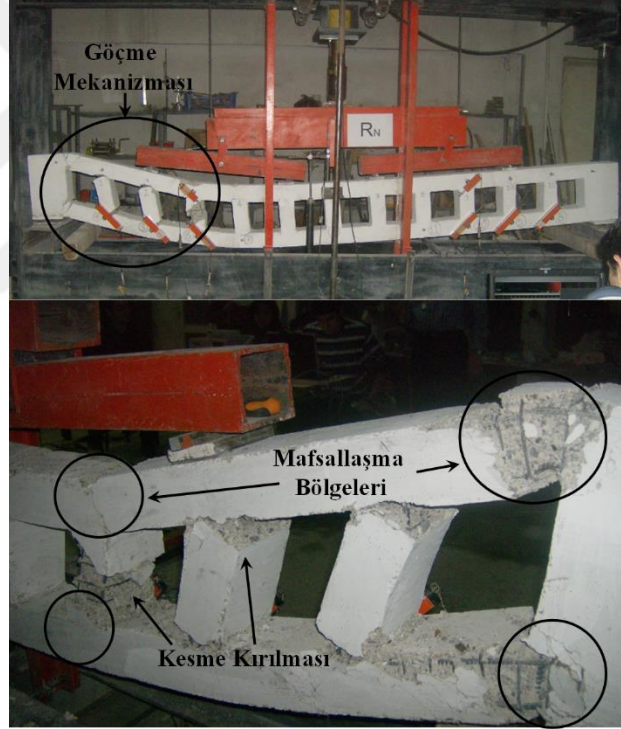


Şekil 2.4. Dairesel Boşluklu Kirişlerinin Boyut ve Donatı Detayları

2.2. Deney Düzeni

Deney numunelerinin yük-sehim eğrileri, Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında Dündar [3], Eğriboz [12] ve Yılmaz [15] tarafından yapılan 400 kN yük kapasiteli çerçeve düzeneğinde 4 m uzunluğundaki kirişlere dört noktadan yapılan yükleme neticesinde LVDT ler ile ölçümler yapılarak elde edilmiştir. (Bkz. EK 1)

İki ucundan basit kiriş şeklinde mesnetlenen deney numunelerine uygulanan yükler, kirişin önemli bir bölümünde kesme etkisinin sınırlı bir düzeyde kalmasını sağlamış ve kirişin orta bölgesinde hiç kesme etkisi oluşmamıştır. Deney elemanlarının mesnet noktaları kiriş uçlarından 100 mm içeridedir.



Şekil 2.5. Deney Düzeni ve Plastik Göçme Mekanizması Aykaç vd. [1]

3. ANALİTİK ÇALIŞMA

Betonarme kirişlerin gövdesindeki boşluklar, kirişlerin taşıma yükü kapasitelerini azaltırken, servis yükleri altındaki sehim ve deformasyonlarını arttırmaktadır. Kiriş gövdesinde sürekli boşluklar bırakılması yani kesmenin etkin olduğu mesnet bölgelerinin yanı sıra, eğilme momentinin baskın olduğu orta açıklıkta da boşluk kullanılması ile kirişin gevrek ve istenmeyen kesme davranışından sünek olan eğilme davranışına yaklaştırması hedeflenmiştir. Boşluklar sebebiyle kirişin eğilme ve kayma rijitliklerinde meydana gelen azalmaların ve boşlukların çevresindeki gerilme birikmelerinin, kirişlerin sehim, deformasyon ve çatlakları üzerindeki olumsuz etkilerini sınırlandırmak, boşluklu kirişlerin dayanımlarını ve sehimlerini boşluksuz kiriş mertebesine yaklaştırmak amacıyla kirişlerde farklı donatı miktarı ve özel donatı kullanımlarına gerek duyulmuştur.

Boşluklu betonarme kirişlerde boşluklar, kirişin kayma rijitliğini azaltmaktadır. Bu durum, kirişte oluşan kesme kuvvetlerinin sebep olduğu kayma deformasyonları ve sehimlerine önem katmaktadır. Özellikle Vierendeel panel davranışı ile göçme gerçekleşen kirişlerde boşluk çevresindeki kayma deformasyonlarının ortaya çıkardığı sehimler, eğilme deformasyonlarına bağlı olarak ortaya çıkan sehimlere yakın değerlere ulaşmaktadır. Bölüm 3.1 ve Bölüm 3.2’de anlatılan kesme ve eğilme etkisi ile oluşan sehimlerin hesabı Mathcad 14 [16] programında yapılmıştır.

3.1. Eğilme Etkisi Sonucu Oluşan Sehımlerin Hesabı

Boşluksuz kirişlerin analitik sehım değerleri (δ_{an}), Kalkan [4] tarafından moment- alan teoremi kullanılarak elde edilen eşıtlık ile hesaplanmıştır.

$$\delta_{an} = 1,024 \cdot 10^9 \cdot \frac{P}{E_c \cdot I_{ef}} \quad (3.1)$$

Burada P Newton cinsinden uygulanan yük, E_c MPa cinsinden betonun elastisite modülü ve I_{ef} mm⁴ cinsinden kesitin etkili eylemsizlik momentidir. Boşluksuz kiriş I_{ef} değerleri Branson [17] denklemine göre hesaplanmıştır:

$$I_{ef} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \cdot I_c + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] \cdot I_{cr} \quad (3.2)$$

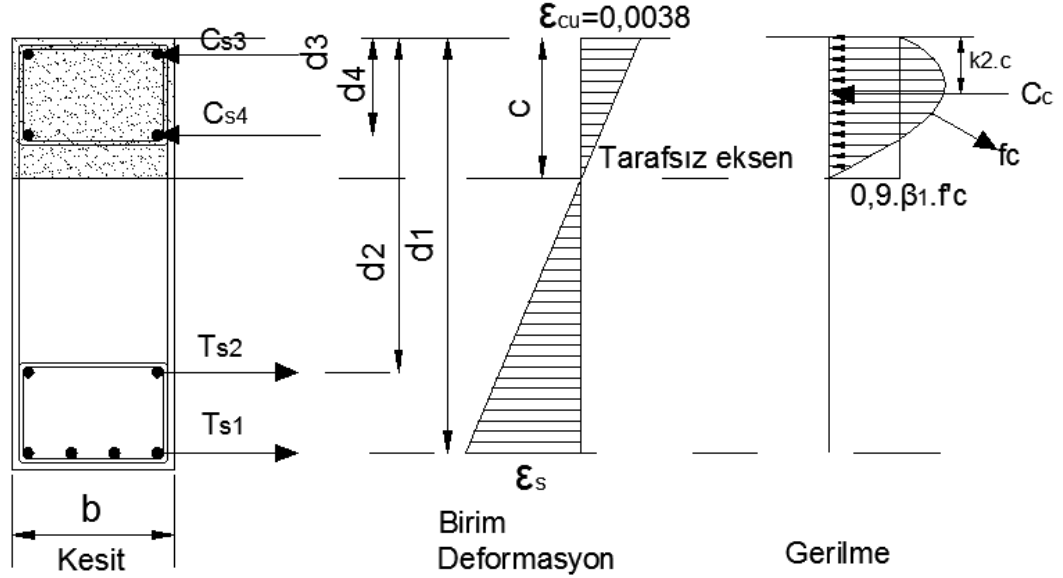
Burada M_{cr} eğilmede deneysel çatlama momenti, M_a elemanda P yüküne karşılık gelen eğilme momentidir.

Branson [17] etkili eylemsizlik momenti denkleminde I_c çatlamamış dönüştürülmüş kesitin geometrik merkezine göre eylemsizlik momenti, I_{cr} ise tarafsız eksene göre çatlamış kesitin eylemsizlik momentidir. Kirişlerin eylemsizlik momentleri I_c ve I_{cr} hesaplanırken basınç ve çekme donatıları, eşdeğer beton alanına dönüştürülerek bu donatıların eylemsizlik momentine olan katkısı alınmıştır. I_c ve I_{cr} değerlerinin hesabı Bölüm 4.1'de verilmiştir.

3.1.1. Eğilme Momenti Hesabı

Eğilme momenti M_a değerine ulaşılırken Şekil 3.1’de gösterilen Todeschini vd. [18] tarafından geliştirilen beton gerilme-birim deformasyon modeli kullanılmıştır. Todeschini gerilme-birim deformasyon modelinin, beton basınç dayanımının 40 MPa değerinin altında olduğu durumlarda deney sonuçlarını daha iyi yansıttığına dair genel bir kanı olması; sürekli ve tek bir parabolik gerilme dağılımı fonksiyonu öngördüğü için analitik hesaplarda kolaylık sağlaması nedeniyle diğer beton-gerilme birim deformasyon modelleri yerine tercih edilmiştir.

M_a , basınç donatısı, çekme donatısı ve beton bloğunun moment katkıları toplanarak elde edilmiştir.



$$f_c := \frac{1.8f_c \cdot x}{1+x^2} \quad x := \frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \quad \epsilon_o := 1.71 \frac{f_c}{E_c} \quad \beta_1 := \frac{\ln(1+x^2)}{x} \quad k_2 := 1 - \frac{2 \cdot (x - \arctan x)}{x^2 \cdot \beta_1}$$

Şekil 3.1. Todeschini v.d [18] Beton Gerilme-Birim Deformasyon Modeli

Şekil 3.1’de C_s ve T_s Newton cinsinden sırasıyla donatı çekme kuvveti ve donatı basınç kuvveti;

$$C_s, T_s = A_s \cdot f_s \cdot \epsilon_s \quad (3.3)$$

Burada A_S donatı alanı (mm^2), f_s çeliğin gerilmesi (Mpa), ϵ_s çeliğin birim deformasyonudur.

$$\epsilon_s = \epsilon_{cs} \frac{d-c}{c} \quad (3.4)$$

ϵ_{cs} servis yükü altında betonun maksimum birim deformasyon değeridir.

$$f_c = \frac{1,8 \cdot f_{ck} \cdot x}{1+x^2} \quad (3.5)$$

f_c , Todeschini vd. [18] beton modeline göre betondaki gerilme değeridir. Eurocode 2 yönetmeliği [19] kirişlerin kullanım yükleri altında en dış basınç lifinde; kısa süreli yüklemeler neticesinde $0,45 \cdot f_{ck}$ gerilmenin, uzun süreli yüklemelerde zaman içerisinde ortaya çıkan sünme deformasyonlarının da etkisiyle kirişin en dış basınç lifinde $0,6 \cdot f_{ck}$ gerilmenin ortaya çıktığını belirtmektedir. Denklem 3.5'te f_c formülü $0,6 \cdot f_{ck}$ gerilme değeri ile eşitlenerek servis yükü altındaki betonun maksimum birim deformasyon değeri ϵ_{cs} bulunur. Servis (Kullanım) yükü ise betonun basınç dayanımının yüzde altmışına karşılık gelen moment değerindeki yük değeri olarak alınmıştır. Her bir kirişe ait betonun karakteristik basınç dayanımları f_{ck} Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Todeschini vd. [18] beton modeline göre, betonun kırılma anındaki birim deformasyonu; $\epsilon_{cu} = 0,0038$ 'dir.

f_s çekme gerilmesinin belirlenmesi için, birim deformasyona bağlı olan aşağıdaki yaklaşım kullanılmıştır.

$$f_s = \begin{cases} \epsilon_s \cdot E_s, & \epsilon_s < \epsilon_y \\ f_y, & \epsilon_s \geq \epsilon_y \end{cases} \quad \epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \quad (3.6)$$

ϵ_y çeliğin akma birim deformasyonu, f_y donatı akma dayanımı olup, Bölüm 2.1'de farklı donatı çapları için deneysel akma dayanımı değerleri verilmiştir. Donatı elastisite modülü $E_s = 2 \times 10^6$ MPa olarak alınmıştır.

Şekil 3.1’de görüldüğü üzere parabolik bir gerilme dağılımına sahip beton basınç bloğunun kuvveti C_C Denklem 3.7’nin yardımı ile eşdeğer dikdörtgen gerilme dağılımına dönüştürülerek hesaplanmıştır.

$$C_C = 0,9 \cdot \beta_1 \cdot f'_c \cdot c \cdot b \quad (3.7)$$

f'_c betonun silindir basınç dayanımı olup Çizelge 2.1’de bu değerler verilmiştir. c tarafsız eksenin derinliği, b kiriş genişliğidir. β_1 değeri Denklem 3.8, 3.9, 3.10’daki bağıntılar yardımıyla elde edilmiştir.

$$\beta_1 = \frac{\ln[1+x^2]}{x} \quad (3.8)$$

$$x = \frac{\varepsilon_C}{\varepsilon_o} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_o = \frac{1,71 \cdot f'_c}{E_c} \quad (3.10)$$

ε_C Betonun basınç bölgesindeki birim deformasyonu ε_o betonun maksimum gerilmedeki birim deformasyonudur.

Tarafsız eksen derinliği c ’nin k_2 katsayısı ile çarpılmasıyla eşdeğer beton bloğun moment kolu bulunmaktadır. k_2 katsayısının hesabı Denklem 3.11’deki gibidir;

$$k_2 = 1 - \frac{2 \cdot (x - \arctan x)}{x^2 \cdot \beta_1} \quad (3.11)$$

Todeschini vd. [18] beton gerilme-birim deformasyon modelinde (Şekil 3.1) gösterilen tüm iç kuvvetlerin tarafsız eksene göre momenti alındığında servis yükleri altında oluşan eğilme momenti elde edilir.

$$M_a = T_{S1} \cdot (d_1 - c) + T_{S2} \cdot (d_2 - c) + C_{S3} \cdot (c - d_3) + C_{S4} \cdot (c - d_4) + C_C \cdot (c - k_2 \cdot c) \quad (3.12)$$

Boşluklu kirişlerde ise kiriş sonuna yakın olan yarısı $P/2$, diğer yarısı ise $P/4$ kesme kuvvetine maruz kalan basit mesnetli deney kirişleri için Kalkan [4] tarafından boşluk etkisini göz önünde bulunduran kiriş modeli oluşturulup, bu modele moment- alan teoreminin uygulanmasıyla aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir. Bu eşitlik kullanılarak boşluklu kirişlerde eğilme etkisi ile oluşan analitik sehim (δ_{an}) değerleri hesaplanmıştır:

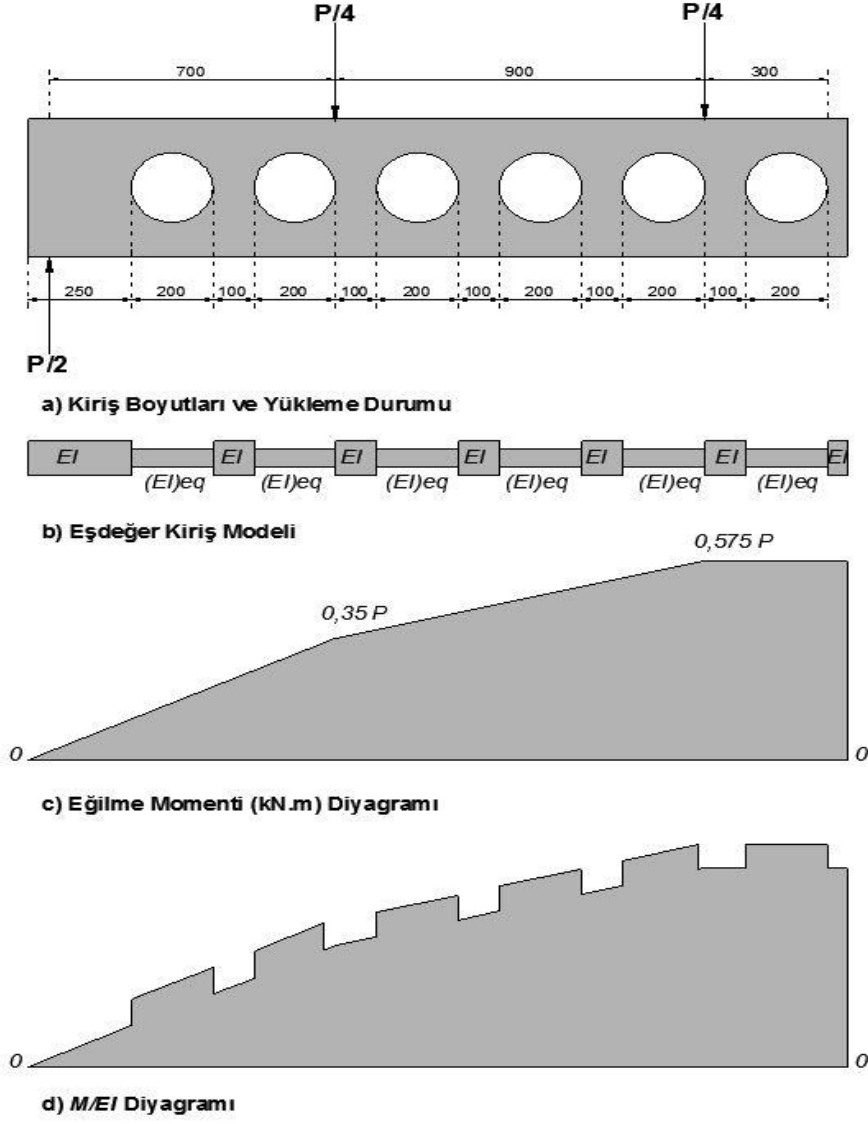
$$\delta_{an} = P \left(\frac{0,344 \cdot 10^9}{E_c \cdot I_{ef}} + \frac{0,680 \cdot 10^9}{(EI)_{eq}} \right) \quad (3.13)$$

Sehim hesaplarında betonun elastisite modülü E_c , ACI 318 [8] yönetmeliğine göre Denklem 3.14'teki bağıntıdan hesaplanmıştır:

$$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (3.14)$$

Burada f'_c MPa cinsinden betonun standart silindir eksenel basınç dayanımıdır. Çizelge 2.1'de her bir numunenin basınç dayanımı yer almaktadır.

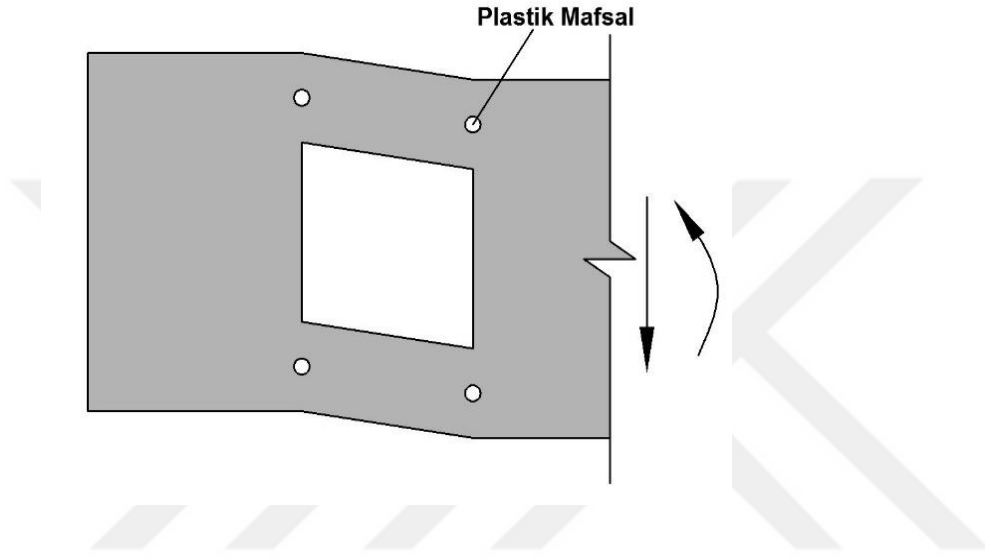
Boşluklu kirişlerin eğilme etkisi ile oluşan analitik sehimleri hesaplanırken, Mansur ve Tan [20] tarafından önerilen eşdeğer kiriş modeli yani kirişin boşluk bulunduran kısımlarında boşluk etkisi ile azaltılmış eğilme rijitliği olan $(EI)_{eq}$ değeri kullanılmıştır. (Şekil 3.2.b). Kalkan [4] tarafından analitik eğilme sehim δ_{an} eşitliği elde edilirken, Şekil 3.2.d'de verilen ve moment- alan teoremine göre çizilmiş grafiğin altında kalan alan dikdörtgen ve üçgen parçalara ayrılmış, her parçanın açıklık ortasına göre momentleri alınmıştır. Bu momentlerin toplanmasıyla boşluklu kirişlerin açıklık ortasındaki sehim değerini veren analitik ifade elde edilmiştir. (Denklem 3.13)



Şekil 3.2. Kirişlerin Boyutları, Yükleme Durumu, Kiriş Modeli ve Diyagramları

3.2. Kesme Etkisi Sonucu Oluşan Sehımlerin Hesabı

Kirişin kesme etkisi ile oluşan Vierendeel panel davranışı göstererek göçmeye uğraması için boşlukların üst ve alt kirişçiklerinde toplam dört plastik mafsaldan meydana gelen ilave dönme ve göçme mekanizmasının oluşması gerekmektedir. Bahsedilen göçme mekanizması Şekil 3.3'te sembolize edilmiştir. Vierendeel panel davranışı tek boşluk çevresinde olacağı gibi birden fazla boşluğun etrafında oluşan dört plastik mafsallarla birden çok boşluğu kapsar biçimde de olabilmektedir.



Şekil 3.3. Vierendeel Panel Göçme Mekanizması

Mansur ve Tan [20], gövdesinde bir veya iki boşluk bulunduran betonarme kirişlerde herhangi bir boşluk çevresinde oluşan kesme kuvvetleri ile meydana gelen sehımlerin (δ_v) hesaplanması için aşağıdaki Denklem 3.15'teki eşitliği geliştirmiştir:

$$\delta_v = \frac{V.l_e^3}{12.E_c.(I_t+I_b)} \quad (3.15)$$

V herhangi bir boşluğa etki eden kesme kuvveti, l_e kiriş açıklığında oluşan plastik mafsallar arası etkili uzaklıktır.

I_t ve I_b sırasıyla boşluğun üst ve altında yer alan kirişçiklerin etkili eylemsizlik momentleridir.

Üst kirişçiğin çatlamamış olduğu kabul edilerek, I_t çatlamamış kesit eylemsizlik momenti, alt kirişçiğin de çatlamış olduğu kabulüne dayanarak, I_b çatlamış kesitin eylemsizlik momenti olarak hesaplanmıştır. I_t hesaplanırken basınç donatıları eşdeğer beton alanına dönüştürülmüş, I_b hesaplanırken de çekme donatıları eşdeğer beton alanına dönüştürülerek betonarme kesitin eylemsizlik momenti miktarına eklenmiştir. Böylece kesme sehimi değerlerini etkileyeceği düşünülen boyuna donatıların eylemsizlik momentine olan katkıları dikkate alınmıştır.

Kesme sehimi formülünde, mafsallaşma bölgesinin gerçek uzunluğu (l_o) yerine mafsallaşma bölgesinin etkili uzunluğu (l_e) kullanılarak, kirişçik sonlarındaki çatlamalar sonucu kirişte meydana gelen ek dönmelerin neden olduğu sehimler de hesaba katılmıştır.

Mansur ve Tan [20] mafsallaşma bölgesinin etkili uzunluğu l_e için Mansur ve diğ. [21] ve Huang [22] tarafından yapılan deneylerin sonuçlarını kullanarak Denklem 3.16'yı geliştirmiştir:

$$I_e = \frac{I_o}{1 - \left(\frac{d_o}{h}\right)^{1.5}} \quad (3.16)$$

Burada d_o boşluk derinliği, h kiriş yüksekliğidir. Dairesel boşluklu kirişlerde d_o boşluk derinliği, dairesele boşlukla aynı alana sahip ve aynı merkezli bir kare boşluğun yükseklik değeri olarak kabul edilmiştir. Üçgen boşluklu kirişlerde de d_o boşluk derinliği, eşkenar üçgen boşlukla aynı alana sahip ve aynı merkezli bir kare boşluğun yükseklik değeri olarak kabul edilmiştir.

Dünder [3], kare boşluklu ve normal donatılı RRxn kirişinde plastik göçme mekanizmasının kiriş sonundaki dört boşluk ve bunlar arasındaki dikmeleri kapsayan bölgede; kare boşluklu ve çok donatılı RRxb kirişinde ise kiriş sonundaki beş boşluk ve bunlar arasındaki dikmeleri kapsayan bölgede oluştuğunu göstermiştir. Bu gözleme dayanarak, normal donatılı kirişlerde l_o (mafsallar arası gerçek uzaklık), 1120 mm, çok donatılı kirişlerde ise 1420 mm olarak alınmıştır.

Aykaç vd. [1], kare boşluklu ve az donatılı SL kirişi, kare boşluklu ve normal donatılı SM kirişi ile kare boşluklu ve çok donatılı SH kirişinde plastik göçme mekanizmasının kiriş sonundaki üç boşluk ve bunlar arasındaki dikmeleri kapsayan bölgede; oluştuğunu tespit etmiştir. Bu tespite dayanarak, az, normal ve çok donatılı dairesel ve kare boşluklu kirişlerde l_o (mafsallar arası gerçek uzaklık), 820 mm alınmıştır. Bir kenar uzunluğu 231 mm olan eşkenar üçgen boşluklu kirişlerde ise l_o (mafsallar arası gerçek uzaklık), 943 mm alınmıştır.

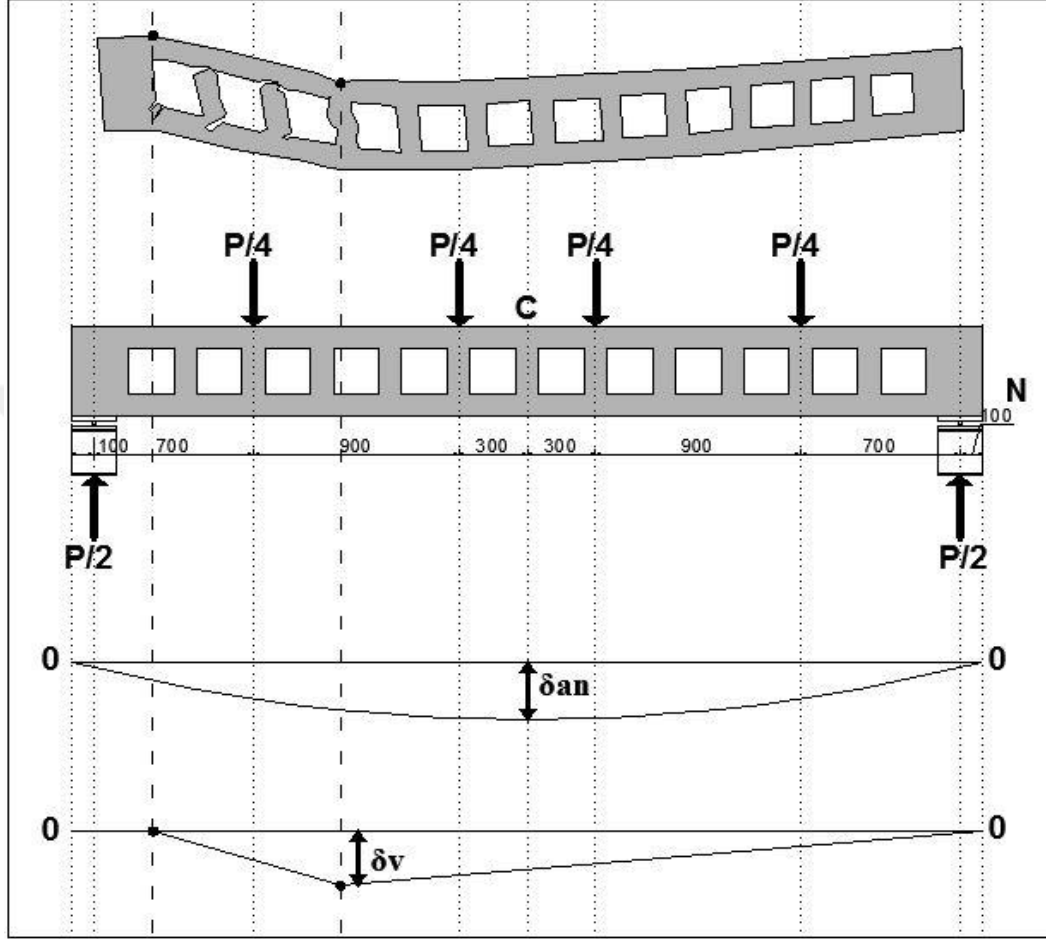
Boşluklu deney kirişlerinin yükleme koşulları gereği, her kirişin plastik göçme mekanizmasının kiriş sonuna yakın olan yarısı $P/2$, diğer yarısı ise $P/4$ kesme kuvvetine maruz kalmıştır. Bu sebeple, bu deney kirişlerinin herhangi bir P yükü karşılığındaki Vierendeel sehimi δ_v değerleri, Mansur ve Tan [20] tarafından elde edilen Denklem 3.15'in, Kalkan [4] tarafından geliştirilmiş hali olan Denklem 3.17'den bulunmuştur:

$$\delta_v = \frac{\frac{P}{2} \cdot \left(\frac{l_e}{2}\right)^3 + \frac{P}{4} \cdot \left(\frac{l_e}{2}\right)^3}{12 \cdot E_c \cdot (I_t + I_b)} \quad (3.17)$$

Daha önce de belirtildiği gibi, hesaplarda üst kirişçiğin çatlamamış olduğu kabul edilerek, I_t çatlamamış kesit eylemsizlik momenti, alt kirişçiğin de çatlamış olduğu kabulüne dayanarak, I_b çatlamış kesitin eylemsizlik momenti olarak kullanılmıştır.

Betonun elastisite modülü E_c Denklem 3.14'ten mafsallaşma bölgesinin etkili uzunluğu l_e ise Denklem 3.16'dan hesaplanmıştır.

Kirişlerin 4 noktadan yüklemesi sonucu numunelerden birinde gerçekleşen deformasyon durumu, Bölüm 3.1 ve Bölüm 3.2’de hesapları anlatılan kesme ve eğilme etkisiyle oluşan sehimler Şekil 3.4’te sembolize edilmiştir.



Şekil 3.4. Kirişin Yükleme ve Göçme Durumuna Göre Eğilme ve Kesme Sehimi Diyagramları

4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Deneyle yapılan dairesel, kare ve üçgen geometrili düzenli boşluklara sahip betonarme kirişlerin deneysel sehimleri ile analitik hesaplar sonucu elde edilen sehim değerlerinin kıyası yapılan bu çalışmada, Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında Dünder [3], Eğriboz [12] ve Yılmaz [15] tarafından yapılan deney sonuçları kullanılmıştır. Analitik eğilme sehimleri ise Çatlamış, Branson [17] ve Bischoff [23] sehimleri olarak üç farklı şekilde hesaplanmıştır.

4.1. Eylemsizlik Momenti Değerlerinin Elde Edilmesi

Branson [17] (Denklem 4.1) yaklaşımı ve Bischoff [23] (Denklem 4.2) yaklaşımı ile elde edilen I_{ef} etkili eylemsizlik momenti değerleri, Bölüm 3.1'de yer alan eğilme sehim (δ_{an}), formüllerinde kullanılarak kirişlere uygulanan yük değerlerine karşılık gelen iki farklı analitik eğilme sehim değeri bulunmuştur.

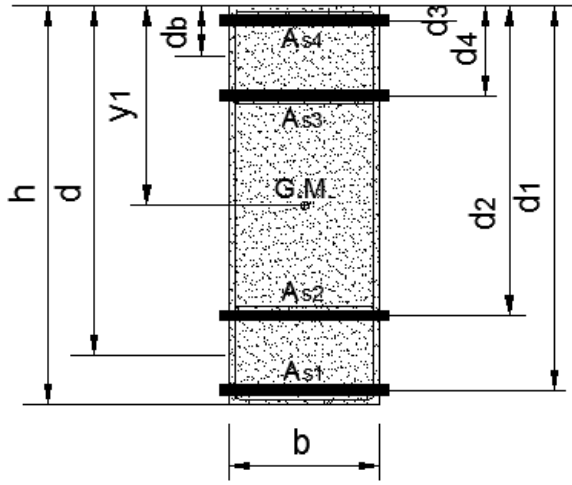
$$I_{ef} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \cdot I_c + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] \cdot I_{cr} \quad (4.1)$$

$$\frac{1}{I_{ef}} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 \cdot \frac{1}{I_c} + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2\right] \cdot \frac{1}{I_{cr}} \quad (4.2)$$

Burada M_{cr} betonun eğilmede deneysel çatlama momenti, M_a elemanda P yüküne karşılık gelen eğilme momentidir, I_c çatlama dönüşürmüş kesitin geometrik merkezine göre eylemsizlik momenti, I_{cr} tarafsız eksene göre çatlama kesit eylemsizlik momentidir. I_c ve I_{cr} hesaplanırken boyuna donatı alanları donatı elastisite modülü/beton elastisite modülü oranı (modüler oran) ile çarpılarak eşdeğer beton alanına dönüşürmüş, basınç ve çekme donatılarının eylemsizlik momentine olan katkısı alınmıştır.

Çatlamış eğilme sehim değerleri hesaplanırken Branson [17] ve Bischoff [23] eğilme sehimlerinden farklı olarak; etkili eylemsizlik momenti I_{ef} ve azaltılmış eylemsizlik momenti I_{eq} ifadeleri yerine sırasıyla I_{cr} tarafsız eksene göre çatlama kesit

eylemsizlik momenti ve bunun boşluk etkisi ile azaltılmış I_{cr} çatlama kesit eylemsizlik momenti değeri kullanılmıştır.



$$A_s := A_{s1} + A_{s2} \quad A_b := A_{s3} + A_{s4}$$

$$y_1 := \frac{b \cdot h \cdot \frac{h}{2} + (n-1) \cdot A_s \cdot d + (n-1) \cdot A_b \cdot d_b}{b \cdot h + (n-1) \cdot (A_s + A_b)} \quad n := \frac{E_s}{E_c}$$

$$d := \frac{A_{s1} \cdot d_1 + A_{s2} \cdot d_2}{A_s} \quad d_b := \frac{A_{s3} \cdot d_3 + A_{s4} \cdot d_4}{A_b}$$

Şekil 4.1. Kirişin Çatlamamış Kesit Modeli

Boşluksuz kirişlerin etkili eylemsizlik momenti olan I_{ef} hesaplarında kullanılan çatlamamış kesit (Şekil 4.1) eylemsizlik momenti I_c (mm^4) Denklem 4.3'ten ve çatlama kesit eylemsizlik momenti I_{cr} (mm^4) Denklem 4.4'ten hesaplanır.

$$I_c = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \left(\frac{h}{2} - y_1 \right)^2 + (n-1) \cdot A_s \cdot (d - y_1)^2 + (n-1) \cdot A_b \cdot (d_b - y_1)^2 \quad (4.3)$$

Burada y_1 çatlamamış dönüştürülmüş kesitin geometrik merkezinin en dış basınç lifine uzaklığı, d kiriş etkili derinliği (çekme donatısı etkili derinliği), d_b basınç donatısı etkili derinliği, n ise donatı elastisite modülünün beton elastisite modülüne oranıdır. A_s çekme donatısı, A_b basınç donatısı alanıdır.

$$I_{cr} = \frac{b.c^3}{3} + n.A_s.(d - c)^2 + (n - 1).A_b.(c - d_b)^2 \quad (4.4)$$

Burada c tarafsız eksen derinliğidir.

Boşluklu kirişlerin azaltılmış eylemsizlik momenti olan I_{eq} hesaplarında kullanılan çatlama kesit eylemsizlik momenti I_c (mm^4) Denklem 4.5'ten ve çatlama kesit eylemsizlik momenti I_{cr} (mm^4) Denklem 4.4'ten hesaplanır. Ancak boşluklu kesitte çatlama eylemsizlik momentinin hesaplandığı tarafsız eksenin boşluğun üstündeki kirişçikten geçtiği kabul edilir. Maksimum tarafsız eksen derinliği 100 mm alınır.

$$I_c = \frac{b.h^3}{12} + b.h\left(\frac{h}{2} - y_1\right)^2 + (n - 1).A_s.(d - y_1)^2 + (n - 1).A_b.(d_b - y_1)^2 - \frac{b_o.d_o^3}{12} \quad (4.5)$$

Burada b_o boşluk genişliği, d_o boşluk derinliğidir. Boşluk derinliği; dairesel ve üçgen boşluklu kirişlerde bu boşluk geometrilerinin alanına eş değer alanlı kare boşluğun derinliği olarak alınmıştır.

4.2. Deneysel ve Analitik Sehim Eğrilerinin Elde Edilmesi

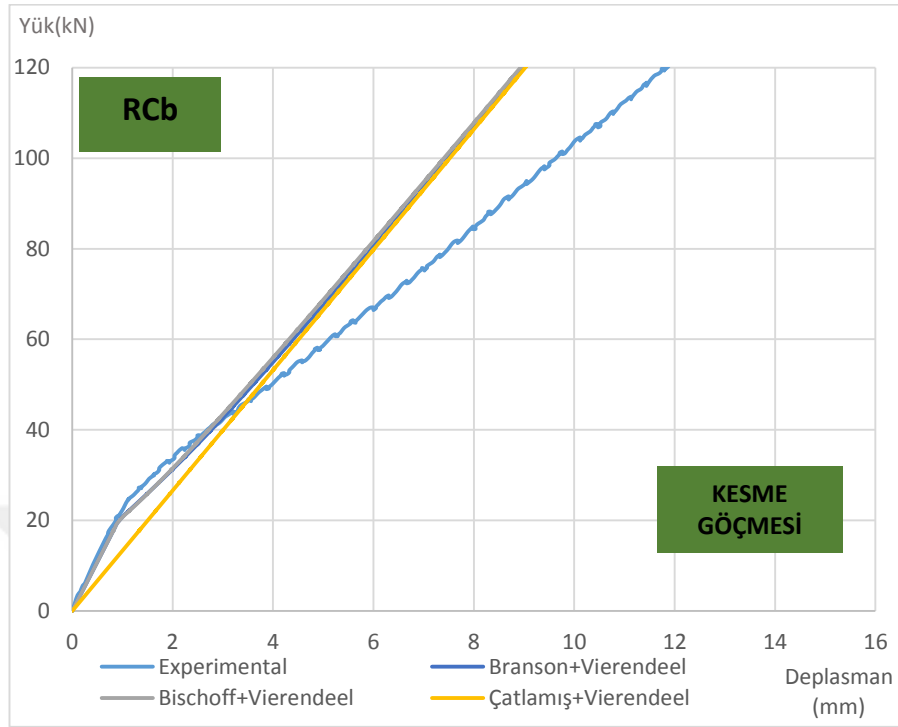
Deney kirişlerinin eğilme etkisi altında oluşan sehim değerlerine (δ_{an}), Vierendeel panel davranışı sonucu oluşan sehim değerleri (δ_v) ilave edilerek dairesel, kare ve üçgen boşluklara sahip deney kirişleri için toplam analitik yük-sehim grafikleri oluşturulmuştur. Bu yük-sehim eğrilerinde sehim değerleri Branson [17] (Denklem 4.1) ve Bischoff [23] (Denklem 4.2) tarafından geliştirilmiş etkili eylemsizlik momenti formülleri kullanılarak elde edildiği için bu analitik eğrilere Branson ve Bischoff isimleri verilmiştir.

Branson [17], Bischoff [23] ve çatlama kesit eylemsizlik momentleri kullanılarak elde edilen eğilme sehimlerine, kirişin Vierendeel panel davranışı göstereceği kabul edilerek, Vierendeel kayma deformasyonları sonucu ortaya çıkan kayma sehim değerlerinin eklenmesiyle elde edilen; Branson+Vierendeel, Bischoff+Vierendeel ve Çatlama+Vierendeel analitik eğrileri düzenlenmiştir. Bu üç analitik eğri Dündar [3], Eğriboz [12] ve Yılmaz [15] tarafından yapılan deney sonuçları neticesinde elde edilen “Experimental” isimli deneysel eğri ile kıyaslanmıştır.

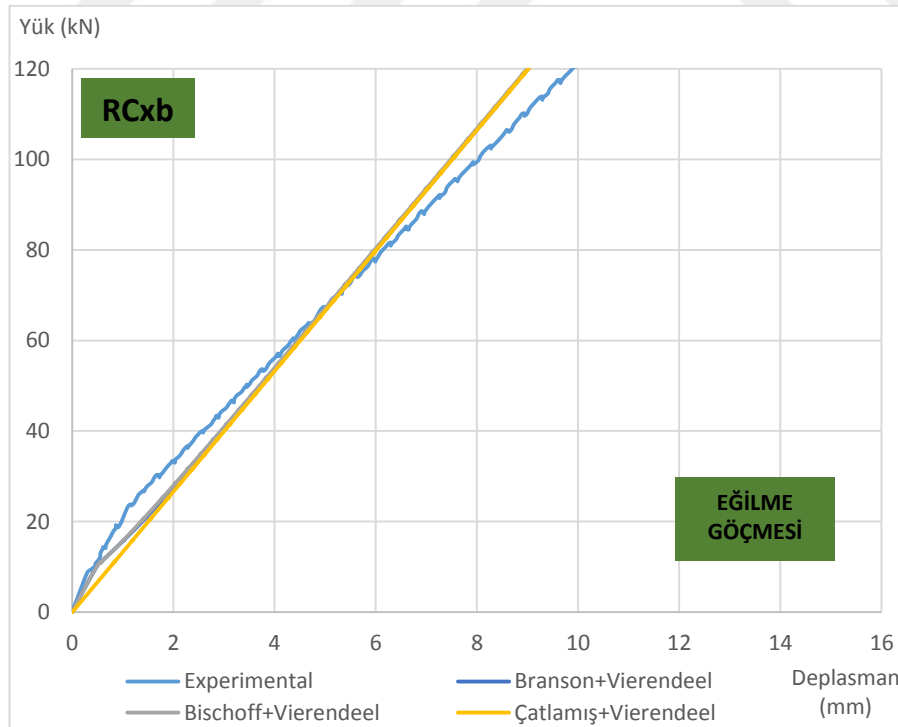
Deneysel eğrinin yük-sehim değerleri Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında 400 kN yük kapasiteli çerçeve düzeneğinde numune kirişlere dört noktadan yapılan yükleme neticesinde LVDT ler ile ölçümler yapılarak elde edilmiştir. (Bkz. EK 1) Düzenli boşluklu kirişlerin eğilme sehimleri ile boşluk etkisiyle ortaya çıkan ilave kayma sehimleri de daha önce de bahsedildiği gibi sırasıyla, Denklem 3.13 ve Denklem 3.17’den hesaplanmıştır.

Dairesel boşluklu kirişlerin yük-sehim eğrileri Şekil 4.2-4.8’de, kare boşuklu kirişlerin yük-sehim eğrileri Şekil 4.9-4.15’te ve üçgen boşluklu kirişlerin yük-sehim eğrileri de Şekil 4.16-4.18’de gösterilmiştir.

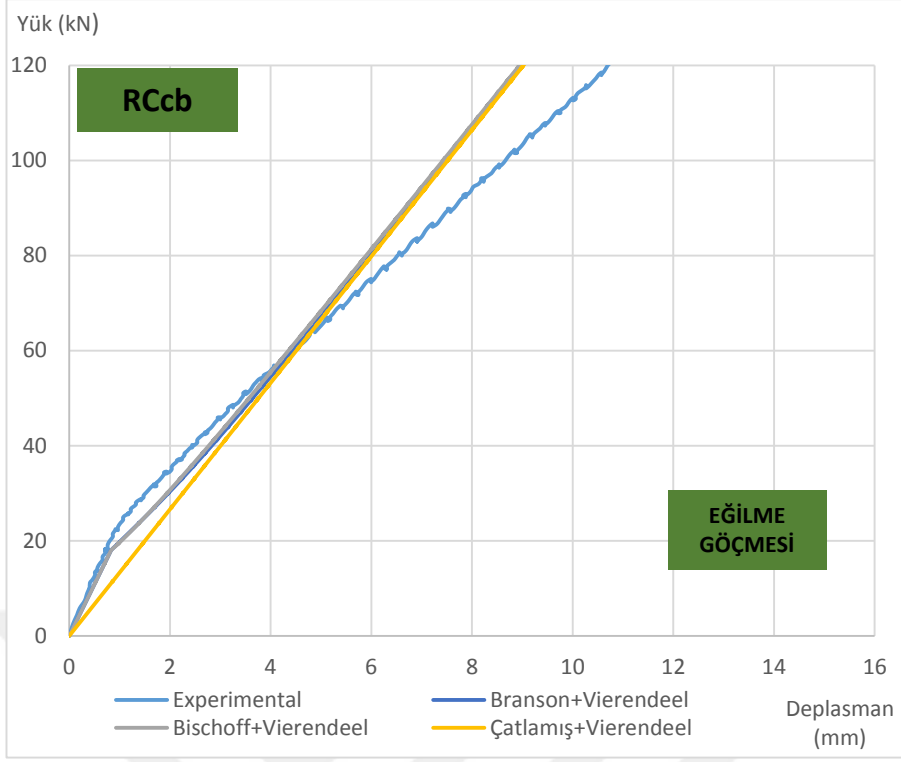
4.2.1. Daire Boşluklu Deney Kirişlerinin Yük-Sehim (kN-mm) Grafikleri



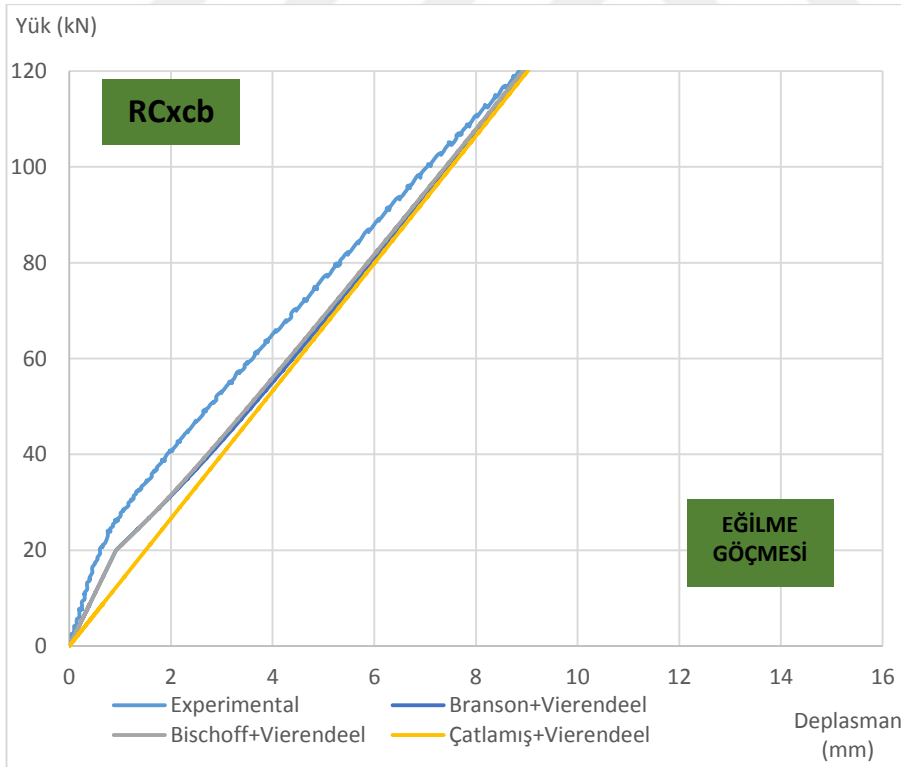
Şekil 4.2. RCB Kirişi Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Yüksek)



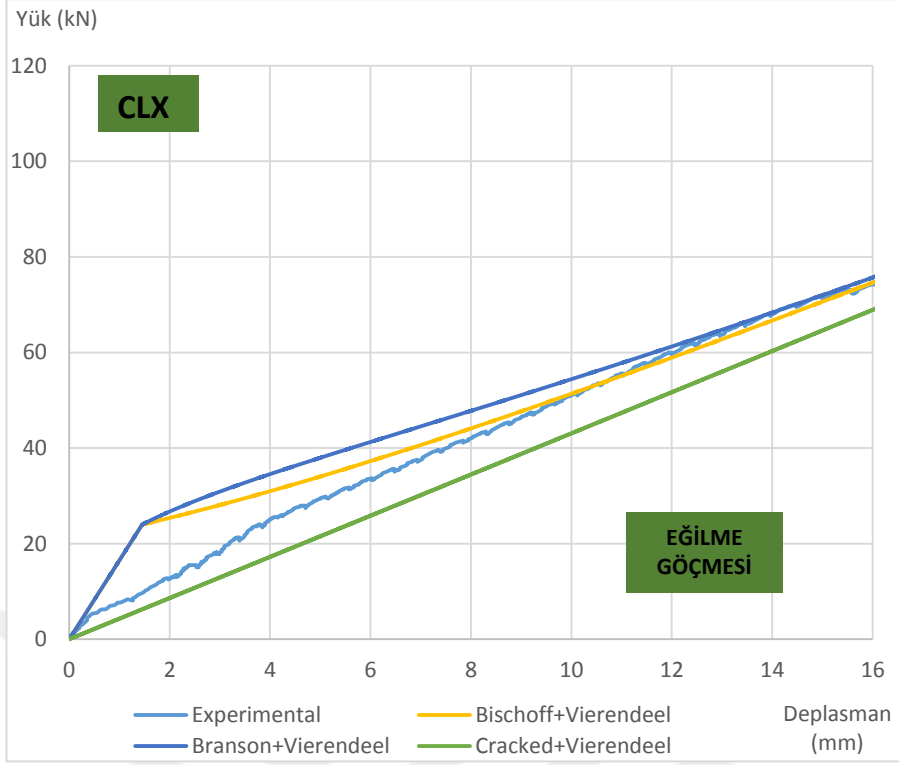
Şekil 4.3. RCxb Kirişi Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Yüksek, Çapraz Donatılı)



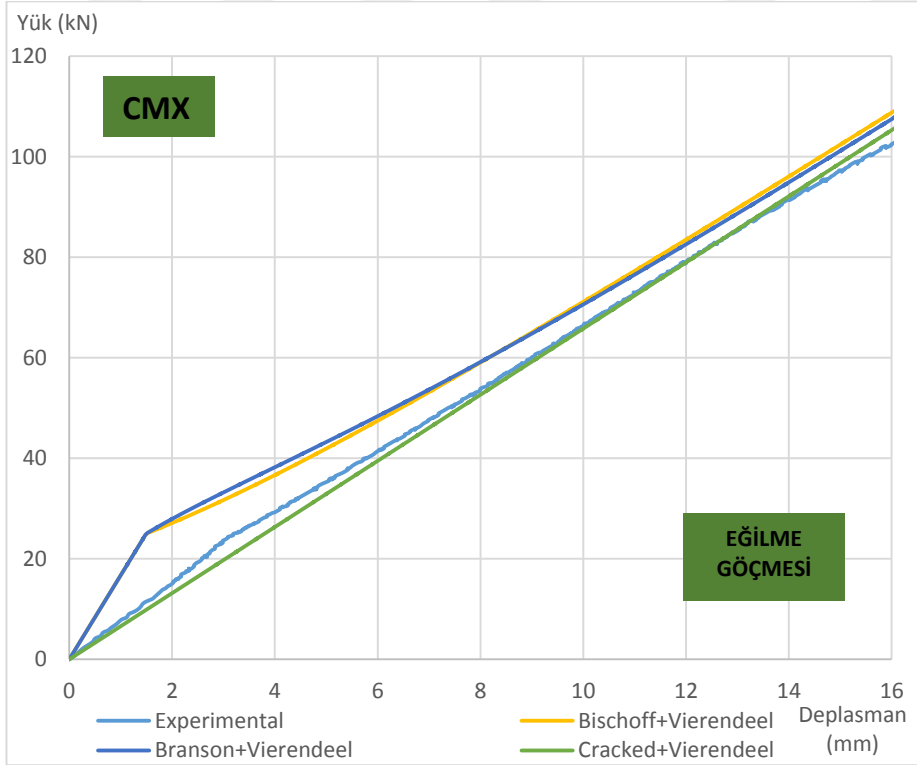
Şekil 4.4. RCcb Kirişi Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Yüksek, Çelik Kablolu)



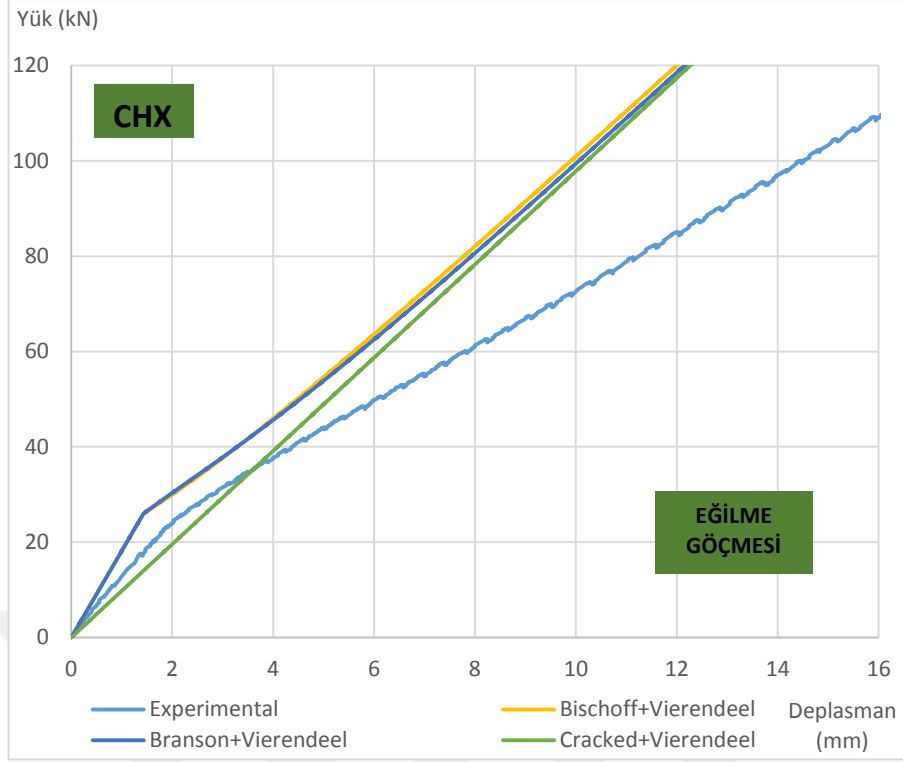
Şekil 4.5. RCxcb Kirişi Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Yüksek, Çapraz Donatılı ve Çelik Kablolu)



Şekil 4.6. CLX Kirişi Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Düşük, Çapraz Donatılı)



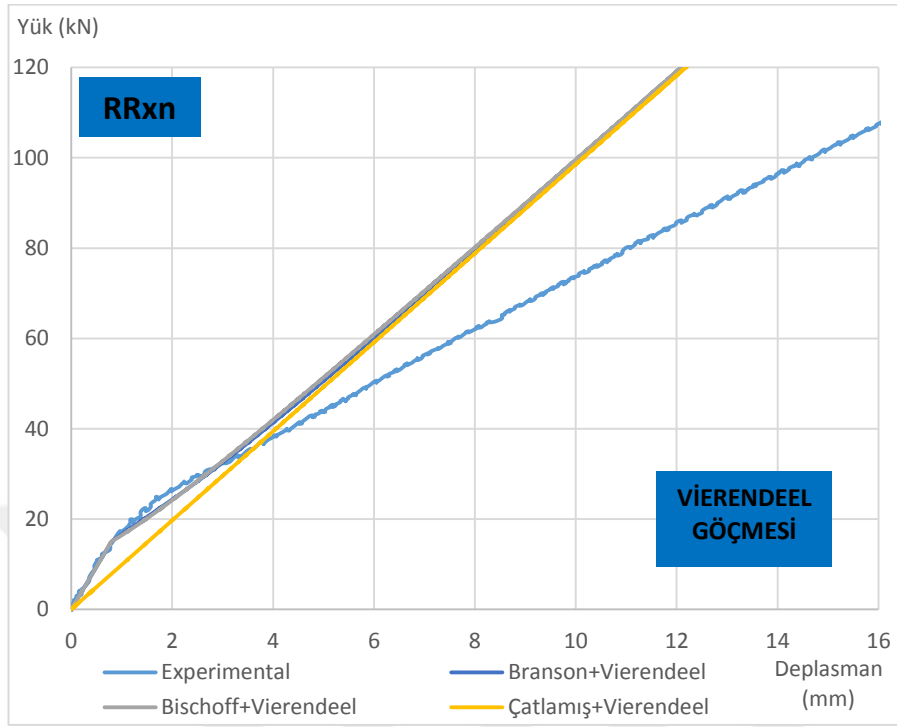
Şekil 4.7. CMX Kirişi Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Normal, Çelik Kablolu)



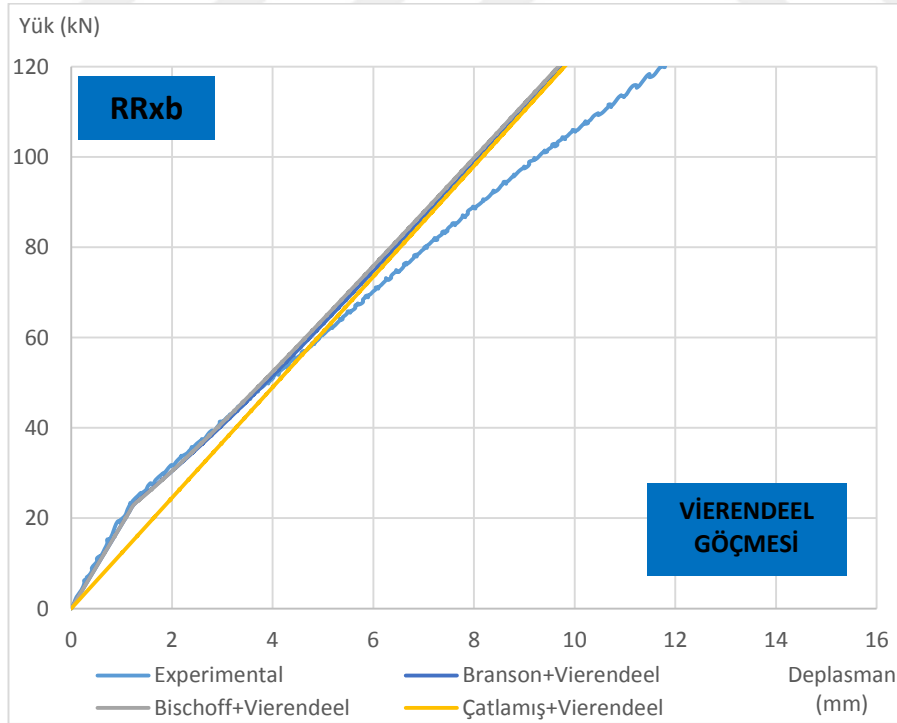
Şekil 4.8. CHX Kirişi Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Yüksek, Çelik Kablolü)

Dairesel boşluklu kirişlerin neredeyse tamamında kırılma eğilme taşıma gücüne ulaşılmasıyla gerçekleşmiştir. Deneysel yük-sehim eğrileri ile analitik yük-sehim eğrileri belirli yük değerlerine kadar paralel ilerlemiş bir noktada kesişmiş ve daha sonra ayrı bir yol izlemiştir. Bu kesişme noktalarının yaklaşık yük değerleri küçükten büyüğe doğru $RCb:45$ kN, $RCcb:60$ kN, $RCxb:70$ kN, $RCxcb:130$ kN şeklindedir. Donatı miktarları aynı olan bu dört kirişte bu durumun numunelerde çapraz donatının ve dikmelerde etriyenin varlığına bağlı olduğu düşünülmektedir. Hem çapraz donatı hem de dikmelerinde etriye bulunduran $RCxcb$ kirişinde yüksek yükleme değerlerine kadar deneysel eğri analitik eğri ile uyumlu olmakta iken çapraz donatı ve dikmelerinde etriye bulundurmeyen RCb kirişinde kırılma kesme taşıma gücüne ulaşılmasıyla oluşmuş ve düşük yükleme değerinde eğriler arasındaki uyum bozulmuştur. Çapraz donatı ve dikmelerde etriye kullanımı, istenmeyen kesme göçmesini önlemede, taşıma kapasitesini artırmada katkıda bulunmuş olup kirişlerin Vierendeel panel davranışı yerine daha sünek olan basit eğilme davranışına yönelmelerini sağlamıştır.

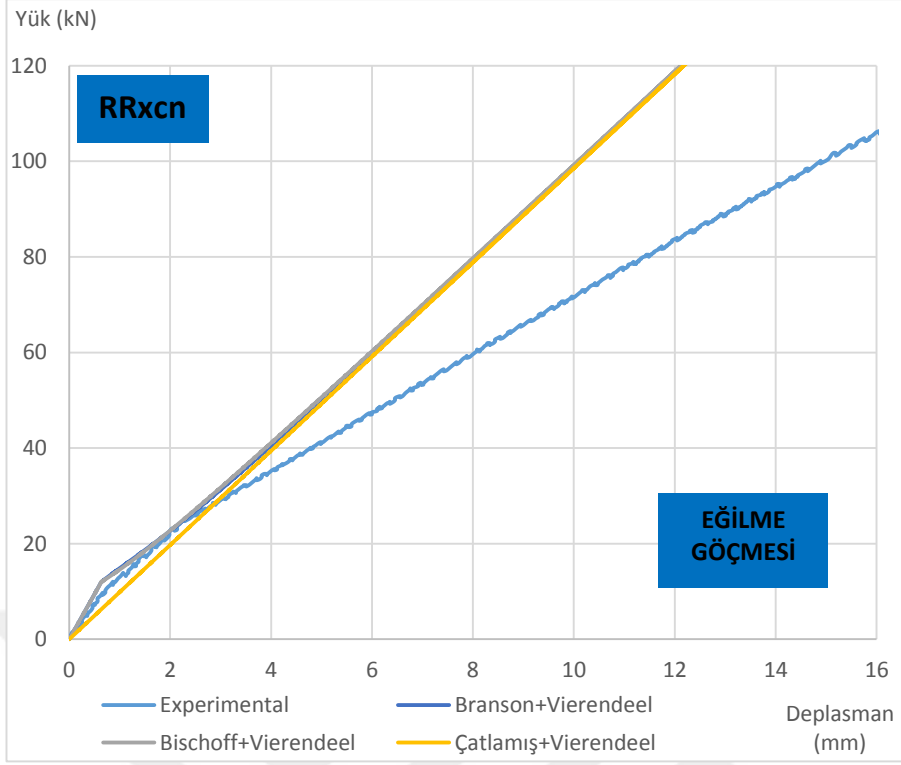
4.2.2. Kare Boşluklu Deney Kirişlerinin Yük-Sehim (kN-mm) Grafikleri



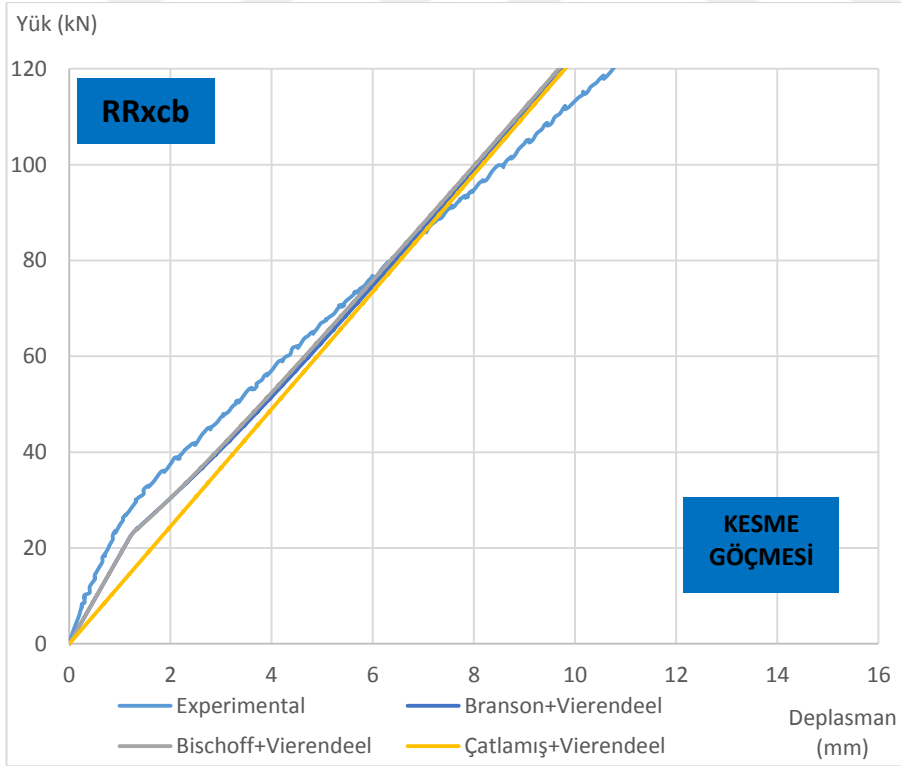
Şekil 4.9. RRxn Kirişi Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Normal, Çapraz Donatılı)



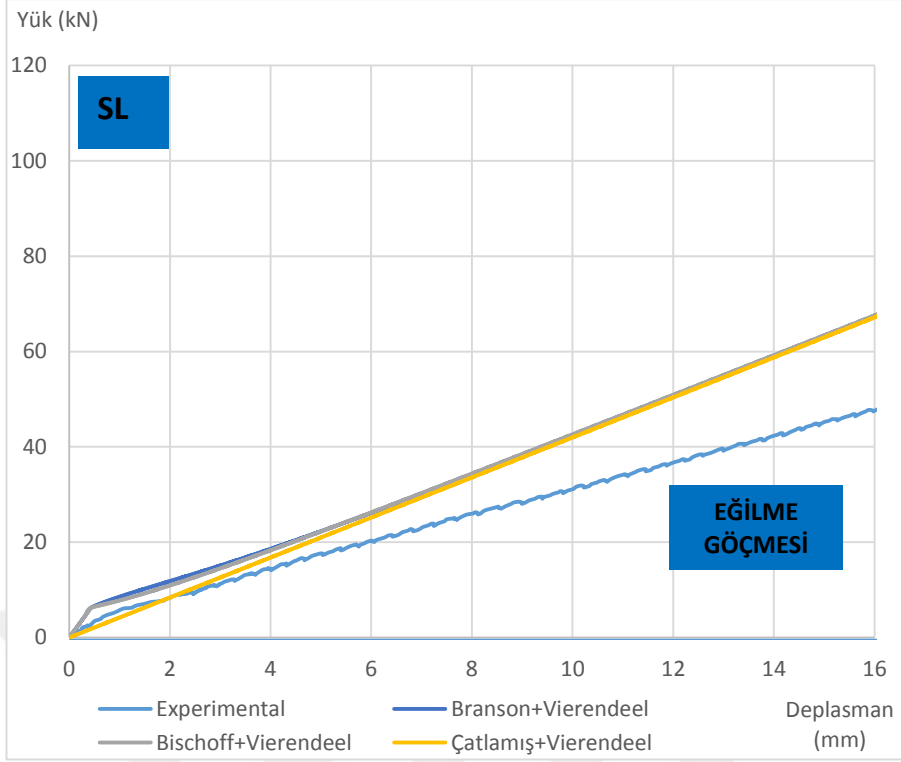
Şekil 4.10. RRxb Kirişi Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Yüksek, Çapraz Donatılı)



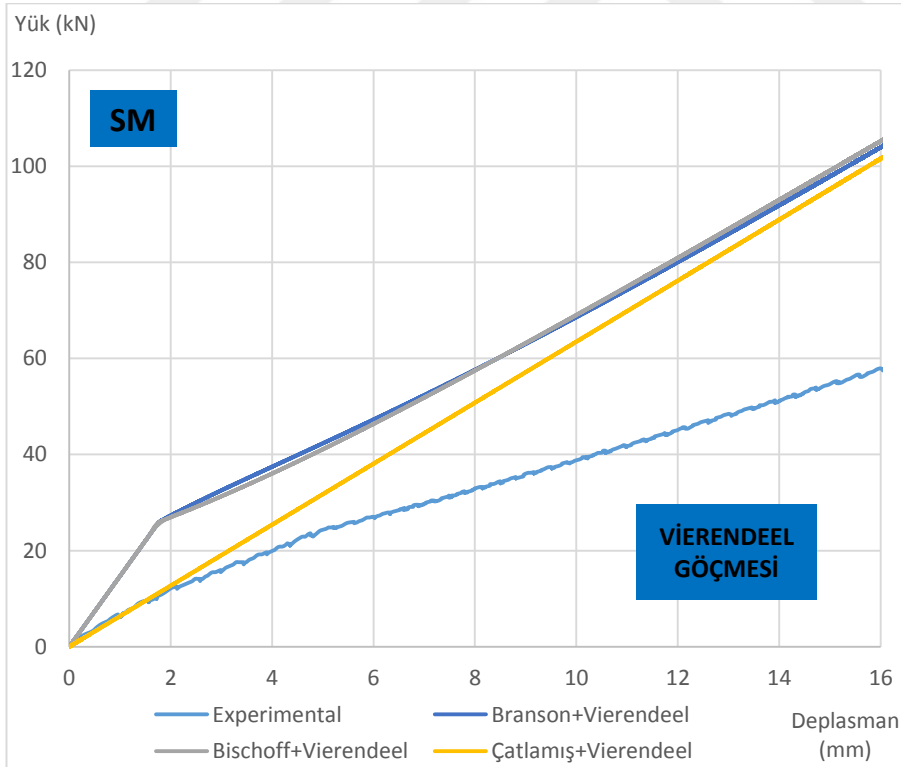
Şekil 4.11. RRxcn Kirişi Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Normal, Çapraz Donatılı ve Çelik Kablolü)



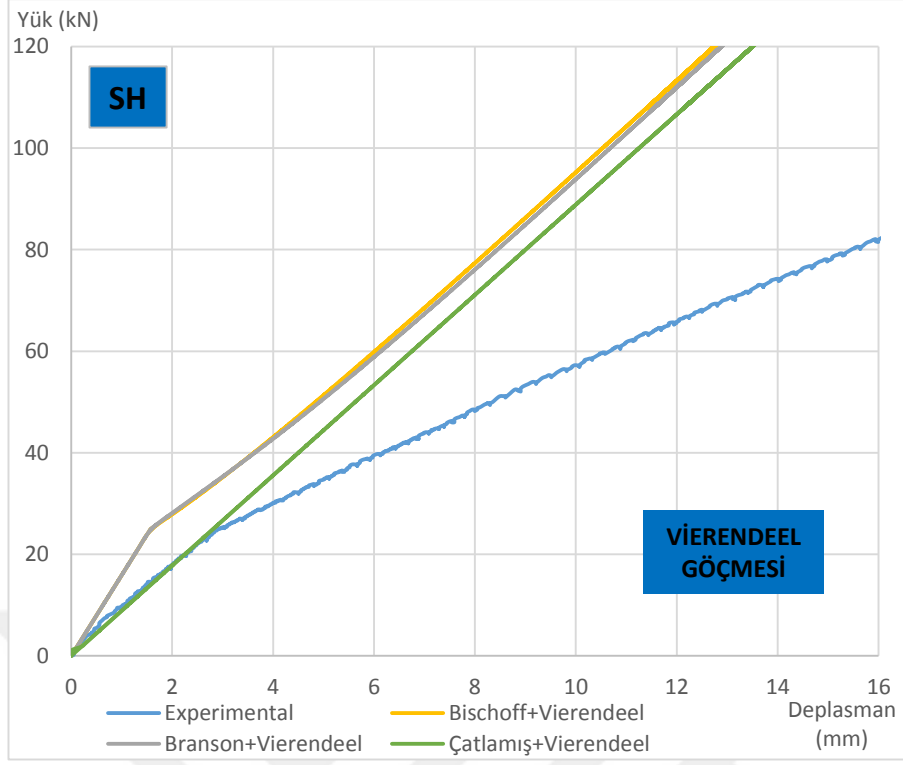
Şekil 4.12. RRxcb Kirişi Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Yüksek, Çapraz Donatılı ve Çelik Kablolü)



Şekil 4.13. SL Kirişi Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Düşük)



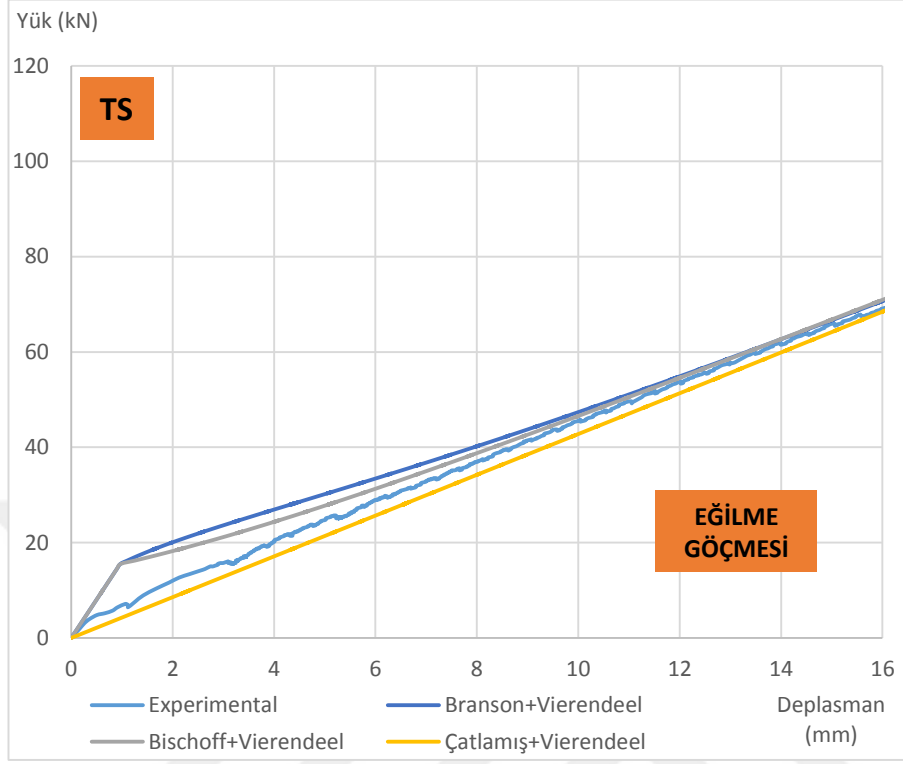
Şekil 4.14. SM Kirişi Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Normal)



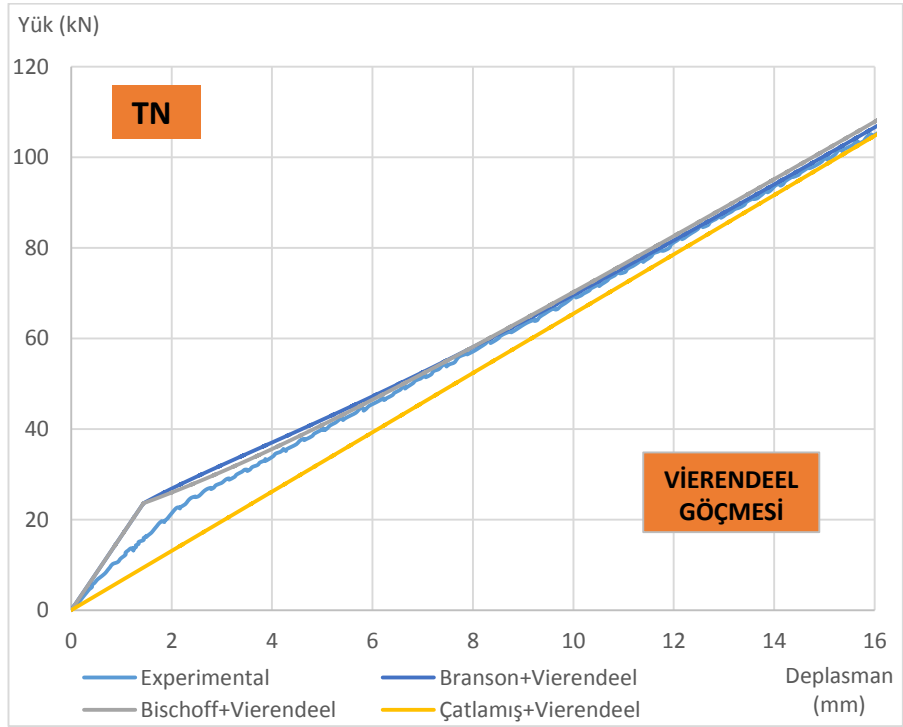
Şekil 4.15. SH Kirişi Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Yüksek)

Kare boşluklu kirişlerin bir kısmında kırılma, eğilme taşıma gücüne ulaşılmasıyla gerçekleşmiş bir kısmında da boşluk köşelerinde plastik mafsallar oluşmasıyla Vierendeel panel davranışı nedeniyle erken göçme gerçekleşmiştir. Dairesel boşluklu kirişlere nazaran kare ve üçgen boşluklu kirişlerde Vierendeel panel davranışının daha fazla numunede görülmesi durumunun boşlukların köşe noktalarında oluşan gerilme birikmelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. RRxn ve RRxb kirişlerinde Vierendeel, RRxcn kirişinde eğilme göçmesi oluşmuştur. Bu durum için RRxcn kirişinin dikmelerinde kullanılan etriyelerin çapraz donatılar ile birlikte kesme etkisini karşıladığı Vierendeel panel davranışı ile kirişin göçme durumuna ulaşmasını önleyerek kirişi basit eğilme davranışına yönelttiği düşünülmektedir.

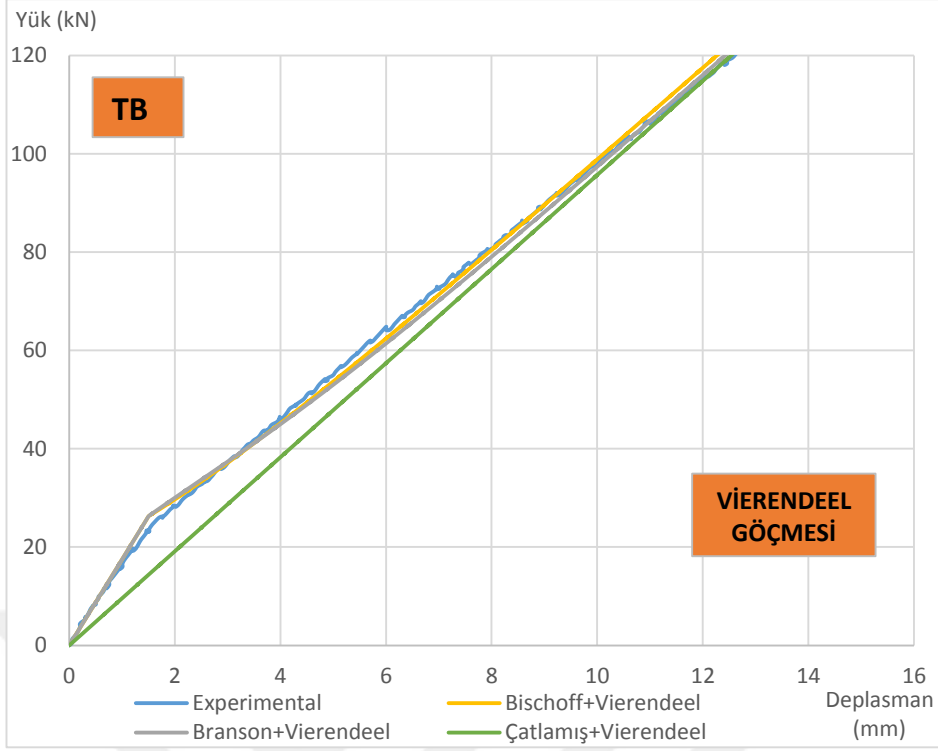
4.2.3. Üçgen Boşluklu Deney Kirişlerinin Yük-Sehim (kN-mm) Grafikleri



Şekil 4.16. TS Kirişi Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Düşük)



Şekil 4.17. TN Kirişi Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Normal)



Şekil 4.18. TB Kirişi Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Yüksek)

Farklı geometrik şekillerde boşluklara sahip betonarme kirişlerin yük sehim grafiklerine bakıldığında özellikle kare ve dairesel boşluklu kirişlerde analitik sehim eğrileri ile deneysel sehim eğrileri arasında uyumun oldukça az olduğu görülmüştür. Keskin köşeleri bulunmadığı için boşluk çevresinde daha düzenli bir gerilme dağılımına sahip dairesel boşluklu kirişlerin analitik ve deneysel eğrileri arasındaki uyumun, keskin köşelerinde bulundurduğu gerilme birikmeleri ve yoğunlaşmaları sebebiyle bu köşelerde ilave çatlamalara maruz kalan kare boşluklu kirişlerin ilgi eğrileri arasındaki uyuma göre önemli derecede yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, dairesel boşluklu kirişlerde deneysel eğrinin analitik eğri ile çakıştığı nokta, kare boşluklu kirişlerdeki ilgili noktaya göre daha yüksek bir yük değerine tekabül etmektedir. Başka bir deyişle, analitik sehim formülleri, dairesel boşluklu kirişlerde kare boşluklu kirişlere göre daha büyük yük değerlerine kadar güvenli (deneysel değerlerin altında) sonuçlar vermektedir.

Üçgen boşluklu kirişlerde deneysel sehım değerleri ile analitik değerler arasındaki uyumun son derece iyi olduğu ve deneysel değerlerin analitik değerleri fazla aşmadığı görölmektedir. Bu durumun, üçgen boşluklu kirişlerde boşluklar arasında kalan betonarme kısımların dikme değil çapraz çubuklar şeklinde olmasından kaynaklandığı düşünölmektedir. Üçgen boşlukların kenarları boyunca uzanan bu çapraz çubuklar, bir boşluğın altında kalan kirişçik ile diğer boşluğun üstünde kalan kirişçik arasında yük iletimini sağlayarak kirişin daha rijit davranmasını ve sehım değerlerinin azalmasını sağlamıştır.

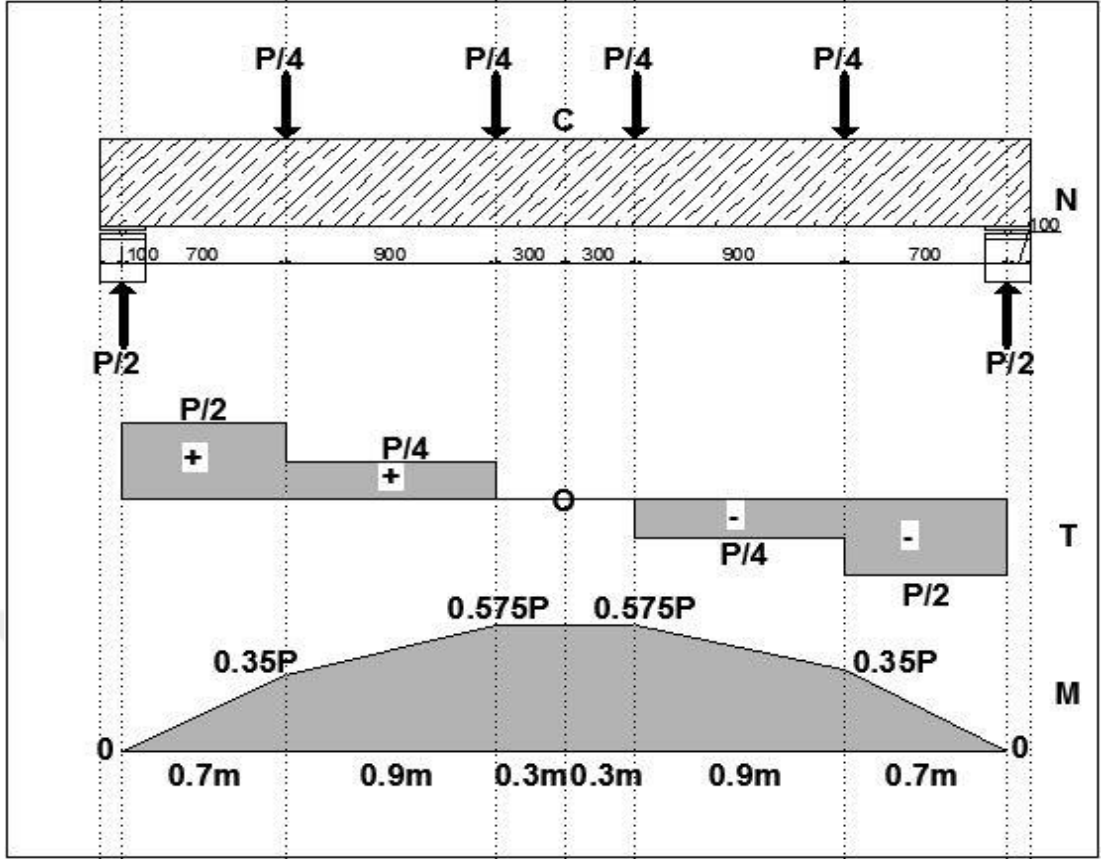
Bütün deney kirişlerinin eğilme deformasyonlarının hesaplanmasında Bischoff [23] ve Branson [17] etkili eylemsizlik momenti formüllerinin kullanımının önemli farklılıklara neden olmadığı elemanların yük-sehım eğrilerinden görölmektedir.

4.3. Düzeltme Katsayısı ' α ' nın Hesaplanması

Boşluklar sebebiyle kirişin eğilme ve kayma rijitliklerinde meydana gelen azalmalar ve boşlukların çevresindeki gerilme birikimleri sebebiyle, Vierendeel panel formülü ile hesaplanan sehim değerlerinin eğilme sehim değerlerine eklenmesiyle elde edilen hesap değerlerinin düzenli boşluklu betonarme kirişlerin tasarım sehimlerinin hesabı için yetersiz kaldığını görülmüştür. Bölüm 4.1'de yer alan grafiklerde de görüldüğü üzere, analitik sehim değerlerinin deneysel sehim değerlerine yaklaşması için bir α katsayısı ile çarpılmasının gerekli olduğu düşünülmüştür. Bu α katsayısı deneysel sehimlerin analitik sehimlere oranı ile bulunmuştur.

Kirişlerin yükleme durumu ve bu yükleme durumuna göre elde edilen eğilme-momentini diyagramlarında da görüldüğü üzere (Şekil 4.19) kirişlerdeki maksimum eğilme momenti $0,575P$ 'dir. Burada plastik mafsal uzunluğu ise $0,575m$ 'dir. 4.00 metre uzunluğa sahip kirişlerin plastik mafsal uzunluğu, Dündar'ın [3] deney kirişleri olan ve Kalkan [4] tarafından incelenen RR_{xn} , RR_{xcn} , RR_{xb} , RR_{xcb} , RCb , $RCcb$, $RCxb$, $RCxcb$ kirişlerinde $0,625$ m, Aykaç vd. [1] deney kirişleri olan SL , SM , SH , CLX , CMX , CHX kirişlerinde $0,575m$, Aykaç ve Yılmaz [2] deney kirişleri olan TS , TN , TB kirişlerinde ise $0,575m$ alınmıştır.

Farklı donatı oranlarına sahip deney kirişlerinin eğilme momenti hesabında Todeschini vd. [18] beton gerilme-birim deformasyon modelinde gösterilen iç kuvvetlerin tarafsız eksene göre momenti alınmıştır. Kirişlerin servis (kullanım) yükü betonarme kirişler için Eurocode 2 yönetmeliğinde [19] ön görülen kullanım momenti değerlerine göre belirlenmiştir. Eurocode 2 yönetmeliği [19] kirişlerin kullanım yükleri altında en dış basınç lifinde; kısa süreli yüklemeler neticesinde $0.45.f_{ck}$ gerilmenin, uzun süreli yüklemelerde zaman içerisinde ortaya çıkan sünme deformasyonlarının da etkisiyle kirişin en dış basınç lifinde $0.6.f_{ck}$ gerilmenin ortaya çıktığını belirtmektedir. Bu yaklaşım ile betonun basınç dayanımının yüzde altmışına karşılık gelen eğilme momentinin, kirişin yükleme durumuna göre elde edilen eğilme momenti $0,575.P_{sr}$ ifadesine eşitlenmesiyle servis yükü elde edilmiştir.



Şekil 4.19. Kirişlerin Yükleme Durumu, Kesme ve Moment ve Sehim Diyagramları

Her grup kiriş için α katsayısı belirlenirken öncelikle servis yüklerine P_{sr} karşılık gelen deneysel sehim değerleri δ_{exp} bulunmuştur. Daha sonra eğilme sehim değerleri δ_{an} Denklem 3.13'te, kesme sehim değerleri δ_v ise Denklem 3.17'de P_{sr} servis (kullanım) yükünün kullanılmasıyla hesaplanmıştır. Her bir kiriş için servis yüklerine karşılık gelen deney sehim değerlerinin analitik sehim değerlerinin toplamına (δ_t) oranı yardımı ile α katsayıları belirlenmiştir.

Analitik sehim değerleri, Bischoff [23] eğilme sehim değerlerine kesme sehimleri ilave edilerek bulunmuştur. Burada α katsayısı belirlenirken analitik sehim değerlerinin hesabında Branson [17] yerine Bischoff [23] etkili eylemsizlik momenti formülünün kullanılmasının başlıca sebebi donatı oranı düşük olan kirişlerde Bischoff [23] yaklaşımının Branson [17] yaklaşımına göre daha makul sehim değerleri verdiği görüşünün yaygın olmasıdır. Ancak Bölüm 4.2'deki grafiklerde de

görüldüğü üzere bu iki yaklaşımla elde edilen analitik eğriler birbirleriyle oldukça uyumludur.

Farklı geometrik şekillerde düzgün boşluklara sahip kiriş grupları için ayrı ayrı ortalama birer katsayı elde edilmiştir. RCb kirişi diğer dairesel boşluklu kirişlerden farklı olarak kesme göçmesine uğramış ve genel davranış olan eğilme göçmesine uğrayan kendi deney grubundaki dairesel boşluklu kirişlere göre deneysel sehim değerleri yüksek çıkmıştır. Eğilme taşıma gücüne ulaşarak kırılma gerçekleşen dairesel boşluklu kiriş grubu için ayrı bir α katsayısı hesaplanmıştır. Ancak bu değer RCb kirişinin de ortalama değere katılmasıyla elde edilen toplam α_C katsayısı değerinden uzak olmadığı görülmüştür. Bu nedenle düzgün dairesel boşluklu kirişlerin toplam düzeltme katsayısı hesaplanırken RCb kirişinin δ_{exp} / δ_t oranı toplam ortalama değer (α_C) hesabında kullanılmıştır.(Çizelge 4.1)

RRxcb kirişi diğer kare boşluklu kirişlerden farklı olarak kesme göçmesine uğradığı için genel davranış olan eğilme ve Vierendeel panel davranışı ile göçmeye uğrayan kare boşluklu kirişler için ayrı ayrı düzeltme katsayısı hesaplanırken RRxcb kirişinin δ_{exp} / δ_t oranı ortalama değer hesabında kullanılmıştır. Kare boşluklu kirişlerde Vierendeel panel davranışı ile göçmeye uğrayan numuneler için hesaplanan $\alpha=1.66$ değeri eğilme göçmesine uğrayan numuneler için hesaplanan $\alpha=1.49$ değerinden %10 fazla çıkmıştır. Bu miktarın tasarım sehimlerinin hesabında göz ardı edilebileceği düşünülmektedir. Ancak düzenli kare boşluklu betonarme kirişlerin kullanım yükü tasarım sehimlerinin hesabında güvenli tarafta kalınması amacıyla kare boşluklu kirişler için hesaplanan en büyük α katsayısı olan 1.66 değeri kullanılmıştır. (Çizelge 4.2)

Çizelge 4.1. Dairesel Boşluklu Kirişlerin Sehim ve ' α_c ' Katsayısı Değerleri

Dairesel Boşluklu Kirişler					
Kiriş	Kırılma Şekli	Servis Yüğü (kN)	Deneyisel Sehim δ_{exp} (mm)	Toplam Analitik Sehim (Bischoff+Vierendeel) δ_t (mm)	Oran(δ_{exp}/δ_t)
RCcb	Eğilme	101.35	8.81	7.53	1.17
RCxb	Eğilme	106.19	8.86	7.96	1.11
RCxcb	Eğilme	106.19	7.96	7.87	1.01
CLX	Eğilme	59.57	12.19	12.17	1.00
CMX	Eğilme	69.08	10.30	9.66	1.07
CHX	Eğilme	85.78	12.10	8.40	1.44
				Eğilme Ortalama:	1.13
RCb	Kesme	101.35	9.9	7.51	1.32
				Toplam Ortalama:	1.16 (α_c)
				Standart Sapma:	0.16

Çizelge 4.2. Kare Boşluklu Kirişlerin Sehim ve ' α_s ' Katsayısı Değerleri

Kare Boşluklu Kirişler					
Kiriş	Kırılma Şekli	Servis Yüğü (kN)	Deneyisel Sehim δ_{exp} (mm)	Toplam Analitik Sehim (Bischoff+Vierendeel) δ_t (mm)	Oran(δ_{exp}/δ_t)
RRxb	Vierendeel	101.35	10.12	8.13	1.24
RRxn	Vierendeel	87.23	12.95	8.72	1.49
SH	Vierendeel	85.78	17.31	8.93	1.94
SM	Vierendeel	64.90	18.42	9.30	1.98
				Vierendeel Ortalama:	1.66
RRxcn	Eğilme	87.23	13.30	8.77	1.52
SL	Eğilme	56.99	19.45	13.39	1.45
				Eğilme Ortalama:	1.49
RRxcb	Kesme	101.35	8.99	8.13	
				Toplam Ortalama:	1.53 (α_s)
				Standart Sapma:	0.33

Çizelge 4.3. Üçgen Boşluklu Kirişlerin Sehim ve ' α_T ' Katsayısı Değerleri

Üçgen Boşluklu Kirişler					
Kiriş	Kırılma Şekli	Servis Yüğü (kN)	DeneySEL Sehim δ_{exp} (mm)	Toplam Analitik Sehim (Bischoff+Vierendeel) δ_t (mm)	Oran(δ_{exp}/δ_t)
TS	Eğilme	56.99	12.23	12.59	0.97
TN	Vierendeel	64.90	9.44	9.12	1.04
TB	Vierendeel	85.78	8.56	8.58	1.00
				Ortalama:	1.00 (α_T)
				Standart Sapma:	0.03

7 dairesel boşluklu ve 7 kare boşluklu deney kirişi grupları için kayma deformasyonlarının da toplam sehimlere katıldığı analitik sehim değerlerinin deneysel sehim değerlerine oranı alınarak hesaplanan ve bu oranların aritmetik ortalaması alınarak elde edilen α katsayılarına bakıldığında bunların 1.00 değerinden fazla olduğu görülmüştür. Bu durum kirişin göçme moduna (Vierendeel, eğilme, kesme) bağlı olmaksızın gövdesinde düzenli boşluklar bulunduran kirişlerde boşluk çevresinde oluşan kayma deformasyonlarının etkisiyle ortaya çıkan ilave sehimlerin servis yükü değerlerinde ihmal edilemeyecek seviyelere ulaştığını göstermektedir.

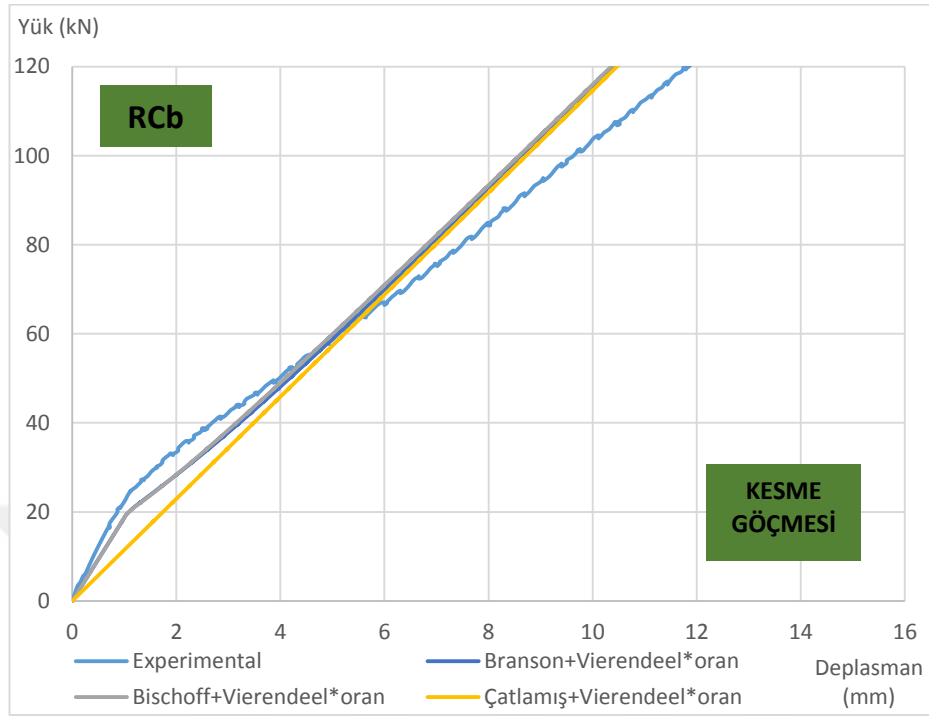
Düzenli üçgen boşluklu TS, TN, TB kirişlerinin yük sehim eğrilerine bakıldığında deneysel eğri ile analitik eğrilerin diğer geometrik boşluklu kirişlere nazaran birbiriyle daha çok örtüştüğü görülmekte ve hesaplanan α katsayısının 1.00 değerinde bulunması bu kirişlerin deneyler esnasında kafes kiriş gibi davranmış olması ile açıklanabilir. (Çizelge 4.3)

4.4. Analitik Şehim Eğrilerinin Yeniden Düzenlenmesi

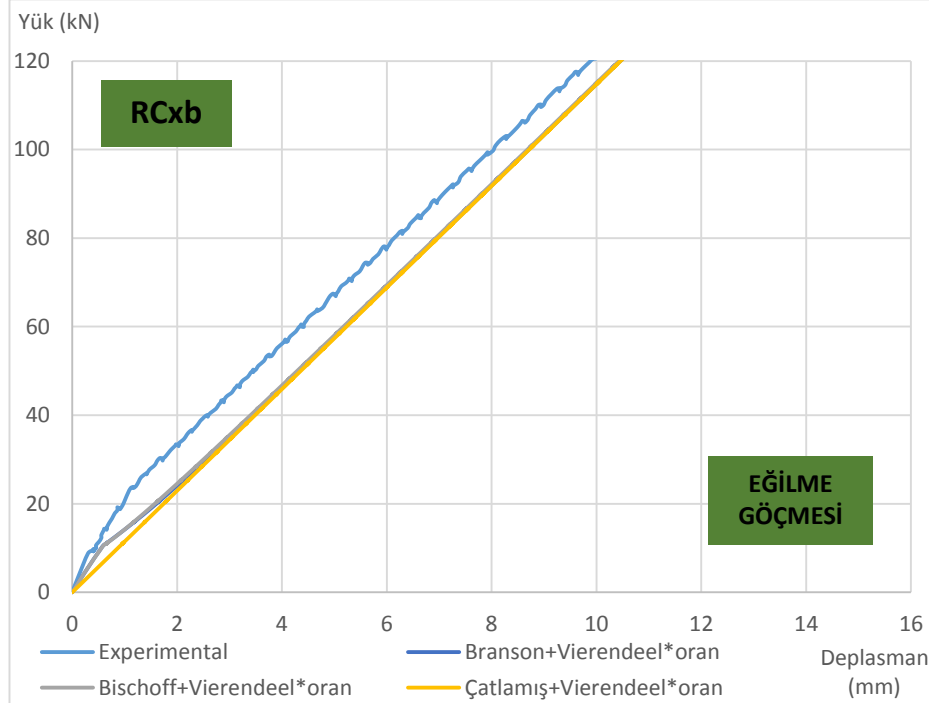
Düzenli boşluklu betonarme kirişlerin analitik şehim eğrilerinin deneysel şehim eğrileriyle daha uyumlu hale gelmesi ve bu kirişlerin tasarımında boşluk etkisiyle oluşan gerilme birikmeleri ile kayma deformasyonları göz önünde bulundurulurken daha sağlıklı bir yaklaşım izlenmesi için Bölüm 4.3'te α katsayıları geliştirilmiştir. Bölüm 4.1'de yer alan grafiklerdeki analitik şehim eğrileri Bölüm 4.3'te her boşluk geometrisi için belirlenen katsayılar ile çarpılarak “Branson+Vierendeel”, “Bischoff+Vierendeel”, “Çatlamış+Vierendeel” analitik şehim eğrileri yeniden düzenlenmiştir.



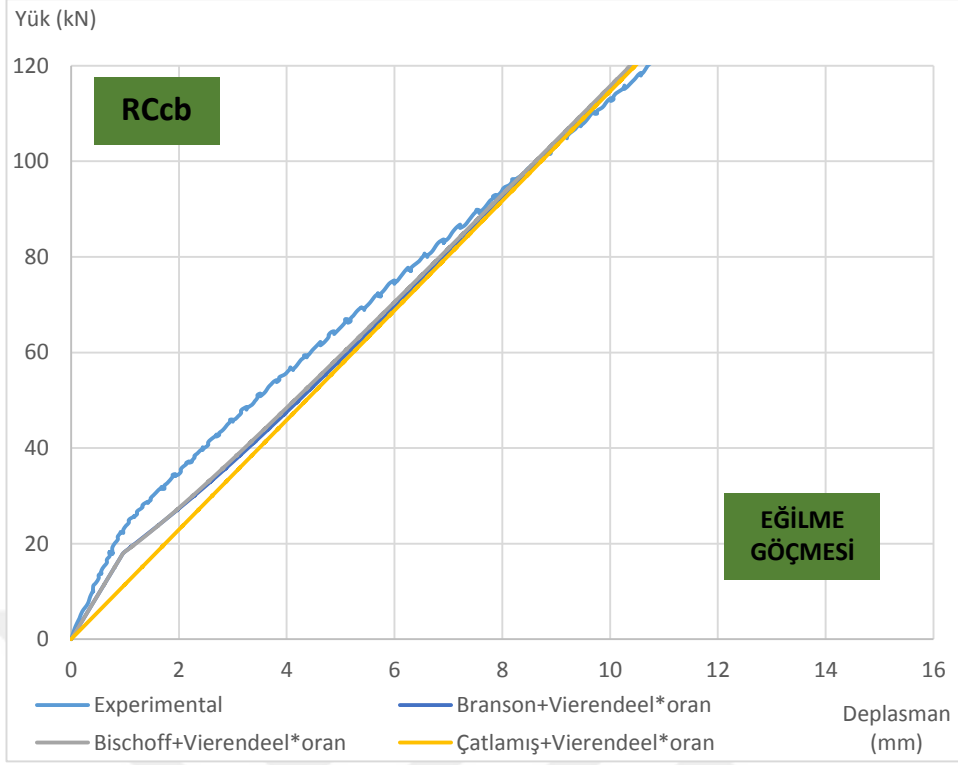
4.4.1. Dairesel Boşluklu Deney Kirişlerinin Revize Yük-Sehim (kN-mm) Grafikleri



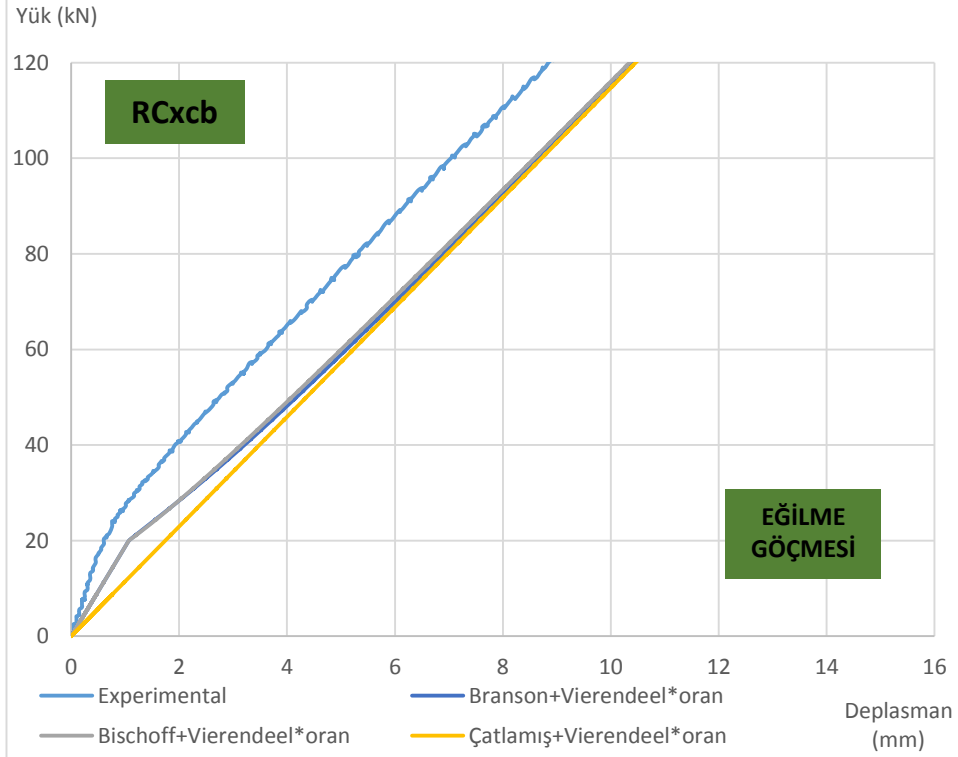
Şekil 4.20. RCb Kirişi Revize Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Yüksek)



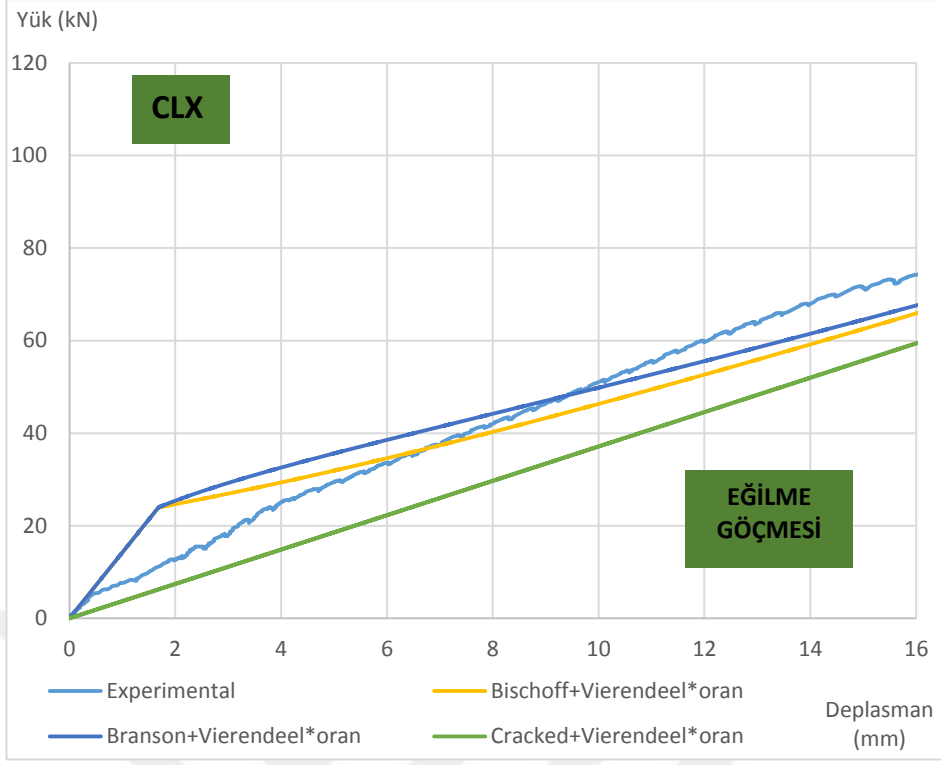
Şekil 4.21. RCxb Kirişi Revize Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Yüksek, Çapraz Donatılı)



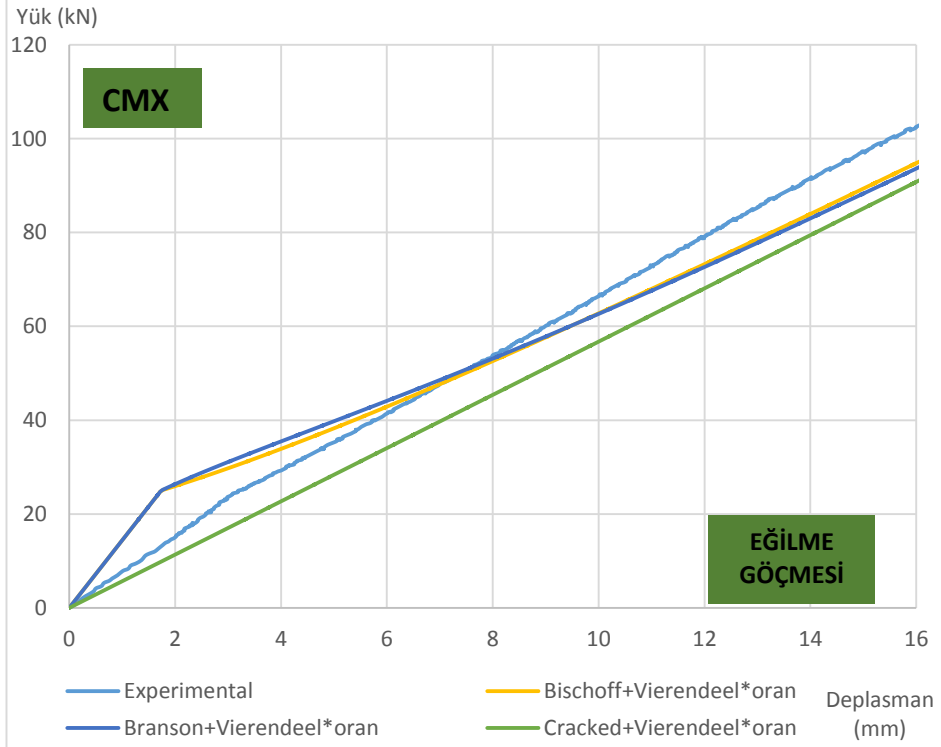
Şekil 4.22. RCcb Kirişi Revize Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Yüksek, Çelik Kablolu)



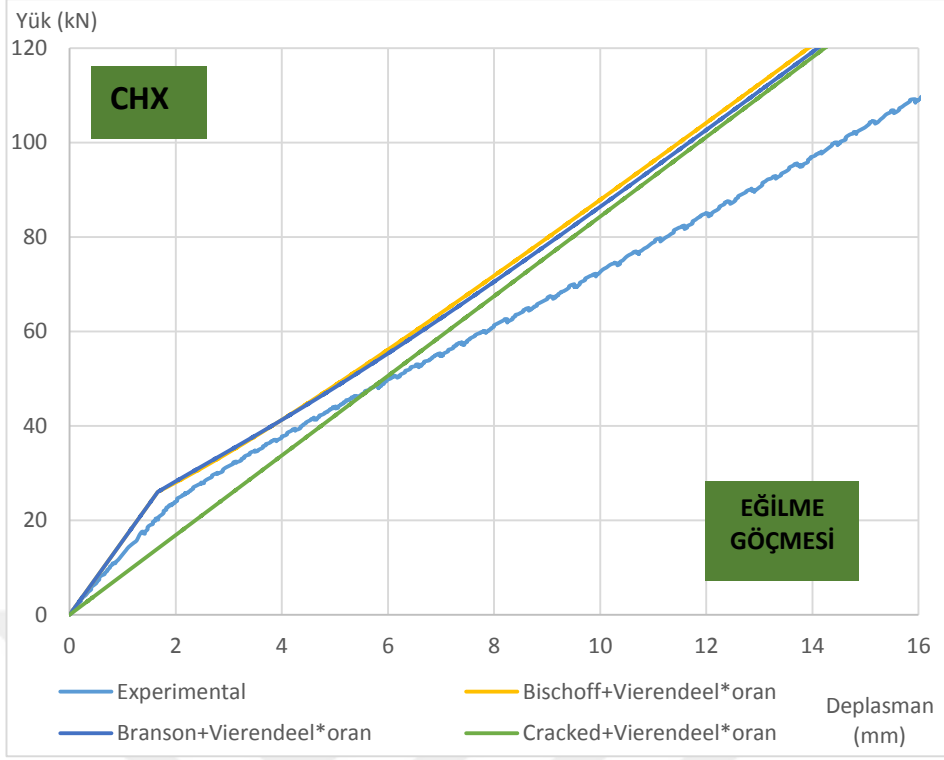
Şekil 4.23. RCxcb Kirişi Revize Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Yüksek, Çapraz Donatılı ve Çelik Kablolu)



Şekil 4.24. CLX Kirişi Revize Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Düşük, Çapraz Donatılı)

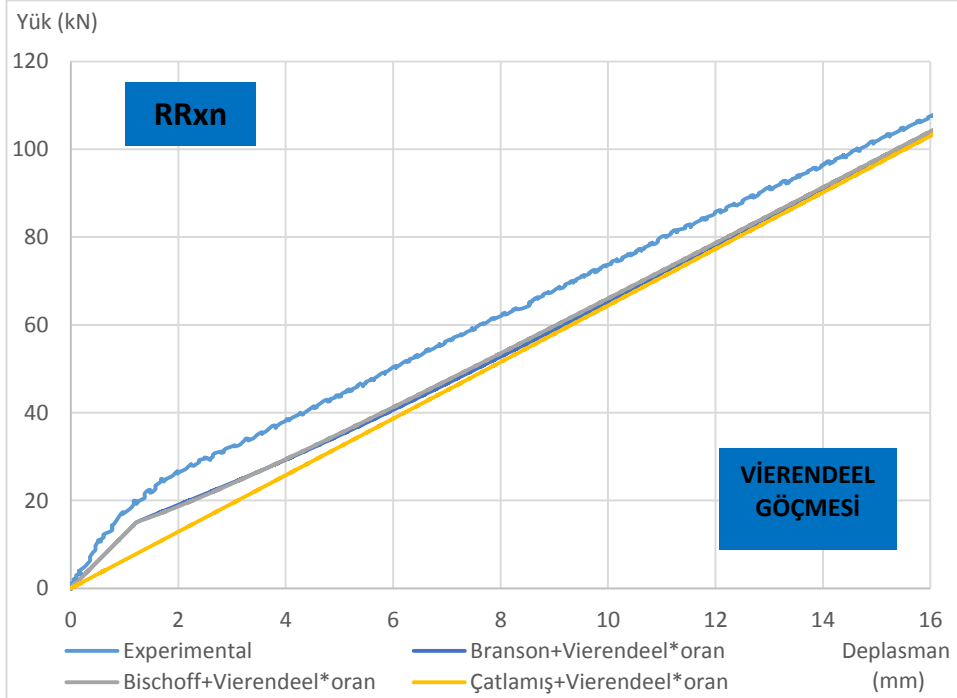


Şekil 4.25. CMX Kirişi Revize Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Normal, Çelik Kablolu)

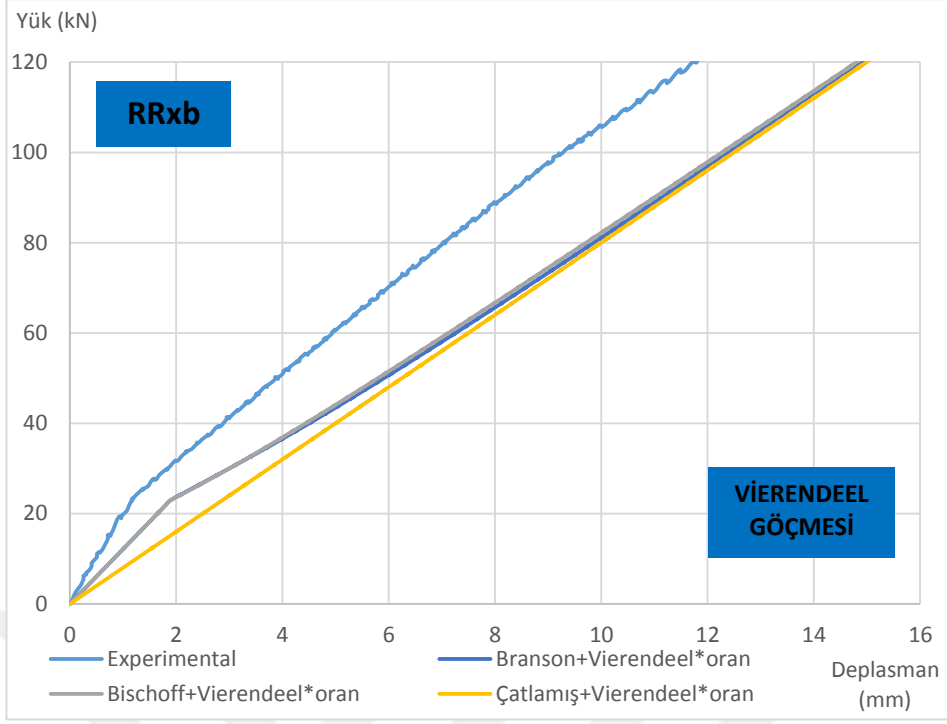


Şekil 4.26. CHX Kirişi Revize Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Yüksek, Çelik Kablolu)

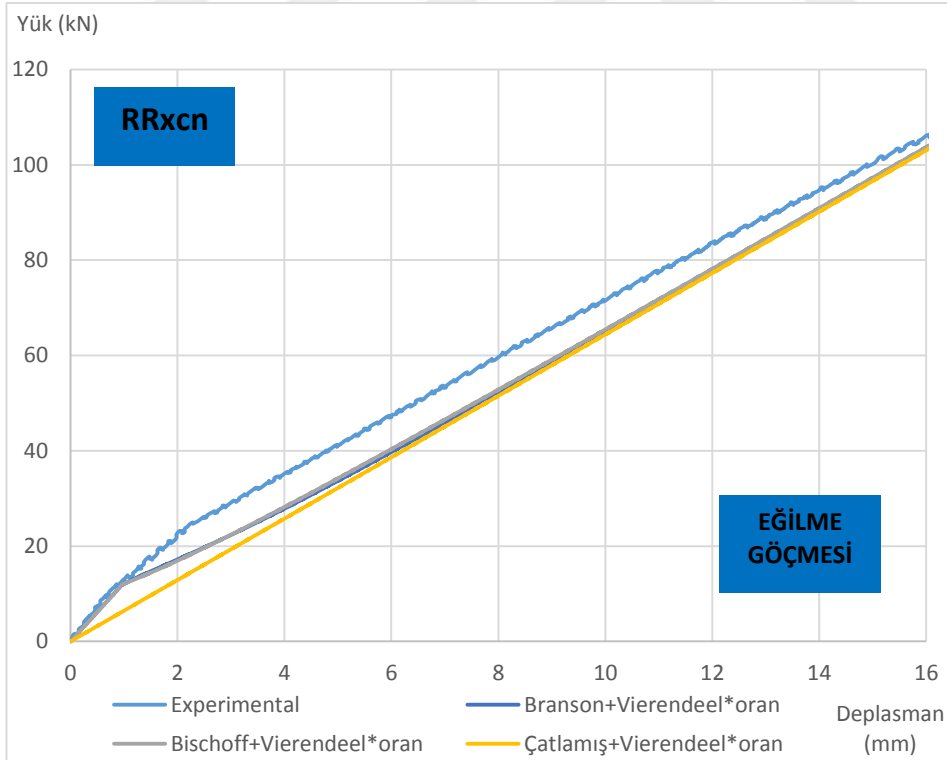
4.4.2. Kare Boşluklu Deneysel Kirişlerin Revize Yük-Sehim (kN-mm) Grafikleri



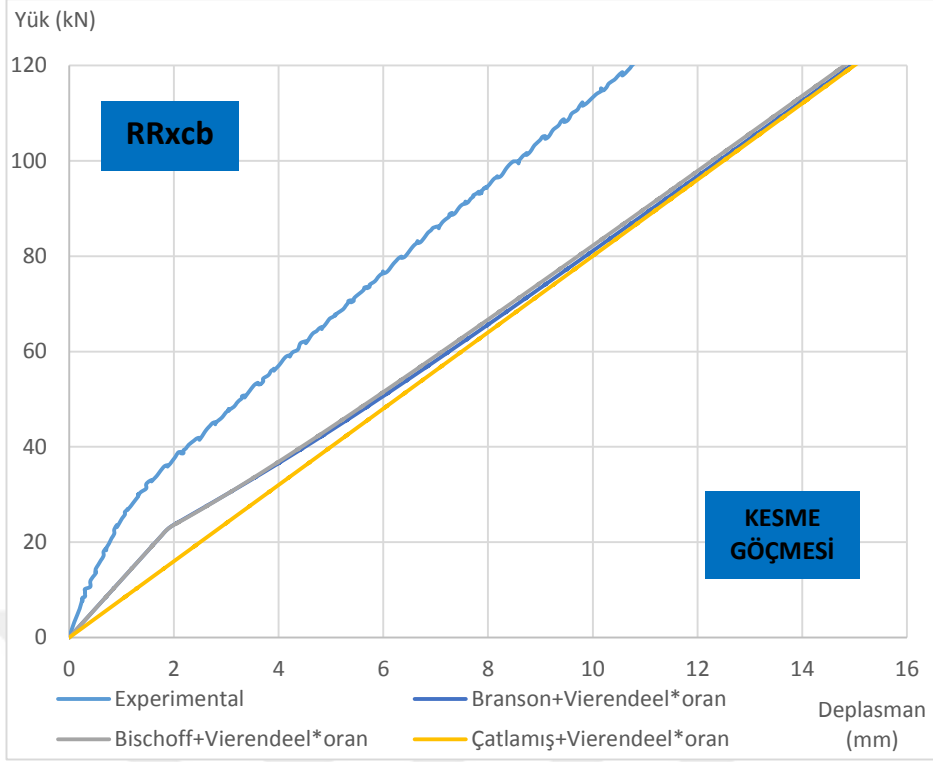
Şekil 4.27. RRxn Kirişi Revize Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Normal Çapraz Donatılı)



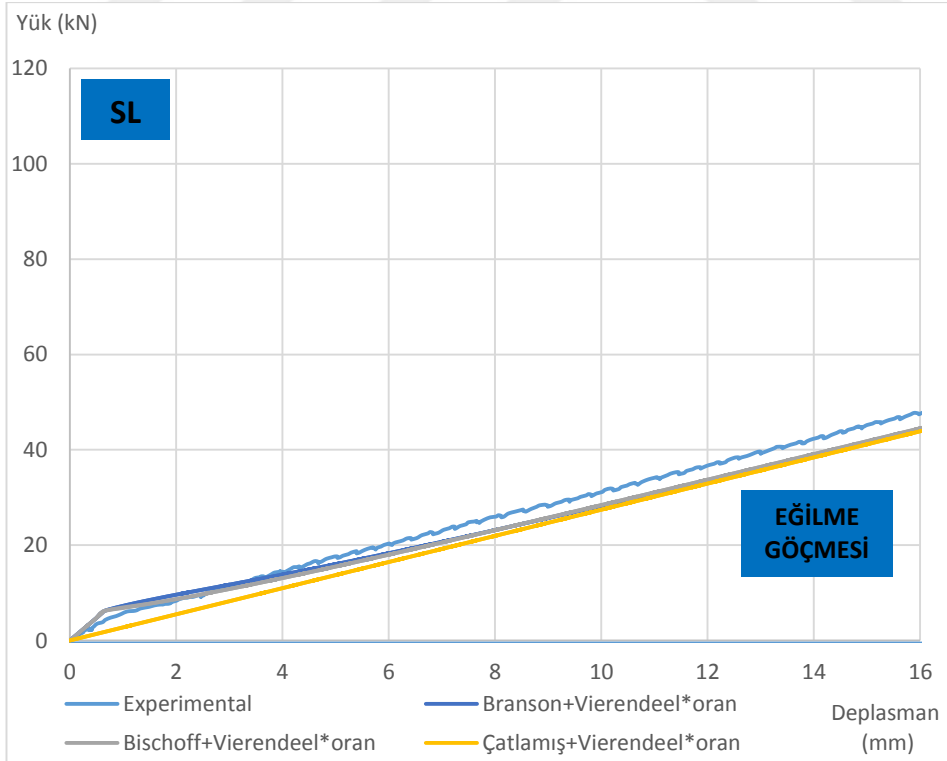
Şekil 4.28. RRxb Kirişi Revize Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Düşük, Çapraz Donatılı)



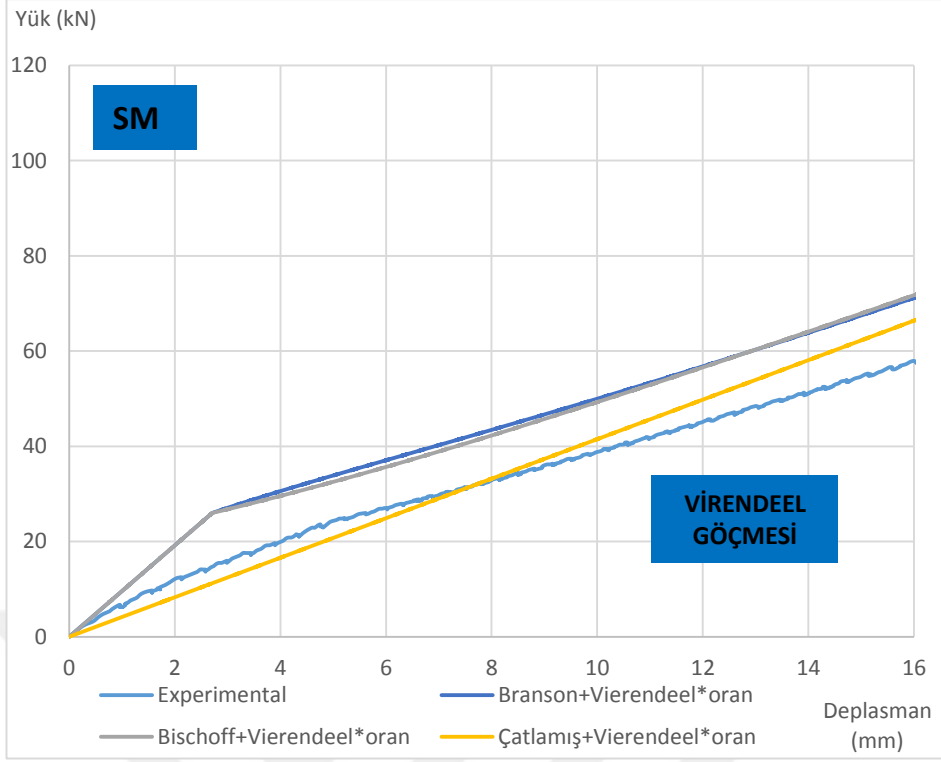
Şekil 4.29. RRxcn Kirişi Revize Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Normal, Çapraz Donatılı ve Çelik Kablolu)



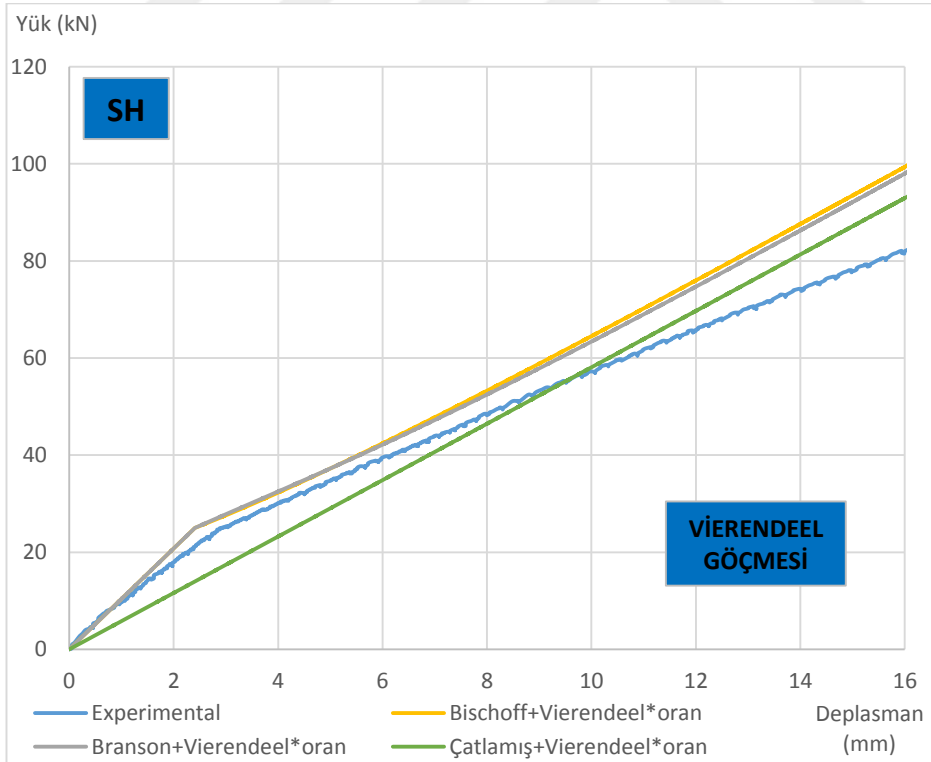
Şekil 4.30. RRxcb Kirişi Revize Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Yüksek, Çapraz Donatılı Ve Çelik Kablolu)



Şekil 4.31. SL Kirişi Revize Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Düşük)



Şekil 4.32. SM Kirişi Revize Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Normal)



Şekil 4.33. SH Kirişi Revize Yük-Sehim Grafiği (Donatı Oranı Düşük)

Düzenli kare ve dairesel boşluklu kirişlere ait analitik eğrilerin Bölüm 4.3'te belirlenen katsayılar ile çarpılarak düzenlenmiş hallerinin deneysel eğrilerle yakın bir seyir izlemekte olduğu görülmektedir. Kirişlerin donatı oranlarının artması çapraz donatı, dikmelerde etriye kullanılması ile deneysel ve analitik sehim eğrilerinin kesişme noktalarının daha büyük yük değerlerinde gerçekleştiği, eğrilerin birbirinden uzaklaşma eğiliminin daha ileri bir anda ve artan sehim değerlerinde olduğu görülmüştür.

RRxcb, RRxb, RCxcb kirişlerinin diğer kirişlerden farklı olarak analitik hesaplarla bulunan sehim eğrilerinin α katsayıları ile çarpılmasına rağmen deneysel sehim eğrilerine göre daha düşük kalması bu kirişlerin donatı oranının yüksek olması ve beklenenden daha rijit davranmış olması ile açıklanabilir. Ancak bu kirişlerde aynı yük değerlerine karşılık hesaplanan analitik sehim değerlerinin deneysel sehim değerinden yüksek olması tasarım esnasında hesaplanan sehimin güvenli tarafta kalmasını sağlayacaktır.

4.5. Toplam Analitik Sehim Formüllerinin Elde Edilmesi

Düzenli boşluklu betonarme kirişlerde Kalkan [4] tarafından elde edilen eğilme (δ_{an}) ve kesme (δ_v) etkisi sonucu oluşan analitik sehim formüllerinin toplamı (δ_t), her bir boşluk geometrisi için elde edilen ve Çizelge 4.1-4.2’de yer alan α katsayıları ile çarpılıp yeniden yazıldığında; daire, kare ve üçgen boşluklu betonarme kirişler için aşağıdaki sehim formülü elde edilmiştir.

$$\delta_t = \alpha \cdot P \left(\frac{0,344 \cdot 10^9}{E_c \cdot I_{ef}} + \frac{0,680 \cdot 10^9}{(EI)_{eq}} + \frac{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{I_e}{2}\right)^3 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{I_e}{2}\right)^3}{12 \cdot E_c \cdot (I_t + I_b)} \right) \quad \alpha = \begin{cases} 1.00, & \text{üçgen boşluk} \\ 1.16, & \text{daireysel boşluk} \\ 1.66, & \text{kare boşluk} \end{cases} \quad (4.6)$$

Üçgen gövde boşluklu betonarme kirişler için α katsayısı değeri 1.00 bulunduğu için analitik sehim formülleri yalın haliyle kullanılabilir. Ancak düzenli üçgen boşluklu deney elemanları sayısının artırılması sayesinde daha sağlıklı sonuçlar elde edilebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada Dünder [4] , Eğriboz [12] ve Yılmaz [15] tarafından Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında test edilen ve Aykaç vd. [1] ile Kalkan [4] tarafından incelenen 5'i referans, 7'si kare, 7'si dairesel ve 3'ü üçgen geometrili boşluklara sahip düzenli boşluklu betonarme kirişlerin deneysel sehim değerleri kullanılmıştır. Deneyler sonucu elde edilmiş yük-sehim eğrileri ile numunelerin eğilme ve kesme deformasyonları neticesinde oluşan toplam analitik sehim değerlerinin uyumu incelenmiştir.

Deney elemanlarının değişkenleri olan boşluk geometrisinin, boyuna donatı miktarının ve kayma deformasyonlarına karşı önlem olarak alınan özel donatıların, analitik hesaplarda kesitlerin etkili eylemsizlik momenti değerlerine, taşıma gücü kapasitelerine, eğilme ve kayma deformasyonlarına etkileri irdelenmiştir. Mevcut analizlerde, daha önce Kalkan [4] tarafından düzenli gövde boşluklu betonarme kirişler için geliştirilen eğilme ve kayma deformasyon formülleri kullanılmıştır. Bu formüllerden elde edilen değerlerin toplanmasıyla ulaşılan kullanım yükü sehimlerinin, kirişlerin deney sehimlerine yaklaştırılması amacıyla bir katsayı geliştirilmiş ve bu katsayı yardımıyla Kalkan'ın [4] sehim formülü yeniden düzenlenmiştir. Kirişlerin kullanım yüklerinin belirlenmesinde Eurocode 2 [19] yönetmeliğinin öngördüğü en dış basınç lifi gerilme değeri ($0,6.f_{ck}$) kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında yapılan detaylı analizler sonucu aşağıdaki önemli sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Kirişlerin analitik ve deneysel yük-sehim eğrilerinin yaklaşımı incelendiğinde analitik sehim eğrilerinin deneysel sehim eğrilerinin altında kaldığı görülmüştür. Bu nedenle boşluklu betonarme kirişlerin göçme moduna bakılmaksızın servis yükleri altında boşluklar etrafında oluşan kayma deformasyonları ile sehimlerin hesaplarda dikkate alınması gereklidir.

2. Betonarme kirişlerin gövdesinde her bir boşluk geometrisi için servis yüklerine karşılık gelen deneysel ve analitik sehım değerlerinin oranı ile elde edilen katsayılar analitik sehım eğrilerini deneysel sehım eğrilerine yaklaştırmıştır. Bu katsayılar ile yeniden düzenlenen eğilme ve kesme sehım formülleri boşluklu betonarme kirişlerin tasarım aşamasında taşıma gücü kapasitesine karşılık gelen sehımlerin kontrolü açısından daha sağlıklı sonuçlar verecektir.

3. Daire boşluklu kirişlerin neredeyse tamamında eğilme taşıma gücüne ulaşılması ile kırılma gerçekleşmiştir. Daire boşluklu kirişlere nazaran kare ve üçgen boşluklu kirişlerde Vierendeel panel davranışı neticesinde göçme durumu daha fazla numunede görülmüştür. Tasarım için istenmeyen Vierendeel panel davranışı ile göçme durumunun kare ve üçgen boşlukların köşe noktalarında oluşan gerilme birikmelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Üçgen ve kare boşluklar etrafındaki kirişçiklere gelen aksel yüklerin daire boşluklu kirişlere göre daha dar bir alana aktarılmış olması bu kirişleri kesme dayanımı açısından daha zayıf duruma getirmektedir. Deney çalışmalarında da daire boşluklu kirişlerin taşıma gücü, dayanım, enerji tüketimi ve süneklik açısından daha elverişli olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle estetik gereklilik olmadıkça düzenli boşluklu betonarme kirişlerde boşluk geometrisi olarak daire boşluğun seçilmesi uygun olacaktır.

4. Tüm kirişlerde deneysel yük-sehım eğrileri ile analitik yük-sehım eğrileri belirli yük değerlerine kadar paralel ilerlemiş bir noktada kesişmiş ve daha sonra ayrı bir yol izlemiştir. Bu kesişme noktaları boyuna donatı miktarları aynı olan daire boşluklu RCb, RCcb, RCxb, RCxcb kirişlerinde sırasıyla daha yüksek yük değerlerine karşılık gelmiştir. Bu durumun donatı miktarları aynı olan bu dört kirişte 'c' donatısı yani dikmelerde etriyenin varlığı ile 'x' donatısı yani boşlukları saran çapraz donatının varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Düzenli boşluklu betonarme kirişlerde çapraz donatı ve dikmelerde etriye kullanımının; istenmeyen kesme göçmesini önlediği, taşıma kapasitesini artırmada katkıda bulunduğu, kirişlerin Vierendeel panel davranışı yerine daha sünek olan basit eğilme davranışına yönelmelerini sağladığı düşünülmektedir. Ayrıca, kesme göçmesine karşı alınan bu önlemler sayesinde, analitik eğrilerle deneysel eğilme eğrileri arasındaki uyumun daha yüksek yük değerlerine kadar korunabildiği belirlenmiştir.

5. Bu çalışmada boşluklu kirişlerin kullanım yükü analitik sehimlerinin deney sehimlerine göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle dairesel boşluklu kirişlerin tasarım hesaplarında toplam sehimlerin %16 oranında artırılması uygun olacaktır. Betonarme kirişlerin tasarım aşamasında yükler altında nasıl davranış göstereceği, kirişte hangi kırılma türünün gerçekleşeceği net olarak tahmin edilememektedir. Bu nedenle kare boşluklu kirişlerde gerçekleştirilecek göçme modu ayırt edilmemesinin kullanım yükü toplam sehimlerinin %66 oranında artırılması kare boşluklu betonarme kirişlerin tasarım sehimlerinin güvenli tarafta kalmasını sağlayacaktır.

6. Üçgen boşluklu kirişlerde, analitik ve deneysel kullanım yükü sehim değerlerinin yakın olduğu ve hesaplanan kullanım yükü sehimlerinin bir katsayı yardımıyla artırılmasına gerek olmadığı belirlenmiştir. Üçgen boşlukların keskin köşelerinde ortaya çıkması beklenen gerilme birikmelerinin sehimler üzerinde olumsuz etkilerde bulunması beklenirken, deneysel sehim değerleri ile analitik değerlerin birbiriyle bu kadar uyumlu çıkmasının, üçgen boşluklu kirişlerde boşluklar arasında kalan betonarme kısımların dikme değil çapraz çubuklar şeklinde olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Üçgen boşlukların kenarları boyunca uzanan bu çapraz çubuklar, bir boşluğun altında kalan kirişçik ile diğer boşluğun üstünde kalan kirişçik arasında yük iletimini sağlayarak kirişin daha rijit davranmasını ve sehim değerlerinin azalmasını sağlamıştır. Yani boşluklar arasında kalan dikmeler, birer basınç çubuğu vazifesi görmüştür.

7. Gövdelerinde aynı boşluk geometrisine sahip olan kiriş gruplarını kendi içinde kıyasladığımızda boyuna donatı miktarının artması ile kullanım yüklerine karşılık gelen deneysel ve analitik sehim değerleri azalmıştır. Özellikle kare boşluklu kirişlerin deneysel ve analitik yük-sehim eğrileri incelendiğinde boyuna donatı miktarının artması ile eğrilerin kesişim noktalarına tekabül eden yük ve sehim değerlerinin artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durumda boşluklu betonarme kirişlerde analitik sehim değerlerinin sınırlandırılması için boyuna donatı miktarının artırılması önerilmektedir.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada dairesel, kare ve üçgen geometrili düzenli gövde boşluklarına sahip betonarme kirişlerin kullanım yükleri altında yapacakları düşey sehimlerin tahmin edilebilmesinde kullanılacak formüller geliştirilmiştir. Mevcut betonarme yapı yönetmelik ve standartlarında boşluklu kirişlerin kullanılabilirlik sınır durumlarını belirleyen formüller bulunmadığı için, bu çalışmada geliştirilen sehim formülünün bu eksiği gidermesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda, literatürde düzenli üçgen, kare ve dairesel boşluklu bütün deney kirişlerine ait sehim verileri analiz edilmiş olup Kalkan tarafından geliştirilmiş sehim formüllerinden elde edilen analitik değerlerle kıyaslanmıştır. Analitik verilerin deneysel sonuçlarla uyumlu hale getirilmesi için her bir boşluk geometrisi için katsayılar belirlenmiştir. Bu katsayılar ile yeniden düzenlenen sehim formüllerine yapısal betonarme yönetmeliklerinde yer verilmesi bundan sonraki çalışmalarda boşluklu betonarme kirişlerin tasarım hesaplarında faydalı olacaktır.

Mevcut tez çalışmasında 7 dairesel 7 kare 3 üçgen düzenli boşluklu betonarme kiriş kullanılmış olup son yıllarda rağbet görmeye başlayan betonarme ve öngerilmeli beton kirişlerde düzenli boşluk bırakılması tasarım şeklinin yaygınlaşması için deney çalışmaları ve incelenen numune sayısı artırılabilir, bu kirişlerin kullanılabilirliği için tasarım esasları geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

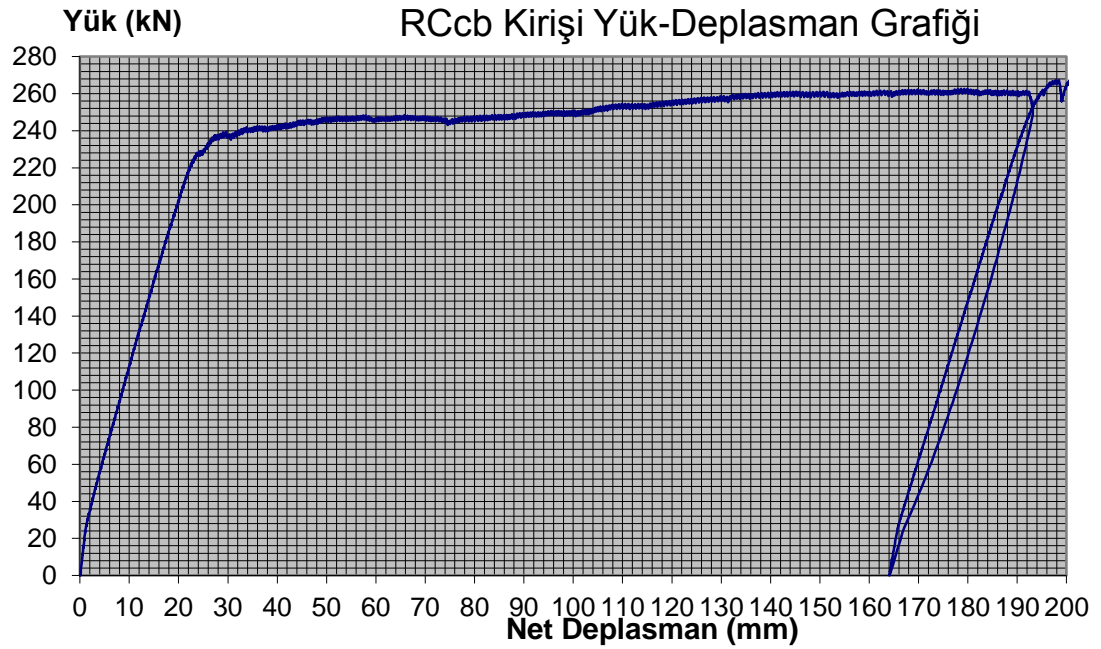
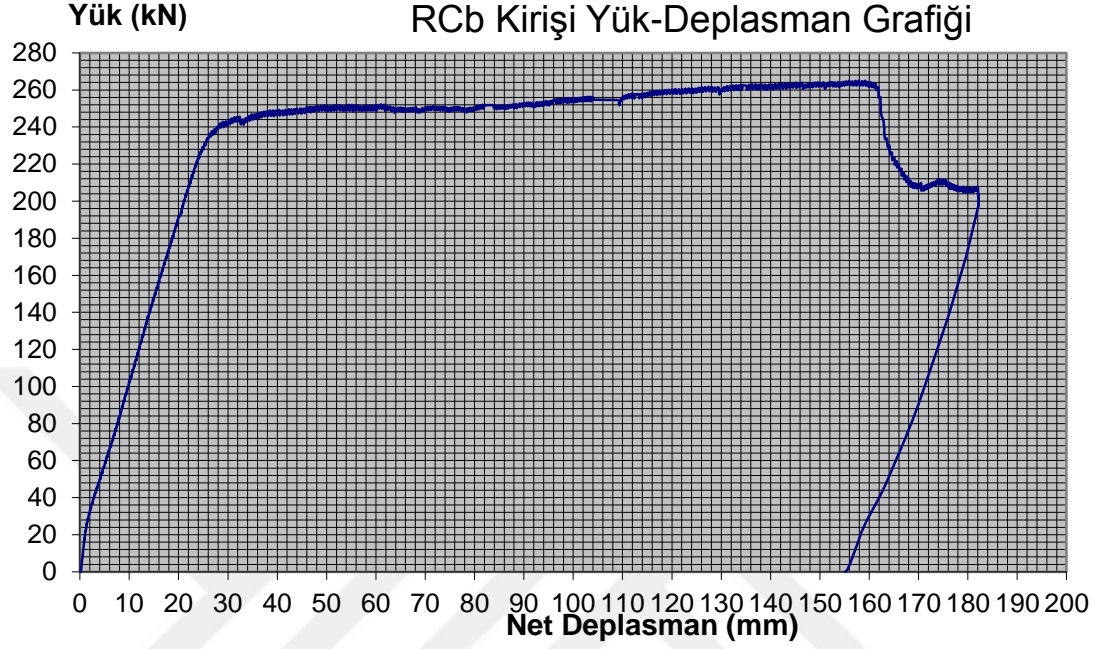
- [1] Aykac, B., Kalkan, I., Aykac, S., Egriboz, Y.E., Flexural Behavior of RC Beams with Regular Square or Circular Web Openings. Eng. Struct., 56: 2165-2174, 2013.
- [2] Aykac, S., Yilmaz, M.C., Düzenli Üçgen veya Daire Boşluklara Sahip Betonarme Kirişlerin Davranış ve Dayanımı. Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26(3): 711-718, 2011.
- [3] Dündar, B., Düzenli Boşluklara Sahip Betonarme Kirişlerin Davranış ve Dayanımı. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [4] Kalkan, İ., Düzenli Boşluklu Betonarme Kirişlerin Düzlem İçi Eğilme Davranışları. Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29 (1): 155-163, 2014.
- [5] Mansur M. A., Lee Y. F., Tan K. H. ve Lee S. L., Tests on R/C Continuous Beams with Openings, Journal of Structural Engineering, cilt 117, no. 6, pp. 1593-1606, 1991.
- [6] Tan K. H., Mansur M. A. ve Huang L. M., Reinforced Concrete T-Beams with Large Web Openings in Positive and Negative Moment Regions, Structural Journal, cilt 93, no. 3, pp. 277-289, 1996.
- [7] Ashour A. F. ve Rishi G., Tests of Reinforced Concrete Continuous Deep Beams with Web Openings, Structural Journal, cilt 97, no. 3, pp. 418-426, 2000.
- [8] ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (318R-95), American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 369 pp, 1995.

- [9] Tan K. H., Mansur M. A. ve Wei W., Design of Reinforced Concrete Beams with Circular Openings, Structural Journal, cilt 3, no. 98, pp. 407-415, 2001.
- [10] Yang K. H., Eun H. C. ve Chung H. S., The Influence of Web Openings on the Structural Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Deep Beams, Engineering Structures, cilt 28, no. 13, pp. 1825-1834, 2006.
- [11] Yang K. H. ve Ashour A. F., Structural Behaviour of Reinforced-Concrete Continuous Deep Beams with Web Openings, Magazine of Concrete Research, cilt 59, no. 10, pp. 699-711, 2007.
- [12] Eğriboz, Y. E., Düzenli Kare veya Daire Bosluklara Sahip Betonarme Kirişlerin Davranış ve Dayanımı. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [13] Amiri S. ve Masoudnia R., Investigation of the Opening Effects on the Behavior of Concrete Beams Without Additional Reinforcement in Opening Region Using Fem Method, Australian Journal of Basic and Applied Sci, cilt 5, no. 5, pp. 617-627, 2011.
- [14] TS 500, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartlar Enstitüsü, 22-24, 2000.
- [15] Yılmaz, M. C., Eğriboz, Düzenli Üçgen veya Daire Bosluklara Sahip Betonarme Kirişlerin Davranış ve Dayanımı. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [16] PTC (2014), Mathcad 14. M020 [Bilgisayar Yazılımı].
- [17] Branson, D.E., Instantaneous and Time-Dependent Deflections of Simple and Continuous Reinforced Concrete Beams, HPR Report 7-1, Alabama Highway Department, Bureau of Public Roads, Alabama, A.B.D., 1965.

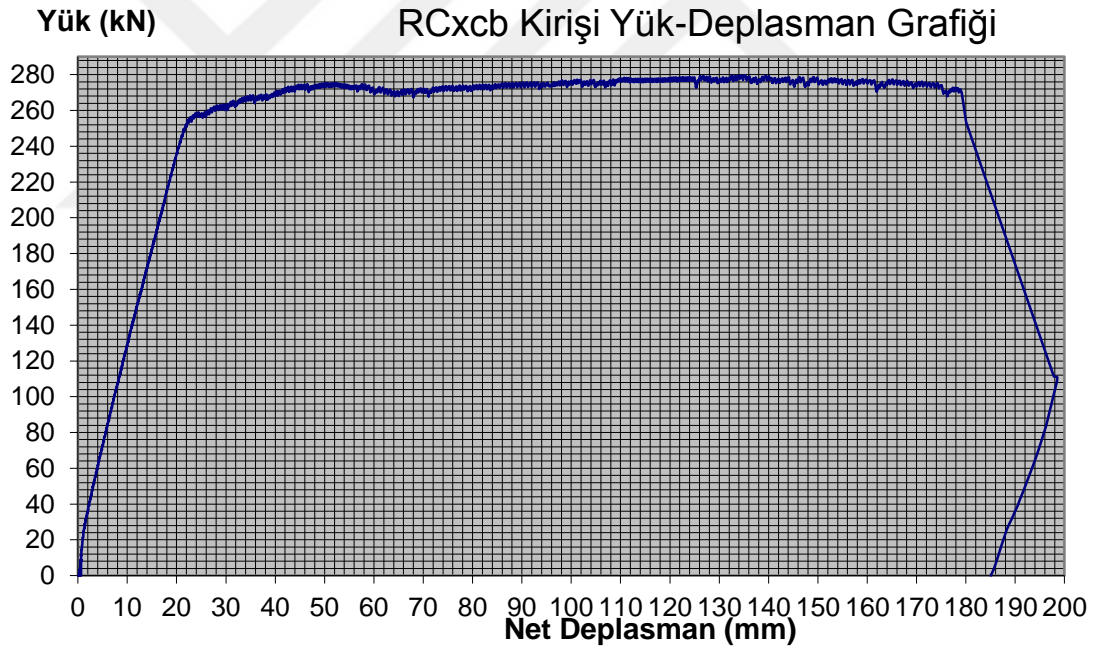
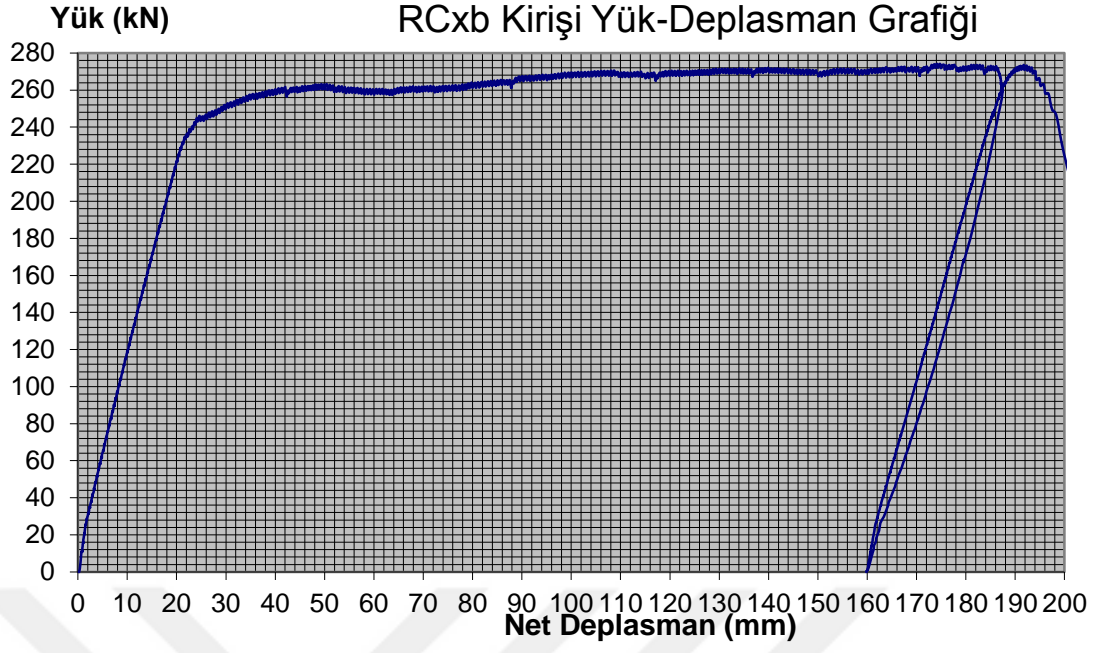
- [18] Todeschini, C.E., Bianchini, A.C. ve Kesler, C.E., Behavior of Concrete Columns Reinforced with High Strength Steels, ACI Journal Proceedings, Cilt 61, No. 6, 704-716, 1964.
- [19] Eurocode 2, Design of Concrete Structures, British Standards Institution, London, 2008
- [20] Mansur, M.A., Tan, K.H., Concrete Beams with Openings: Analysis and Design, CRC Press, Boca Raton, Florida, A.B.D., 1999.
- [21] Mansur, M.A., Tan, K.H., Huang, L.M., ve Lee, S.L., Deflections of Reinforced Concrete Beams with Web Openings, ACI Structural Journal, Cilt 89, No 4, 391-7, 1992.
- [22] Huang, L.M., Concrete Beams with Small Openings under Bending and Shear, MEng Thesis, National Univer. of Singapore, 1989.
- [23] Bischoff, P. H. (2005), Reevaluation of Deflection Prediction for Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber Reinforced Polymer Bars, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 131, No. 5, pp. 752-762.

EKLER

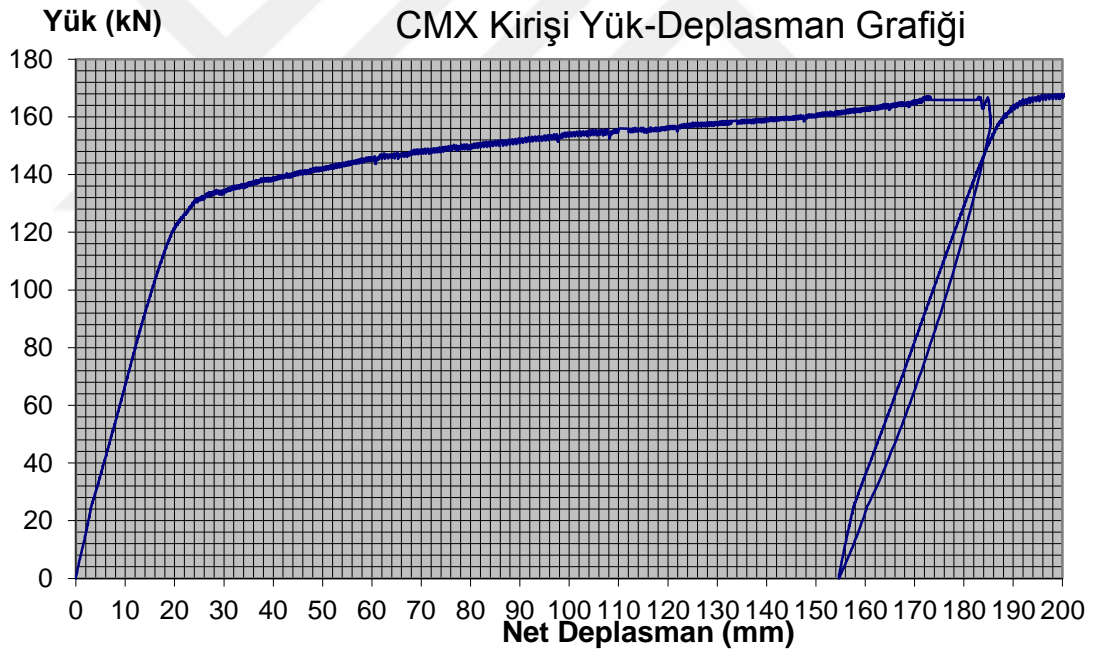
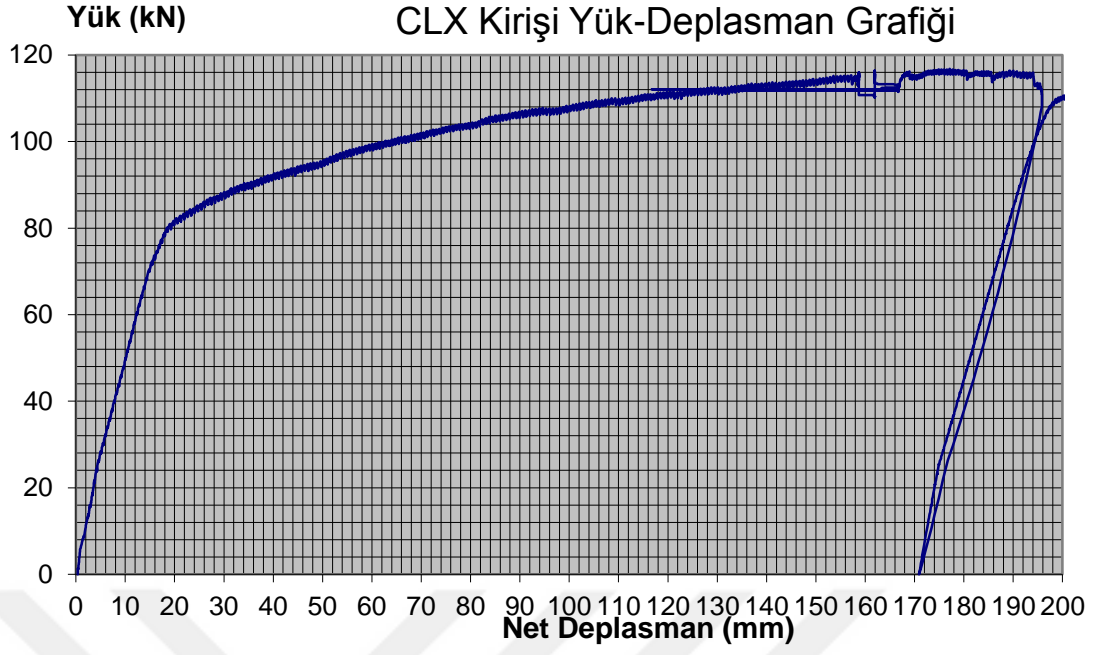
EK 1. Deney Kirişlerinin Yük-Sehim Grafikleri



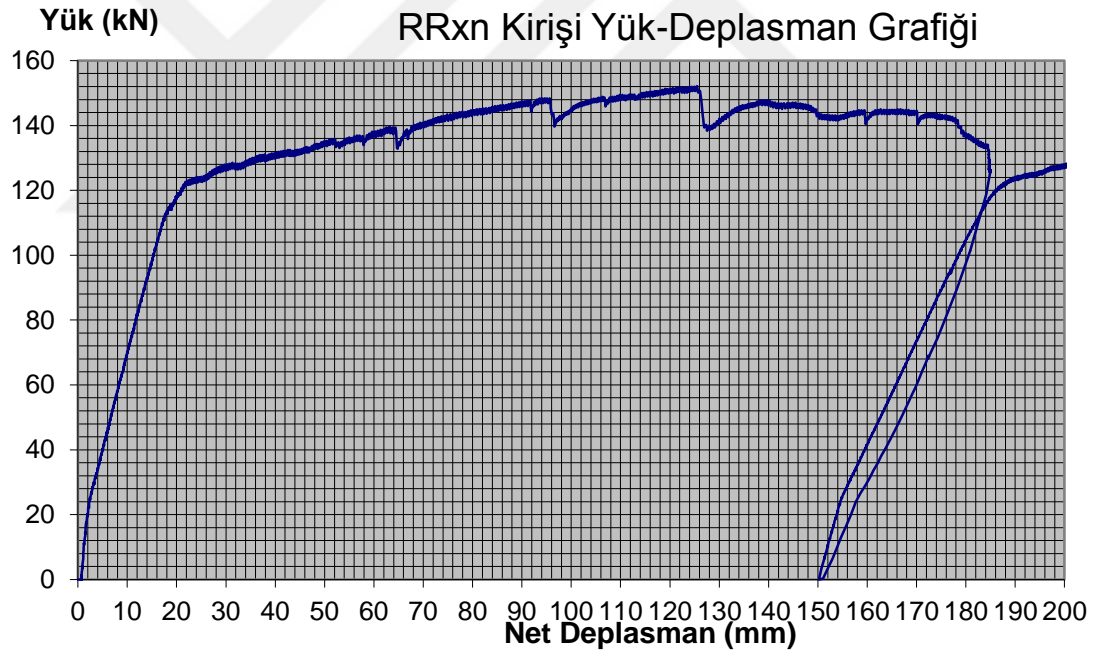
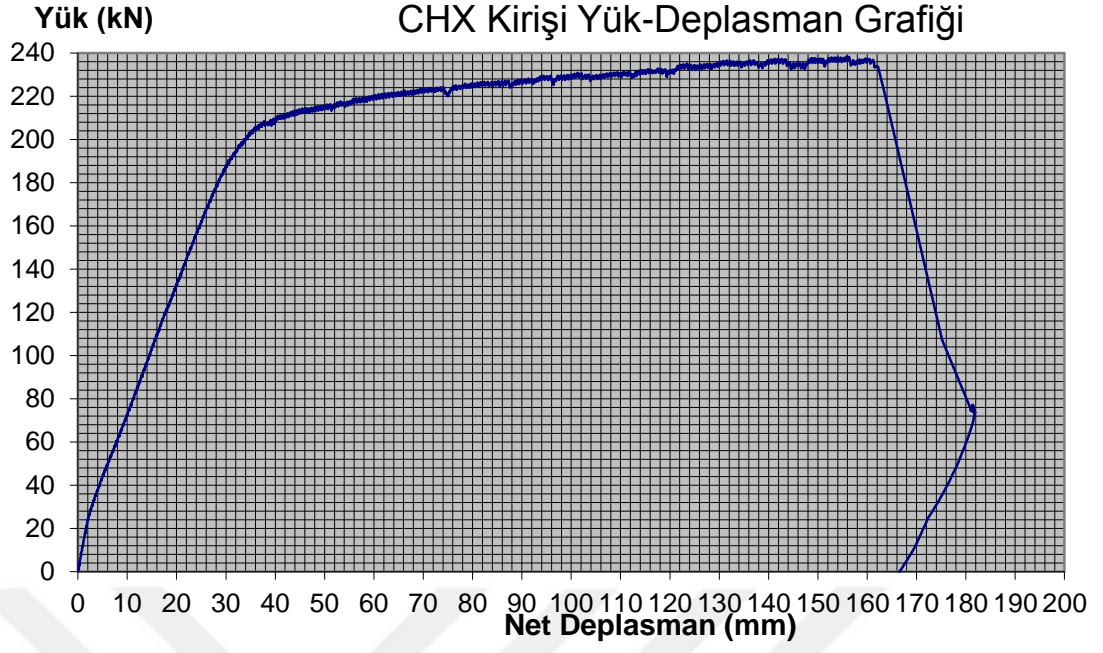
Şekil Ek 1.1. Analiz Edilen Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri



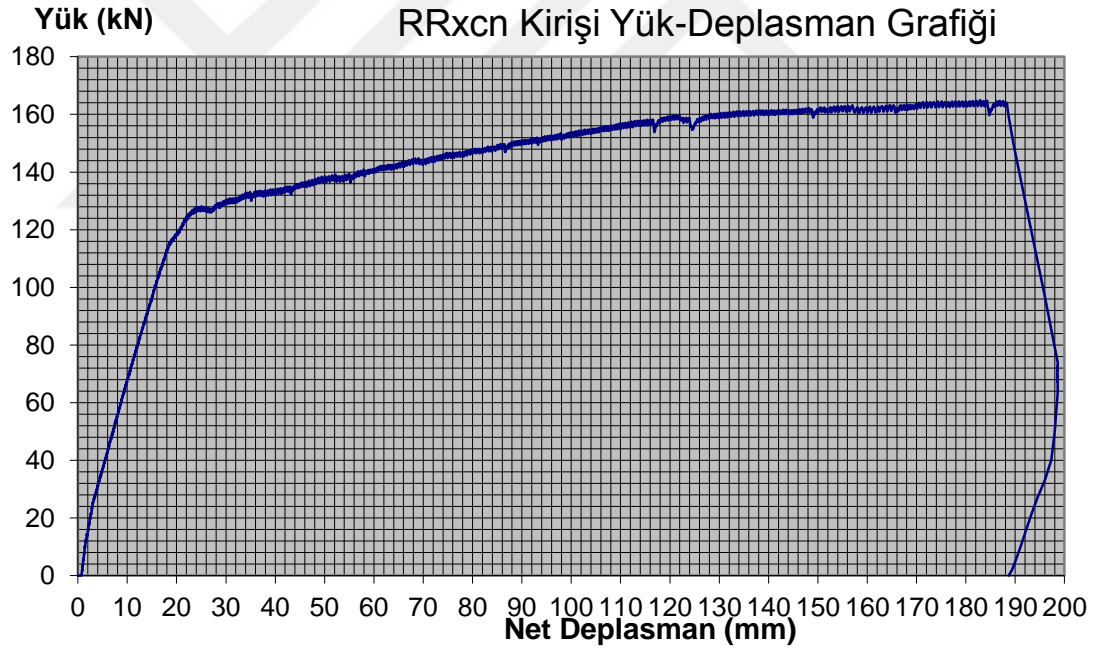
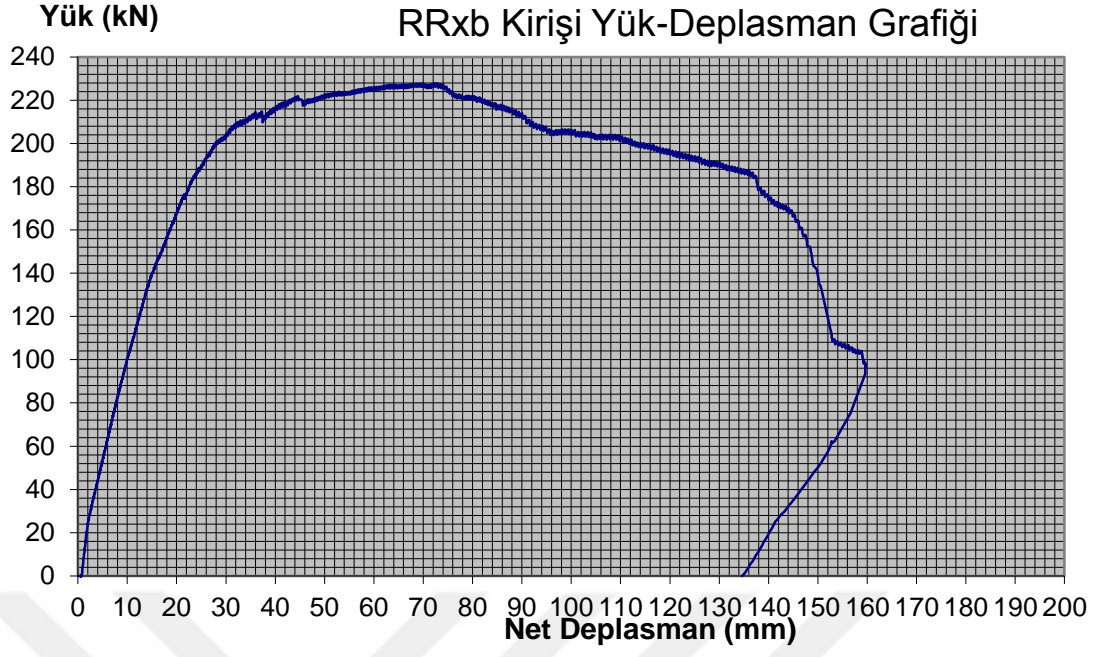
Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz Edilen Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri



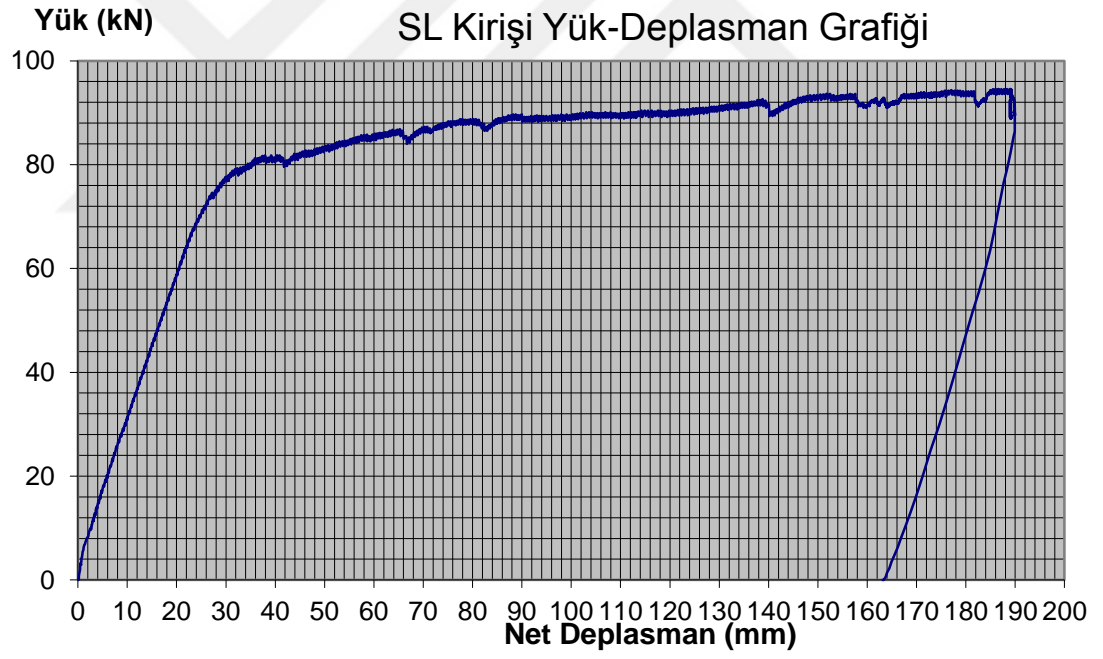
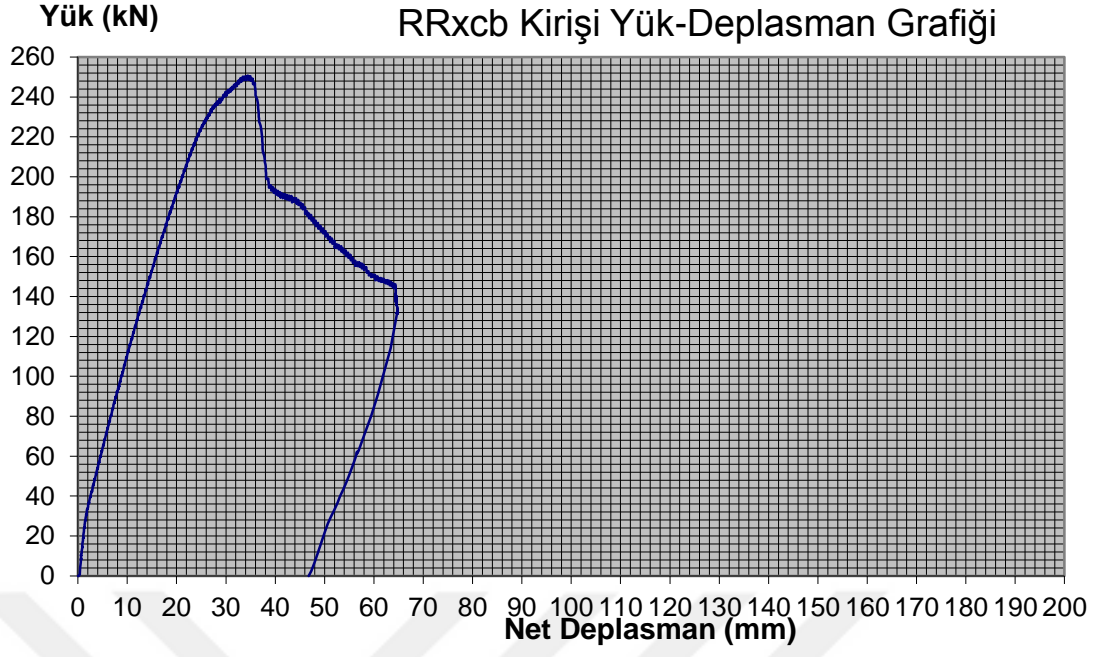
Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz Edilen Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri



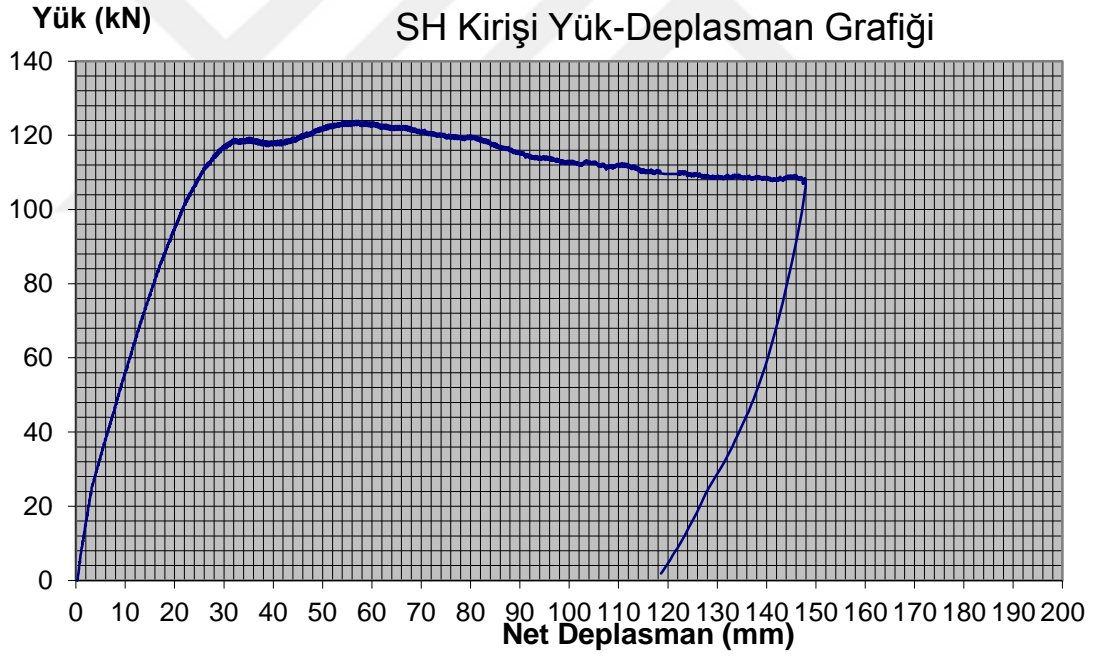
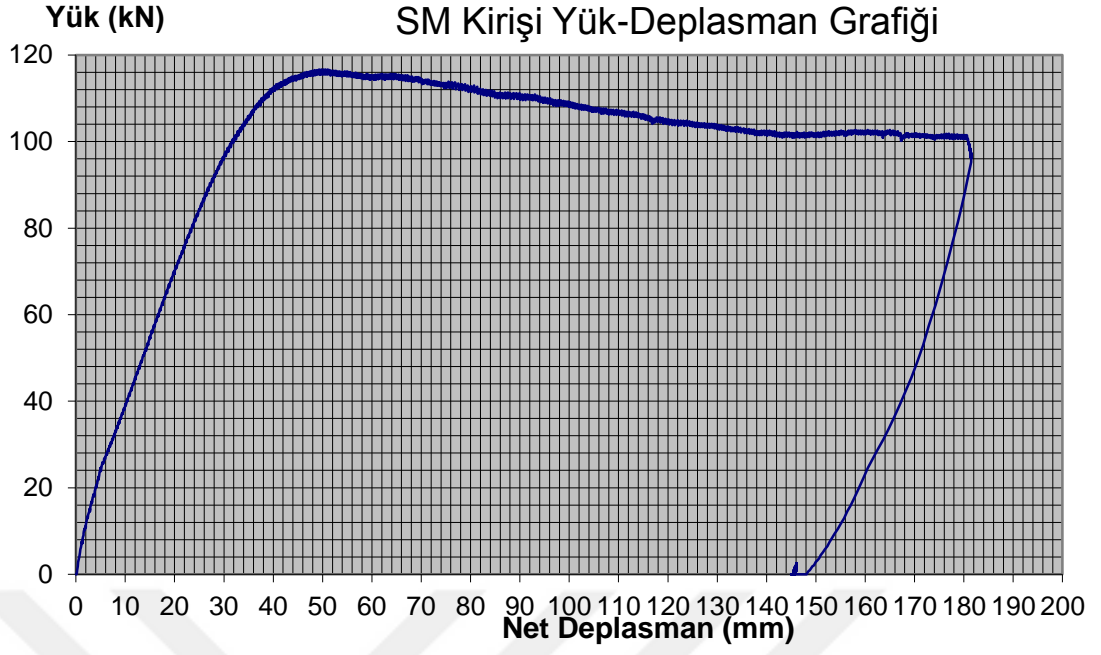
Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz Edilen Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri



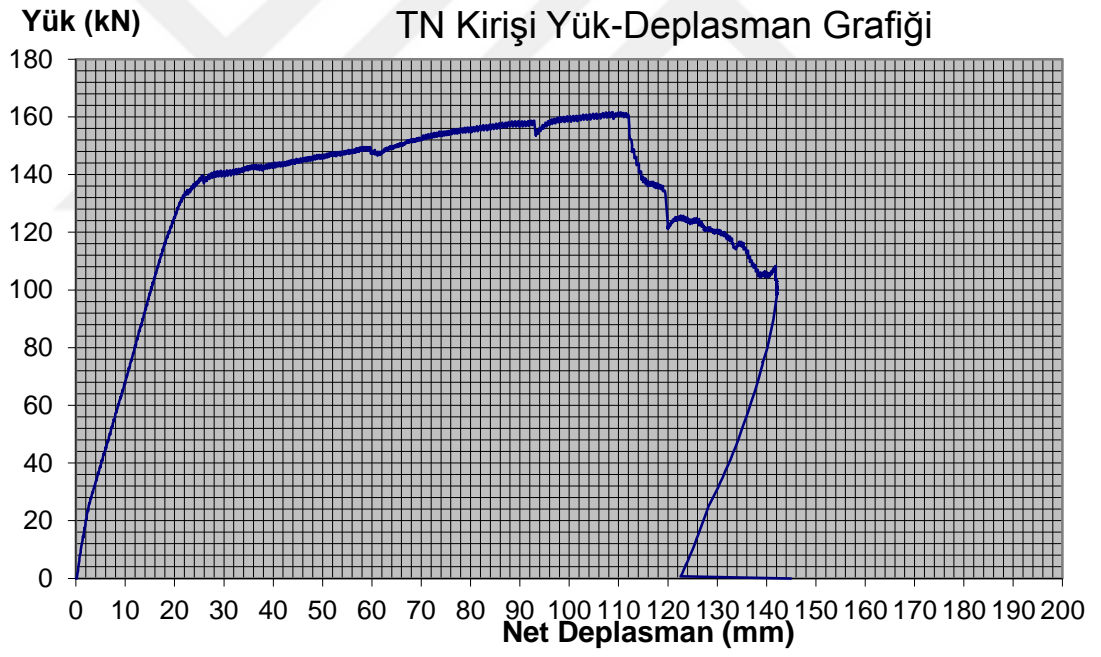
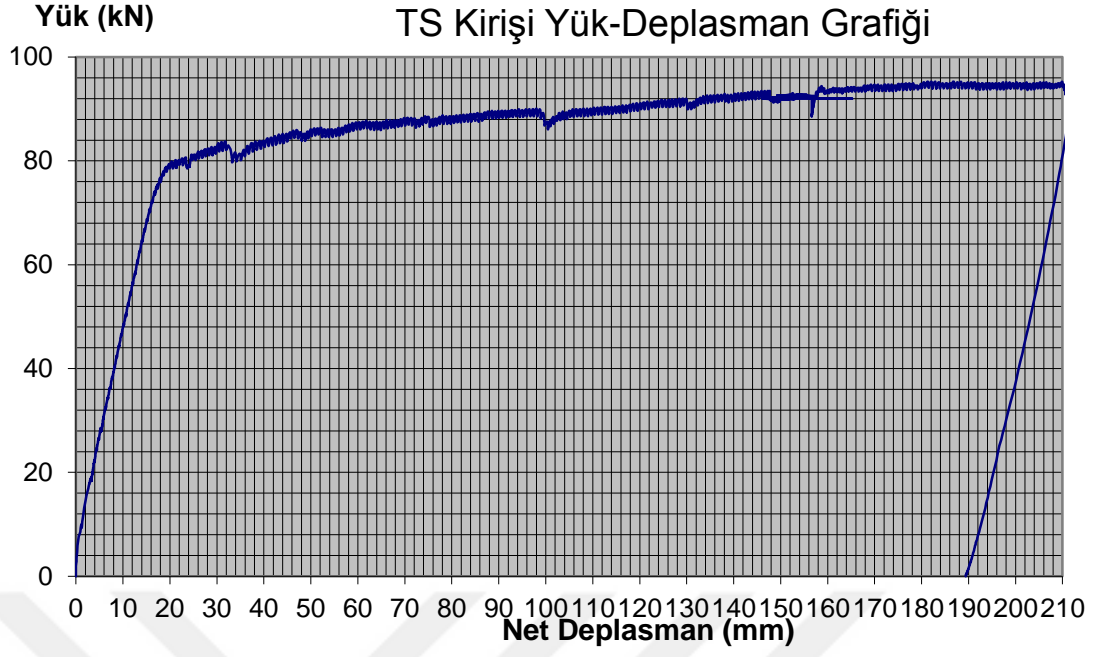
Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz Edilen Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri



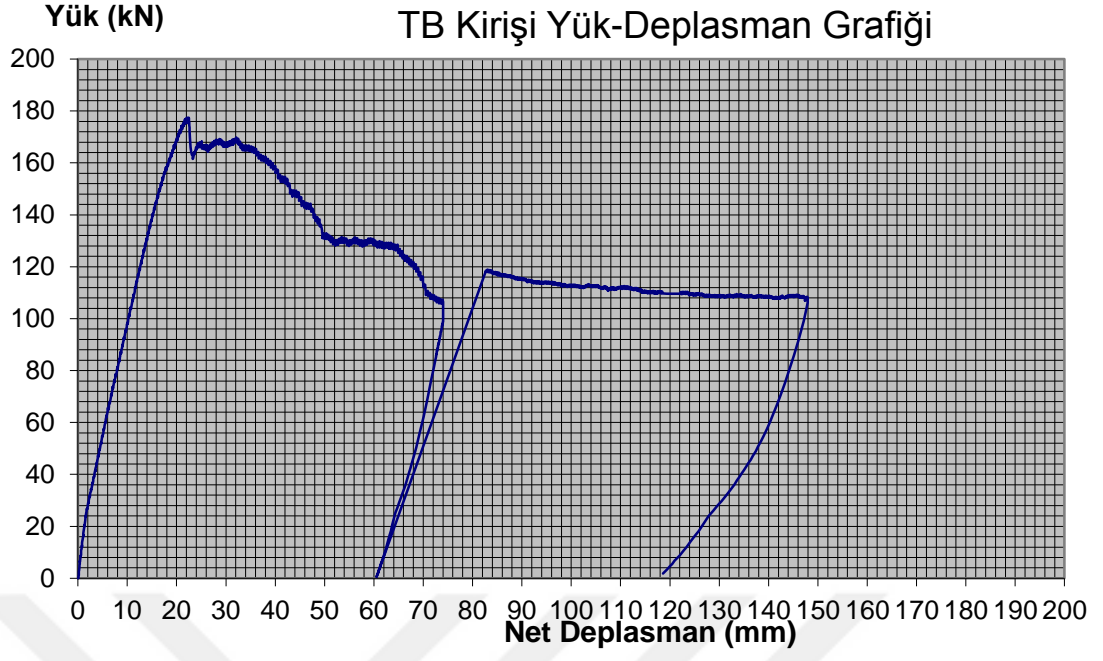
Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz Edilen Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri



Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz Edilen Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri



Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz Edilen Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri



Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz Edilen Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri