

**FARKLI BETON SINIFINA BAĞLI BETONARME
KİRİŞLERİN EĞİLME KAPASİTELERİNİN
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Veyis Kemal ÖZHAN

DANIŞMAN

Yrd.Doç.Dr. Ali ERGÜN

YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Mart, 2012

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI BETON SINIFINA BAĞLI BETONARME KİRİŞLERİN
EĞİLME KAPASİTELERİNİN DENEYSEL OLARAK
BELİRLENMESİ

Veyis Kemal ÖZHAN

DANIŞMAN

Yrd.Doç.Dr Ali ERGÜN

YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Mart, 2012

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

19/03/2012

Veyis Kemal ÖZHAN

TEZ ONAY SAYFASI

Veyis Kemal ÖZHAN tarafından hazırlanan “Farklı Beton Sınıfına Bağlı Betonarme Kirişlerin Eğilme Kapasitelerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 16/03/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Yapı Eğitimi Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd.Doç.Dr.Ali ERGÜN

Başkan	: Yrd.Doç.Dr.Osman ÜNAL Teknik Eğitim Fakültesi	İmza
Üye	: Yrd.Doç.Dr.Ali ERGÜN Teknik Eğitim Fakültesi	İmza
Üye	: Yrd.Doç.Dr.Gökhan KÜRKLÜ Mühendislik Fakültesi	İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Enstitü Müdürü
Prof.Dr. Mevlüt DOĞAN

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

**FARKLI BETON SINIFINA BAĞLI BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME
KAPASİTELERİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ**

Veyis Kemal ÖZHAN
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Yrd.Doç.Dr.Ali ERGÜN

Betonarme, çelik ile betondan meydana gelen ve yük altında birlikte çalışan yapı malzemesidir. Beton basınç dayanımı, çelik ise çekme dayanımı yüksek bir malzemedir. Çelik ile beton arasındaki aderans, betonarmenin mekanik özelliklerini iyileştirmesine katkı sağlar. İki malzeme arasında oluşan aderans gerilmeleri, çeliğin betondan sıyrılmasını önler. Betonarme kesitler farklı gerilme durumlarına göre boyutlandırılırlar. Bu etkilerden birisi de kiriş ve döşeme gibi elemanlarda oluşan eğilme momenti etkisidir.

Betonarme kesit hesaplamalarında klasik varsayımlarının yanı sıra, malzeme davranışı ile bazı varsayımlar da yapılmaktadır. Betonarme gibi, elastik ve doğrusal olmayan, gerilmeleri zamana ve yük geçmişine bağlı bir malzemenin davranışını hesaplara yansıtmak kolay değildir. Bu nedenle betonarme yapı elemanlarının tasarımında, daha az önemi olan değişkenler ihmal edilir, diğerleri için basitleştirici birçok varsayım yapılarak hesaplar kolaylaştırılır.

Bu tez çalışmasında, betonarme elemanların davranışı üzerinde etkili çok sayıda değişkenden bir kısmının etkileri deneysel olarak incelenmiştir. İncelenen değişkenler, eğilmeye çalışan betonarme elemanların davranışında önemli etkinliği olan beton basınç dayanımı ve donatı geometrik oranıdır. Bu değişkenleri incelemek amacıyla 15 adet C20/25, C30/37, C40/50 beton sınıflarından ve BÇ IIIa (S 420a) donatı türünden oluşan 20x35x300 cm boyutlarında betonarme kirişler üretilmiştir. Kirişlere yerleştirilecek

donatının geometrik oranı ise her beton sınıfında minimum donatı oranı ($\rho_{\min} = 0.8f_{ctd}/f_{yd}$), sehim denetimi gerektirmeyecek donatı oranı ($\rho_l = 0.235f_{cd}/f_{yd}$) ve süneklik koşulu için geçerli olan maksimum donatı oranı ($\rho_m = 0.85\rho_b$) olmak üzere üç farklı biçimde alınmıştır. Kirişler üzerinde statik yükleme deneyleri yapılmıştır. Kiriş numunelerinin kuramsal taşıma güçlerine karşı gelen düşey yük (P_u) ile deneylerde ulaşılan en büyük yük (P_{deney}) belirlenerek, deneysel ve kuramsal taşıma güçlerinin oranları (P_{deney}/P_u) hesaplanmıştır.

2012, xi + 43 sayfa

Anahtar Kelimeler: Betonarme kiriş, Eğilme kapasitesi, Beton sınıfı, Donatı oranı

ABSTRACT

M.Sc Thesis

EXPERIMENTAL STUDY ON THE DETERMINATION OF REINFORCED CONCRETE BEAMS FLEXURAL CAPACITY FOR DIFFERENT CONCRETE GRADES

Veyis Kemal ÖZHAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Construction

Supervisor: Yrd.Doç.Dr. Ali ERGÜN

Reinforced concrete (RC) is composed of two materials such as concrete and steel. Two different materials act together in resisting forces. Concrete is strong in compressive strength and steel is strong in tension strength. The bond between concrete and steel improve the mechanical properties of reinforced concrete. The adherence stress prevents debonding steel from concrete. RC sections design according to various stress states. The one of these states is the effect of bending moments.

In design of RC sections, some assumptions are made related to material behavior as well as classical assumptions. As the material such as RC is nonlinear, fragile, stresses on it depend time and load history, it is difficult that the behavior of material takes into consideration. Therefore, the less important variables are neglected and other variables are simplified in the design of RC elements.

In this study, the some in the variables effecting on the behavior of RC elements were investigated experimentally. The investigated variables were concrete grades and ratios of reinforcing bars. 15 test beam samples with dimensions of 20x35x300 cm, C20/25, C30/37, C40/50 concrete grade and BÇ IIIa (S 420a) reinforcing bar were produced. The ratios of reinforcing bars placing into beam samples were ρ_{min} ($=0.8f_{ctd}/f_{yd}$), ρ_l ($=0.235f_{cd}/f_{yd}$) and ρ_m ($=0.85\rho_b$) for each concrete grade. The static loading tests were carried out on the beam samples. The theoretical concentrated vertical load (P_u) related

to flexural capacities of the beam samples were calculated. Also, the experimental concentrated vertical load ($P_{\text{experimental}}$) leading to failure were determined. Then, the ratios of maximum experimental concentrated loads to theoretical ones ($P_{\text{experimental}}/P_u$) were obtained.

2012, xi + 43 pages

Key Words: Reinforced concrete beam, Flexural capacity, Concrete grade, Ratio of reinforcing bar

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr. Ali ERGÜN'ne, deney numunelerinin hazırlanmasın da katkılarda bulunan Sayın Prefabrik İnş.San.Tic.Ltd.Şti.'ye, 10.TEF.10 nolu proje kapsamında kurulan yapı mekaniği laboratuvarı için (BAP) Bilimsel Araştırma Kordinasyon Birimi'ne, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Veyis Kemal ÖZHAN
AFYONKARAHİSAR, 2012

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	6
3. BETONARME KİRİŞLERİN TAŞIMA GÜCÜ	10
3.1 Basınç Kırılması	14
3.2 Dengeli Kırılma	14
3.3 Çekme Kırılması	15
3.4 Betonarme Kirişlerin Tasarım İlkesi.....	16
3.5 Donatı Sınırlandırılması.....	17
3.5.1 Minumum Donatı Yüzdesi	17
3.5.2 Sehim Denetim Sınırı İçin Maksimum Donatı Sınırı	17
3.5.3 Deprem Bölgelerindeki Yapılar İçin Maksimum Donatı Sınırı	17
3.5.4 Sünek Davranış İçin Maksimum Donatı Sınırı.....	18
4. MATERYAL METOD	19
4.1 Betonarme Test Kiriş Elemanları	20
4.2 Malzeme.....	21
4.3 Geometrik Donatı Oranı	22
4.4 Deney Elemanlarının Üretilmesi	23
5. BULGULAR	28
5.1 Deneysel Sonuçlar	28
6. SONUÇLAR	39
7. KAYNAKLAR.....	41
8. ÖZGEÇMİŞ.....	43

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

a	Eşdeğer gerilme bloğu derinliği
A_c	Beton kesit alanı
A_s	Donatı oranı
b_w	Kesit genişliği
d	Faydalı yükseklik
d^1	Paspayı
E	Elastiklik modülü
ϵ	Şekil değiştirme (birim deformasyon)
ϵ_c	Betonda birim deformasyon
ϵ_s	Çelikte birim deformasyon
F_C	Betondaki bileşke basınç kuvveti
f_{cd}	Betonun tasarım basınç dayanımı
f_{ck}	Karakteristik beton basınç dayanımı
f_{ctd}	Betonun hesap çekme dayanımı
f_{ctf}	Eğilmede çekme dayanımı
f_{ctk}	Karakteristik betonun çekme dayanımı
F_T	Donatıdaki çekme kuvveti
f_{yd}	Donatının hesap akma dayanımı
f_{yk}	Karakteristik donatı akma dayanımı
h	Kesit yüksekliği
M	Eğilme momenti
M_{cr}	Çatlama momenti
M_p	Pekleşmeli eğilme momenti
M_{res}	Taşıma gücü momenti
N	Normal kuvvet
P_{deney}	Kirişleri kırılma durumuna getiren kuvvet
P_u	Kuramsal olarak hesaplanan kırılma kuvveti
ρ	Geometrik donatı oranı
ρ_b	Dengeli donatı oranı
ρ_d	Deprem davranış sınırı donatı oranı
ρ_l	Sehim denetimi gerektirmeyen donatı oranı
ρ_m	Sünek davranış sınırı için maksimum donatı oranı
ρ_{min}	Minumum donatı oranı
ρ_{max}	Maksimum donatı oranı
z	Moment kolu
x	Tarafsız eksen derinliği
w	Mukavement momenti
σ	Normal gerilme
τ	Kayma gerilmesi

Kısaltmalar

ACI	American concrete institute
BAP	Bilimsel araştırma kordinasyon birimi
CEB	Comité Euro-International du Béton

CFRP	Karbon lifle güçlendirilmiş polimer
DBYBHY	Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik
GFRP	Cam lifle güçlendirilmiş polimer
TSE	Türk Standartları Enstitüsü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1	Betonarme kirişte iç kuvvet dağılımı	3
Şekil 3.1	Betonarme kirişte şekil değiştirme ve iç kuvvet dağılımı.....	11
Şekil 3.2	Betonarme kirişte eğilme etkisi altında oluşan çatlaklar.....	12
Şekil 3.3	Beton ve çeliğe ait gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) eğrisi.....	12
Şekil 3.4	Basınç gerilmeleri gerçek ve eşdeğer gerilme dağılımı	15
Şekil 4.1	Birinci seri betonarme kiriş numuneleri donatı düzeni.....	21
Şekil 4.2	İkinci seri betonarme kiriş numuneleri donatı düzeni.....	21
Şekil 5.1	1.seri C20/25 betonlu test numunelerinin yük-yerdeğiştirme eğrisi.	31
Şekil 5.2	1.seri C30/37 betonlu test numunelerinin yük-yerdeğiştirme eğrisi	31
Şekil 5.3	1.seri C40/50 betonlu test numunelerinin yük-yerdeğiştirme eğrisi	32
Şekil 5.4	2.seri C20/25 betonlu test numunelerinin yük-yerdeğiştirme eğrisi	32
Şekil 5.5	2.seri C30/37 betonlu test numunelerinin yük-yerdeğiştirme eğrisi	33
Şekil 5.6	2.seri C40/50 betonlu test numunelerinin yük-yerdeğiştirme eğrisi	33
Şekil 5.7	DeneySEL ve kuramsal olarak belirlenen kırılma yükleri.....	37
Şekil 5.8	P_{deney}/P_u oranları.....	38

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1 Donatı oranları ve alanları.....	22
Çizelge 4.2 Beton sınıflarının karışım miktarları.....	25
Çizelge 4.3 Birinci seri kiriş numuneleri beton ve donatı özellikleri.....	25
Çizelge 4.4 İkinci seri kiriş numuneleri beton ve donatı özellikleri	26
Çizelge 5.1 Betonarme kirişlerde ilk çatlak oluştuğu anındaki ölçümler.....	29
Çizelge 5.2 Betonarme kirişlerde kırılma durumundaki ölçümler	30
Çizelge 5.3 1.seri için beton basınç dayanım sonuçları	34
Çizelge 5.4 2.seri için beton basınç dayanım sonuçları	34
Çizelge 5.5 Numunelerde kullanılan donatıların çekme deneyi sonuçları.....	35
Çizelge 5.6 Kuramsal hesaplamalarda kullanılan veriler	36
Çizelge 5.7 Kuramsal nihai taşıma gücü hesabı.....	37

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 4.1 Betonarme kirişler donatılarının hazırlanması.....	23
Resim 4.2 Betonarme kirişlerin kalıplarının hazırlanması.....	24
Resim 4.3 Betonarme kirişlerinin betonlanması.....	24
Resim 4.4 Rijit yükleme çerçevesinde 2.seri test numunesi.....	27
Resim 4.5 Betonarme kirişlerde yükleme durumu oluşan çatlakların görüntüsü....	27

1. GİRİŞ

Ülkemizde yapı sistemlerinde uygulanan karkas taşıyıcı yapı türleri arasında en çok uygulama alanı bulan betonarme yapılardır. Betonarme yapıların ekonomik ve amaca uygun uygulama alanının daha geniş olması, yaygın kullanımın başlıca nedenleri arasında yer almaktadır. Betonarme beton ile çelik olan donatının birada kullanılması ve birlikte çalışması ile meydana gelen bileşik bir yapı malzemesidir. Beton yapı malzemesinden bilindiği üzere basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı düşük bir malzemedir. Eğilme etkilerine karşı sırf beton malzeme kullanılarak yapı elemanları oluşturmak mümkün değildir. Bu yüzden betonun çekme dayanımını yükseltmek üzere içerisine yüksek çekme dayanımına sahip çelik çubuklar yerleştirilerek, mekanik özellikleri bakımından üstün bir birleşim meydana getirilir. Böylelikle çelik çubuklar beton tarafından sarılarak aralarında aderans adı verilen kenetlenme meydana gelir, birlikte dış etkilere karşı koyarlar. Ayrıca, beton çelik çubuklar için örtü görevi görerek dış etkilerin oluşturacağı korozyona karşı korumasını da sağlar (Celep ve Kumbasar, 1998).

Betonarme taşıyıcı sistemler genellikle üç boyutlu ve çok yüksek dereceden hiperstatiktir. Betonarme gibi, elastik ve doğrusal olmayan, gerilmeleri zamana ve yük geçmişine bağlı bir malzemenin davranışını hesaplara yansıtmak kolay değildir. Betonarme davranışı etkileyen tüm değişkenleri hesapta göz önünde bulundurmak, işlemleri son derece karmaşık duruma getirerek, pratik olmaktan çıkaracaktır (Ersoy ve Özcebe, 1987). Çözümleme sırasında uzun hesaplamalardan kaçınmak için önemli etkilerin az önemliler yanında daha belirgin bir şekilde ortaya çıkması için bazı basitleştirmeler yapılır. Bu tür işlemin yapılabilmesi için betonarme elemanların davranışlarının yeterli düzeyde bilinmesi, hatta hissedilmesi gerekir (Celep ve Kumbasar, 1998).

Günümüzde yapı teknolojisinin ilerlemesiyle birlikte daha güvenli ve daha ekonomik yapılar inşa edilmeye başlanmıştır. Betonarme yapı sistemlerinde, betonarmeyi oluşturan beton ve çelik gibi malzemelerin farklı teknik ve yöntemlere bağlı teknolojik

değişimleri, kuramsal hesaplamalarda kullanılan ilgili parametrelerin de yeniden değerlendirilmesini gerektirmektedir.

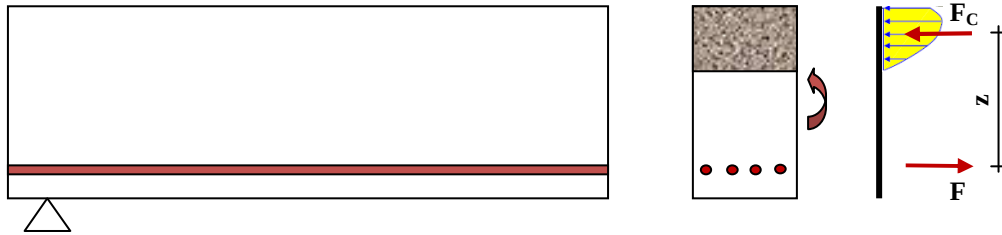
Çağdaş betonarmenin temelini oluşturan deneysel araştırma ve deneysel bulguların ışığında gerçek davranışın temel alınarak hesap yöntemlerinin geliştirilmesinde Coignet öncülük yapmıştır. Bu tarihten sonra yapılan analitik ve özellikle deneysel çalışmalarla betonarme alanında bilgi birikimi artmış ve bunun sonucu olarak daha gerçekçi, daha ekonomik hesap yöntemleri geliştirilmiştir. Bugün çeşitli ülkelerde yoğun bir biçimde devam etmekte olan bu araştırmalar, betonarme davranışının daha gerçekçi anlaşılıp, hesap modellerin gerçek davranışa yakın modellenmesini sağlamaktadır (Ersoy ve Özcebe, 2001).

Yapılan deneysel çalışmalar ışığında tanımlanan hesap kurallarına dayalı uluslararası ve ulusal yönetmelikler hazırlanmıştır. Bu yönetmelikler, zaman içerisinde teknolojik gelişmelere bağlı olarak revize edilmektedir. Türkiye’de ilk betonarme yönetmeliği Türkiye Köprü ve İnşaat Cemiyeti tarafından 1953’de hazırlanmıştır. 1969 yılında Türk Standartları Enstitüsünce “TS-500 Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları” ilk defa yayınlanmıştır. 1984 yapılan değişiklikle taşıma gücü hesap ilkesi TS 500’e girmiştir. Son olarak da kısmi değişiklikler yapılarak şu an yürürlükte olan TS 500/2000 standardı kullanılmaktadır (Eren, 2003).

Betonarme elemanlarda dış etkiler altında oluşan iç kuvvetlere bağlı olarak iki farklı gerilme etkileri meydana gelir. Bunlar, kesit düzlemine dik normal gerilmeler (σ) ve kesit düzleminde kayma gerilmeleri (τ) dir. Bu gerilmeler farklı nitelikte olup, kesite etkilerine göre farklı donatılandırma biçimi ortaya çıkar. Normal gerilme etkilerine göre boyuna donatı ve kayma gerilmelerini karşılamak üzere betonarme kesitlere enine donatılar yerleştirilir. Kesite dik normal gerilmeler, kesitte normal kuvvet ve eğilme momenti etkisinden kaynaklanır. Mukavemet bilim dalından bilindiği üzere, aynı gerilmeler oluşturan normal kuvvet ve eğilme momenti iç kuvvetlerinin bir arada bulunup bulunmama durumuna göre mukavemet haller söz konusudur. Bu haller, (1) eksenel kuvvet hali ($N \neq 0, M = 0$), (2) basit eğilme hali ($N = 0, M \neq 0$) ve (3) bileşik eğilme hali ($N \neq 0, M \neq 0$) dir.

Betonarme yapılardaki kiriş ve döşeme gibi yatay taşıyıcı elemanlar, uygulanan düşey ve yatay yükler nedeni ile eğilmeye çalışırlar ve kesitteki normal kuvvet seviyesi çok düşük kaldığından basit eğilme hali mevcuttur. Kiriş ve döşeme gibi eğilme elemanlarında çekme bölgesine yerleştirilen çelik çubuklar, basınç bölgesindeki betonun tam kapasite ile çalışmasını sağlar. Bu tür elemanların kesitlerinde, eğilmeye ek olarak kesme kuvveti de oluşur. Eğilme etkisindeki betonarme elemanların davranışının modellenmesinde çekme bölgesine yerleştirilen donatının miktarı etkili olur. Artan eğilme momenti etkisindeki bir betonarme kiriş, her zaman, en uçtaki basınç lifindeki betonun birim kısalmasına ulaşmasıyla taşıma gücünü kaybeder ve kırılır. Ancak, sonuçta kırılmanın aynı şekilde olması kırılma durumuna gelinceye kadar, kirişin davranışının da aynı olduğu anlamına gelmez (Eren, 2003). Kesitteki donatı miktarı, dengeli donatı oranından az ise, eğilmeye çalışan elemanların taşıma gücüne ulaşması, donatı aktıktan sonra betonun ezilmesiyle gerçekleşir. Bu tür kırılma biçimine çekme kırılması denir. Betonarme elemanlar çekme kırılma durumuna bir süreç içinde ulaşırlar ve sünek davranış sergilerler. Eğilmeye çalışan elemanların kesit hesaplamalarında bu kırılma biçimi dikkate alınır.

Eğilmeye çalışan elemanların kesitlerinde, basınç bölgesindeki beton basınç bileşkesi F_C ve donatı çekme kuvveti F_T den oluşan bir kuvvet çifti etkimektedir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Betonarme kirişte iç kuvvet dağılımı

Bu durumda, dış kuvvetler altındaki kesitin iç kuvvet denge durumu;

1. Yatay izdüşüm denge denklemi, $F_C = F_T$
2. Moment denge denklemi, $F_C(z) = F_T(z) = M$

sağlanmasıyla gerçekleşir.

Basınç bölgesindeki bileşke kuvvetin hesaplanmasında, eğilme durumunda kesitte meydana gelen deformasyon değerlerinden ve basınç bölgesindeki gerilme dağılımı için beton malzemeye ait gerilme-şekildeğiştirme (σ - ϵ) bağıntılarından yararlanılır. En alt çekme lifindeki beton birim deformasyonu betonun çekme sınır birim deformasyonunu aştığından, çekme bölgesindeki beton kesit çatlamıştır. Bu yüzden, çekme bölgesindeki bileşke kuvvet hesaplanmasında, betonun katkısı dikkate alınmaz. Çekme bölgesindeki bileşke kuvvet, çekme donatısındaki birim deformasyona bağlı oluşan gerilme dağılımına göre belirlenir. Hesaplarda, çeliğin gerilme-şekildeğiştirme (σ - ϵ) ilişkisi, elasto plastik bir eğri ile idealize edilir.

Kesit tasarımında dikkate alınan denge denklemlerinin, davranışı doğru biçimde belirleyebilmek için gerek malzeme gerekse eleman bazında bugüne kadar pek çok deneysel ve kuramsal çalışma yapılmış olmasına rağmen, hala hesaplarda kabul edilen varsayımlara bağlı yaklaşıklıklar söz konusudur. Bunun en önemli sebebi ise belirtilen değişkenlerin hem sayıca çok oluşu hem de çok geniş bir aralıkta değişim göstermesidir. Değişkenlerden bazıları beton basınç dayanımı, boyuna donatı geometrik oranı, akma dayanımı, türü, pekleşme oranı, enine donatı hacimsel oranı, aralık, çap ve akma dayanımı, elemana etkileyen eksenel kuvvetin seviyesi, kesit şekli, yükleme hızı, kesme kuvvetlerinin ve olası aderans kayıplarının etkileridir. Bu etkilerin her birisinin, betonarme kesit davranışı üzerindeki katkıları farklı seviyelerdedir.

Bu tez çalışması, betonarme elemanların davranışı üzerinde etkili çok sayıda değişkenden bir kısmını deneysel olarak incelemek amacı ile gerçekleştirilmiştir. İncelenen değişkenler, eğilmeye çalışan betonarme elemanların davranışında önemli etkinliği olan beton basınç dayanımı ve donatı geometrik oranıdır. Bu değişkenleri incelemek amacıyla 15 adet 20x35x300 cm boyutlarında betonarme kirişler üretilmiştir. Betonarme kirişlerin malzemesi, C20/25, C30/37 ve C40/50 beton sınıflarından ve BÇ IIIa (S 420a) donatı türünden oluşmuştur. Kirişlere yerleştirilecek donatının geometrik oranı ise her beton sınıfında minimum donatı oranı ($\rho_{\min} = 0.8f_{ctd}/f_{yd}$), sehim denetimi gerektirmeyecek donatı oranı ($\rho_1 = 0.235f_{cd}/f_{yd}$) ve süneklik koşulu için geçerli olan maksimum donatı oranı ($\rho_m = 0.85\rho_b$) olmak üzere üç farklı biçimde alınmıştır. Burada, deneysel çalışmalarda bulunacak değerlerin kuramsal değerlerle karşılaştırılmasında,

malzemelerin sınıfına baēlı standart dayanımlarının yerine, deney elemanlarında kullanılacak malzemelerin test sonuçlarına baēlı ortaya çıkacak dayanımları kullanılmıştır. Bu yüzden, deneyde kullanılacak beton sınıflarının her birisinden 6 adet 15x30 cm silindir, 6 adet 15 cm lik küp numuneler alınmıştır. Bu numunelerin deney kirişlerin test edildiēi günde basınç dayanımları belirlenmiştir. Donatılar ise, çapları tam olarak belirlenerek çekme deneyine tabii tutulmuş, akma dayanımı, çekme dayanımı ve gerilme-şekildeēiştirme eğrileri bulunmuştur.

Deneysel çalışmalar sonrası belirlenen beton ve donatının mekanik özellikleri kullanarak, kuramsal olarak bilinen denge denklemleri yardımıyla eğilme etkisindeki kirişlerin kırılma durumunda P_u kuvvetleri hesaplanmıştır. Bu kuvvetler, deney sonrası kırma durumuna getiren P_{deney} kuvvetleri ile karşılaştırılarak, beton sınıfı ve boyuna donatı miktarı göre farklı deēişkenlerinin birbirleri ile rölatif deēişimleri incelenmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Çağdaş betonarmenin temelini oluşturan deneysel araştırma ve deneysel bulguların ışığında gerçek davranışın temel alınarak hesap yöntemlerinin geliştirilmesinde Coignet öncülük yapmıştır. Bu tarihten sonra yapılan analitik ve özellikle deneysel çalışmalarla betonarme alanında bilgi birikimi artmış ve bunun sonucu olarak daha gerçekçi, daha ekonomik hesap yöntemleri geliştirilmiştir. Bugün çeşitli ülkelerde yoğun bir biçimde devam etmekte olan bu araştırmalar, betonarme davranışının daha gerçekçi anlaşılıp, hesap modellerin gerçek davranışa yakın modellenmesini sağlamaktadır (Ersoy ve Özcebe, 1987).

Günümüzde betonarme kesit davranışı üzerinde oldukça kapsamlı araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmaların büyük çoğunluğu deneysel çalışmaları kapsamaktadır. Deneysel çalışmalarda betonarme elemanların yatay ve düşey statik ve tekrarlı yükler altındaki davranışları farklı biçimde ele alınmaktadır. Son dönemdeki araştırmalar, betonarme ve betonarmeyi oluşturan beton ve çeliğin doğrusal olmayan davranışı üzerinde odaklaşmaktadır. Ayrıca, betonarme elemanların farklı onarım ve güçlendirme tekniklerinin performansı ve davranışı ile ilgili yapılan mekanik deney çalışmaları ön planda yer almaktadır.

Abrams (1991) son yıllarda betonarme yapı elemanlarının tekrarlı yatay yükler altında davranışı ile ilgili yapılan birçok deneysel çalışmanın dökümleri çıkartmıştır. İncelediği 400 den fazla betonarme elemanların davranışı ilgili deneysel çalışmaları içeren yayınları, kiriş, kolon, kiriş-kolon birleşimi, çerçeve, çerçeve-duvar sistemleri, dolgulu duvarlı çerçeve sistemleri olmak üzere ayırarak bir veri bankası oluşturmuştur.

El-Dash ve Ahmad (1994) etriye ve çiroz ile farklı tiplerdeki enine donatılarla teşkil edilmiş normal ve yüksek dayanımlı kare ve dikdörtgen kolonların gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini belirlemek üzere analitik bir model oluşturmuşlardır. Tasarlamış oldukları modeli, ilişkili deneysel çalışmalarla karşılaştırarak, modellemenin yanal sargılama iyi sonuç verdiği gibi aynı zamanda boyuna donatı ve kesit değişiminde de kullanabileceğini ortaya koymuştur.

Özcebe vd (1997) yaptıkları proje kapsamında, yüksek dayanımlı betondan üretilen betonarme elemanlarının dayanım ve davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Ortaya çıkan sonuçlara bağlı olarak betonarme kesit hesapları için öneriler sunmuşlardır. Çalışmanın birinci bölümünde yüksek dayanımlı betondan üretilen betonarme kirişlerin minimum eğilme ve kesme donatısı gereksinimlerini araştırmak üzere 19 kiriş deneyi yapılmıştır. Deney sonrası değerlendirmede, minimum donatı belirlenmesinde beton ve çelik dayanımlarının dikkate alınması gerektiği ortaya çıkmıştır.

Ersoy (1998) yaptığı çalışmada, pekleşmeli taşıma gücü momenti M_p 'nin deneyler sonucu belirlenen gerçekçi malzeme modellerine dayanan bir bilgisayar yazılımı ile doğru biçimde saptanabileceğini gösterdi. Farklı durumlardaki donatı türü ve miktarlarının, betonarme kesitin dayanım ve davranışı üzerindeki etkilerini belirledi.

Kumbasar ve İlki (1999) yapmış oldukları proje kapsamında deprem davranışını temsil etmek üzere, elastik ötesi yerdeğiştirmeler yapmaya zorlanan simetrik donatılı betonarme elemanlarının davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyde 20x20x200 cm boyutlarında 28 adet betonarme numune kullanmışlardır. Numuneler sabit eksenel kuvvet ile yön değiştiren tekrarlı yanal yükler altında denenmiştir. Uygulanan eksenel kuvvet seviyesi, boyuna donatı geometrik oranı, dayanımı ve türü ile beton basınç dayanımının betonarme kesit davranışı üzerinde etkileri saptanmıştır.

Kaplan ve Şenel (2002) yürüttükleri proje çalışmasında, değişik donatı oranlarına ve yerleşimine sahip 12 adet betonarme derin kiriş numunesinin tersinir yükler altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Donatı miktarının, yerleşiminin ve kesit geometrisinin değişiminin dayanım ve süneklik üzerindeki etkilerini deneysel ve kuramsal olarak araştırmışlardır. Gövde ve sargı bölgelerinde kullanılan boyuna donatı miktarını artırmanın elemanların dayanımını yükselttiğini, eğrilik deplasman sünekliğini düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Can vd (2002) taşıma gücü yetersiz veya hasarlı kirişlerin açıklığına kolon yerleştirilerek onarım ve güçlendirilmesini incelemişlerdir. Kirişlerin

davranış/dayanımına etkisini incelemek üzere, bir referans kirişi, iki güçlendirme kirişi ve iki onarım kirişi olmak üzere, beş deney elemanı hazırlanmışlardır. Deney verileri kullanılarak çizilen yük-deplasman ve moment-eğrilik ilişkileri yardımıyla kirişlerin dayanım artışları, enerji tüketimi, rijitlik ve süneklik faktörleri incelenmiştir. Yaptıkları çalışmada kiriş açıklık ortasına kolon yerleştirme yöntemi ile yapılan onarım ve güçlendirmede, davranış/dayanım açısından başarılı sonuçlar elde edildiğini göstermişlerdir.

Kaltakçı vd (2005) yaptıkları çalışmada, eksenel yüklü çelik fiberli betonarme kolonların davranışı ile ilgili bir dizi deneyler yapmışlardır. Deneylerde çelik fiberin çerçeve sistemine verdiği ilave süneklik analiz edilmiştir. Bu kapsamda iki katlı 16 adet 160 x 160 x 840 mm boyutlarında prizmatik kolon numuneler üretilmiş, yük kontrollü düzenek içinde eksenel yük ile yüklenerek, yük-deplasman eğrileri çıkarılmış ve çerçeve sünekliğinin çelik fiber miktarına göre değişimi incelenmiştir.

Ashour (2006) cam lifle güçlendirilmiş polimerli (GFRP) 12 beton kiriş numuneleri üzerinde dört noktadan eğilme deneyleri yapılmıştır. Deney numunelerinde ne kayma donatısı ne de basınç donatısı bulunmamıştır. İncelenen değişken kiriş yüksekliği ve GFRP miktarıdır. Bu kirişlerin eğilme ve kesme kapasiteleri deneysel olarak bulunmuştur. Bulunan sonuçların teorik değerlerle karşılaştırılması yapılmıştır.

Adhikary ve Mutsuyoshi (2006) değişik teknikler kullanarak betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesini deneysel olarak incelemişlerdir. Toplamda 11 adet kiriş test edilmiştir. Bu kirişler, çelik plaklarla, çelik giydirmelerle, dıştan ankrajlı etriyelerle güçlendirilmiştir. Bu farklı malzeme gruplarına göre kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinin etkinliği araştırılmıştır.

Yazıcı (2007) yapmış olduğu tez çalışmasında deneysel olarak dikdörtgen kesitli basit mesnetlenmiş kirişlerin eğilme yönünden karbon (CFRP) ve cam liflerle (GFRP) güçlendirilmesini incelemişlerdir. Bunun için 16x20x220 cm boyutlarında, C20 betonu ve S420 yapı çeliği kullanılan 9 adet betonarme kiriş kullanılmıştır. Güçlendirilen betonarme kirişlerin yük-yer değiştirme, süneklik ve enerji yutma kapasiteleri araştırılmıştır.

Cılız (2007)'ın yaptığı tez çalışmasında ise düşük dayanımlı betonla üretilmiş T kesitli betonarme kirişlerin CFRP ile güçlendirilmesi deneysel olarak ele alınmıştır. Kesme dayanımı yetersiz, düşük beton dayanımlı betonarme kirişlerin dıştan CFRP levha ve şeritlerin yapıştırılarak güçlendirilen 6 adet T kesitli betonarme kiriş test edilmiştir.

Belgin ve Şener (2007) aşırı donatılı kirişlerde boyut etkisinde kırılma parametrelerinin doğrusal ve doğrusal olmayan analitik olarak analizini yapmışlardır.

Junior ve Venturini (2007), betonarme kirişlerin hasar modellemesi üzerinde çalışmışlardır. Kirişlerin kesme bileşenlerinin lineer olmayan etkileri hesaba katılarak hem rijitlik azalımı hem de taşıma gücü hesaplamaları için geliştirilmiş bir model ortaya konulmuştur.

Kara ve Dünder (2009), çatlaklı betonarme kirişlerin sehim ve atalet momenti üzerinde donatı oranı ve yükleme tipinin etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada ACI, CEB standartlarında geçen yöntemler kullanılarak bilgisayar programı hazırlanmış, bu programla çatlayan elemanda eğilme rijitliği ve kesme rijitliği değişimleri incelemişlerdir. Ayrıca, elde ettikleri sonuçları konu ile ilgili analitik ve deneysel çalışmalarla karşılaştırmışlardır.

Yehia (2009) betonarme kirişlerin eğilmeye karşı güçlendirilmesini kırılma mekaniği yaklaşımı içerisinde incelemiştir. Bunun için 9 çentikli betonarme kiriş üzerinde dört noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır. Deneyde üç farklı kiriş boyutu üç farklı donatı oranı kullanılmıştır. Bu kirişler, GFRP ve CFRP ile iki farklı biçimde güçlendirilmiştir. Test altındaki numunelerin uygulanan yükler ve çatlak gelişimleri ile deneysel olarak belirlenen kırılma momentleri, analitik momentler ile karşılaştırılmıştır.

Kassoul ve Bougara (2010) Eurocode 8'e göre tasarlanmış yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde boyuna çekme donatısının maksimum oranı ile süneklik düzeyi arasındaki ilişkiyi analitik olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak farklı bir maksimum donatı oranı tanımlamışlardır.

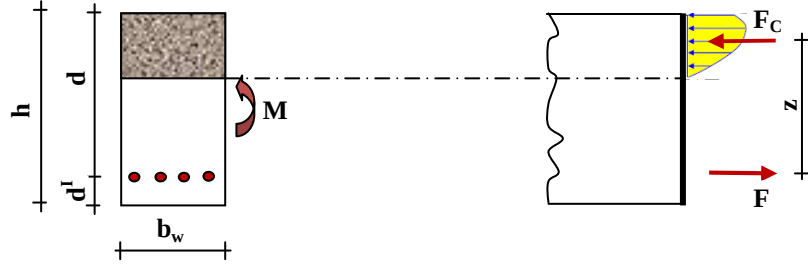
3. BETONARME KİRİŞLERİN TAŞIMA GÜCÜ

Betonarme yapılardaki yatay olarak oluşturulan kiriş elemanlar uygulanan düşey ve yatay ve yükler altında eğilmeye çalışırlar. Bu tür elemanların kesitlerinde eğilmeye ek olarak kesme kuvveti, yüklemeye ve sistemi oluşturan elemanların düzenleniş biçimine bağlı olarak burulma momenti ve eksenel kuvvet de oluşabilir. Genel olarak eksenel kuvvet ve burulma momenti gibi ilave iç kuvvet etkileri, eğilme momenti yanında küçük kaldığından tasarımda sadece basit eğilme durumu ele alınır. Eksenel kuvvetin ölçütü ise TS 500-2000’de $N_d \leq 0,1.A_c.f_{ck}$ olarak alınmaktadır. Kesme kuvveti etkileri ise farklı gerilme durumu oluşturduğundan dolayı eğilme durumundan bağımsız olarak tasarımda ele alınır.

Betonun çekme dayanımının düşük olması nedeni ile eğilmeye çalışan kirişlerde çekme bölgesine yerleştirilen çelik çubuklar, basınç bölgesindeki betonun tam kapasite ile çalışmasını sağlar. Çelik çubukların temel işlevi, çekme gerilmelerini karşılamak olduğuna göre, bu çubukların çekme bölgesi derinliğinde en dış life yakın konulması, moment kolu mesafesini artırır ve donatının etkili çalışmasını sağlar. Çekme bölgesindeki beton dış life ile donatı çubuğu arasındaki beton örtü tabakası bulunacaktır. Bu tabaka, kenetlenme veya aderansı sağlamak, donatıyı pastan ve yangından korumak amacıyla zorunludur (Ersoy ve Özcebe, 2001).

Eğilme altındaki bir betonarme elemanda zorlamalar düşük düzeyde ise, çekme bölgesindeki beton çatlamayabilir. Bu durumda donatı ile beton, kesitteki çekme kuvvetini ortaklaşa taşır. Eğilme etkisi altındaki betonarme kirişlerde beton çatlar, çatlaklar arasındaki beton çekmeye bir miktar katkıda bulunabilir. Bu katkı ihmal edilebilecek düzeyde olduğundan çatlamış kesitte çekmenin tamamının donatı tarafından karşılandığı kabul edilir. Donatının görevi çekme gerilmelerini karşılama ve bu arada oluşacak çatlak genişliğini minimum tutmaktır (Ersoy ve Özcebe, 2001).

Şekil 3.1’de çekme bölgesinde bulunan en dış life yakın donatı yerleştirilmiş bir kirişte şekildeğiştirme dağılımları ve kesitte oluşan iç kuvvetler gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Betonarme kirişte şekildeğiştirme ve iç kuvvet dağılımı

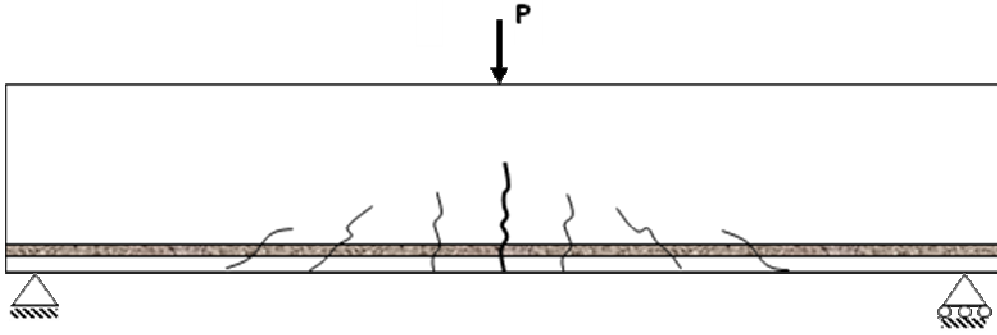
Dış yükler etkisindeki betonarme kirişlerde ilk çatlaklar, en dış çekme lifindeki birim uzamanın, betonun çekmedeki birim deformasyon sınırına ulaşması ile oluşur. Deformasyonla hesap pratik olmadığından, çatlak oluşması, en dış lifteki betonun eğilmede çekme dayanımına ulaşması olarak tanımlanır. Bu sınır, çatlama momenti donatısız bir kirişin kırılma momentine eşittir (Ersoy ve Özcebe, 2001).

$$M_{cr} = \frac{f_{ctf} I}{y} \quad (3.1)$$

Kesit dikdörtgen ise I/y için maksimum değer mukavemet momenti olarak adlandırılan $W=bh^2/6$ olur. Betonun eğilmede çekme dayanımı (f_{ctf}) ise eksenel çekme dayanımının (f_{ctk}) iki katı olarak alınır. Bu durumda 3.1 ifadesi aşağıdaki son halini alır.

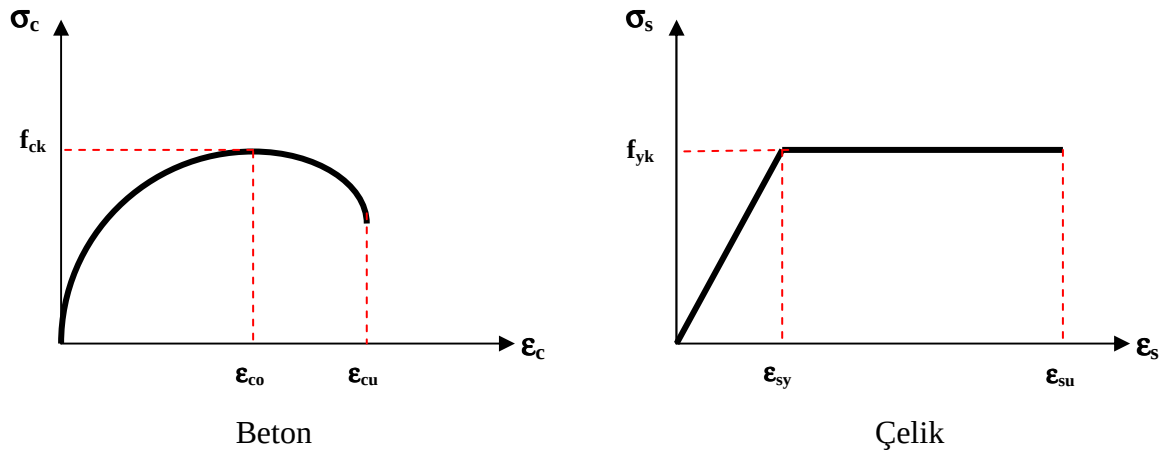
$$M_{cr} = f_{ctf} \frac{b_w h^2}{6} = 2 f_{ctk} \frac{b_w h^2}{6} \quad (3.2)$$

İlk çatlaklar momentin en yüksek olduğu bölgede oluşur. Bu çatlaklar kılcal düzeydedir ve görülmeleri son derece zordur. Yük arttıkça bu çatlakların boyu ve genişliği artmaya başlar, yeni çatlaklar oluşur. Betonda çatlama, asal çekme gerilmelerine dik yönde gelişir, bu nedenle kirişin kesme olmayan bölgesinde gözlenen çatlaklar kiriş eksenine dik yöndedir. Yük artmaya devam ettiği sürece yük ile mesnet arasındaki kesitlerde de çatlama momentine erişildiğinden bu bölgede de çatlaklar oluşur. Bu bölgede kayma gerilmeleri bulunduğundan asal çekme gerilmeleri kiriş eksenine paralel olmadığından, oluşan çatlaklar kiriş eksenine belirli bir açıyla oluşur (şekil 3.2).



Şekil 3.2 Betonarme kirişte eğilme etkisi altında oluşan çatlaklar

Eğilme etkisi altında kirişte oluşan ilk çatlak sonrası, beton ve çelik malzemedeki gerilme dağılımı için ilgili malzemelere ait tek eksen yük durumuna ait bilinen gerilme-şekildeğiştirme (σ - ϵ) ilişkileri kullanılması gerekir (şekil 3.3). İlk çatlak sonrası çekme bölgesinin en altında yer alan liflerde betonun çekme dayanımları aşılmış, çekme donatısında ise henüz akma sınırına ($\epsilon_s < \epsilon_{sy}$) ulaşılmamıştır. Bu durumda, basınç bölgesinde betonun gerilme dağılımı eksenel yük altındaki gerilme-şekildeğiştirme (σ - ϵ) eğrisine benzemektedir. Basınç bölgesinin en üstünde yer alan liflerde birim kısalma henüz maksimum gerilmeye karşılık gelen (ϵ_{co}) ulaşmamıştır.



Şekil 3.3 Beton ve çeliğe ait gerilme-şekildeğiştirme (σ - ϵ) eğrisileri

Kirişe uygulanan yük arttıkça, eğilme momenti büyüyecek ve belirli bir yük düzeyinde çekme donatısı akma birim uzamasına ulaşacaktır. Basınç bölgesindeki en dış lifteki şekildeğiştirmeler ϵ_{co} 'a ulaşmadığından dolayı bu lifteki beton basınç gerilmeleri f_{ck} dan küçüktür. Donatı aktığından dolayı, donatıdaki çekme kuvveti $F_T = A_s \cdot f_{yk}$ olur. Yük artmaya devam ederse, donatıdaki deformasyonlar artacak, donatı akma sınırına

ulaştığından dolayı, gerilmelerde çok artış olmadan uzamalar artacaktır. Donatıdaki birim deformasyon artışı betona göre çok yüksek olmaktadır. Betonarme kesitte şekildeğiştirme dağılımının Bernouilli-Navier hipotezi gereği doğrusal olacağından beton ve donatıdaki farklı artış, ancak tarafsız eksenin yukarı kayması ile doğrusallık korunacaktır. Çeliğin elasto-plastik davranışından dolayı akma sonrası gerilmeler sabit kaldığından dolayı donatıdaki çekme kuvvetleri değişmeyecektir. Kesitte denge şartlarından dolayı beton basınç bileşkesinin sabit kalması demektir (Ersoy ve Özcebe, 2001).

$$F_r = A_s \cdot f_{yk} = F_c \quad (3.3)$$

Artan yükler altında tarafsız eksenin yukarı kayması sonrasında basınç bölgesinin en dış lifinde beton birim kısalması ϵ_{co} 'a ulaşıldığından dolayı bu lifteki beton basınç gerilmeleri f_{ck} değerini alacaktır. Betonda ezilmeler başladığından dolayı, deformasyon artımının ancak gerilme azalması ile mümkün olacaktır. En dış lifdeki beton birim kısalması ϵ_c , betonun nihai birim kısalması ϵ_{cu} 'ya ulaşıldığında basınç bölgesindeki beton ezilerek dağılacak, donatı aktığından dolayı, kiriş çökerek kırılacaktır. Basınç bölgesindeki bileşke basınç kuvveti ile çekme bölgesindeki donatı bileşke çekme kuvvetleri arasındaki mesafe olan moment kolu (z) ile kesitin moment taşıma gücü belirlenecektir. Moment kolu (z) akma ve kırılma anında tarafsız eksen derinliğinin değişiminden dolayı farklılık gösterecektir. Bu farklılık taşınan eğilme momentlerinin hesabında %5 mertebesinde fark gösterdiğinden dolayı oldukça az olduğu kabul edilir. Bu nedenle, momentin akmadan sonra sabit kaldığı varsayımının getireceği hata oranı oldukça küçük kalır (Ersoy ve Özcebe, 2001).

Kirişler taşıma gücüne ulaşmasına kadar göstereceği davranışlarda çekme donatısı en önemli rol oynamaktadır. Artan eğilme momenti etkisindeki bir betonarme kiriş, her zaman, basınç bölgesindeki en uç lifin betonun birim kısalmasının ezilme birim kısalmasına ulaşmasıyla ($\epsilon_{cu} = 0.003-0.0035$) taşıma gücünü kaybederek kırılmaktadır. Ancak, sonuçta kırılmanın aynı şekilde olması kırılma durumuna gelinceye kadar, kirişin davranışının da aynı olduğu anlamına gelmez. Kirişteki çekme donatısının miktarı kirişin davranışını etkiler ve belirler (Eren, 2003).

3.1 Basınç Kırılması

Kirişe aşırı çekme donatısı yerleştirildiğinde, davranışta büyük bir değişme gözlenmektedir. Fazla donatı, tarafsız eksenin konumunu değiştirmektedir. Tarafsız eksenin çekme donatısına doğru kayması sonucu ϵ_c/ϵ_s oranı artacak, $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ olduğunda donatı henüz akma sınırına ulaşmamış olacaktır. Bunun sonucunda ise kırılma donatı akmadan betonun ezilmesiyle oluşacak, ani ve gevrek olarak gerçekleşen bu kırılma biçimi basınç kırılması olarak adlandırılacaktır. Betonarme elemanların tasarımında gevrek kırılma istenmeyen bir davranış olduğundan, yönetmelikler tasarımda kullanılacak donatı miktarına bir üst sınır tanımlayarak, tüm kirişlerin sünek davranış gösterecek şekilde boyutlandırılmasını istemektedir (Ersoy ve Özcebe, 2001).

3.2 Dengeli Kırılma

Kirişlerde oluşacak kırılma türüne teorik olarak tanımlaması yapılan dengeli kırılma davranışı esas olarak belirlenir. Dengeli kırılma türü, çekme bölgesindeki donatının akma başladığı anda basınç bölgesindeki en uç lifte ezilmelerin meydana geldiği kırılmadır. Dengeli kırılma biçimine getiren donatı miktarına dengeli donatı denir. Çekme donatısının belirlenen dengeli donatı miktarından fazla olduğu durum denge üstü, az olduğu durum ise denge altı olarak adlandırılır. Yönetmeliklerde, donatı için konulan üst sınırlarla gevrek davranış gösteren dengeli ve denge üstü kirişlerin oluşturulması önlemiş olur. Eğilme etkisi altındaki betonarme kesitin denge ve şekildeğiştirme uygunluk denklemlerinden yararlanılarak, dengeli kırılmaya neden olan dengeli donatı oranı (3.4) bağıntısı ile verilmiştir.

$$\rho_b = 0.85k_1 \cdot \frac{f_{ck}}{f_{yk}} \cdot \frac{600}{600 + f_{yk}} \quad (3.4)$$

Beton ve donatı sınıflarına ve k_1 değerine bağlı olarak dengeli donatı oranı ρ_b değişim göstermektedir. Kirişlerde bulunan donatı oranı ρ , ρ_b değerinden küçükse ($\rho < \rho_b$) çekme kırılması, büyükse ($\rho > \rho_b$) basınç kırılması davranışı gösterir.

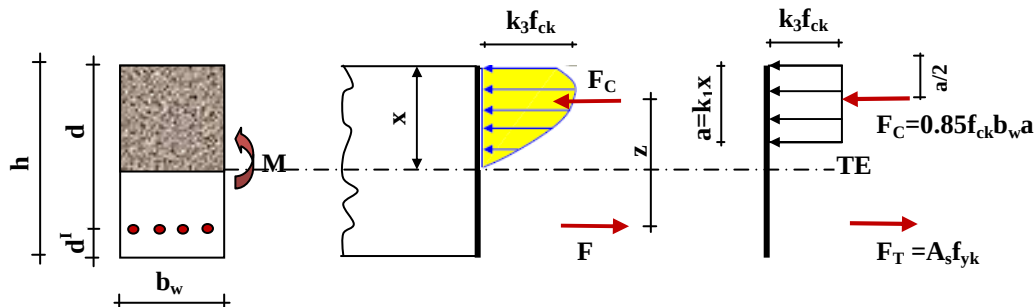
k_1 değeri normal betonlar için yani C25/30 beton sınıfı ve alt gruplar için $k_1=0.85$, C25/30 beton sınıfı üstündeki betonlarda ise (3.5) bağıntısına göre hesaplanır.

$$k_1 = 0.85 - 0.006(f_{ck} - 25) \quad (3.5)$$

Beton sınıfının bir üst sınıfa geçmesi durumunda yani beton sınıflarında artış 5 MPa olduğunda k_1 değeri 0.03 azalmaktadır.

3.3 Çekme Kırılması

Betonarme kesitlerin tasarımında yapılan kabullerden birisi de basınç bölgesindeki betonun gerilme dağılışı eksenel yük altındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi yerine eşdeğer dikdörtgen gerilme dağılımının kullanılabileceğidir. Kesitin eğilme dayanımının belirleyen iki büyüklük basınç gerilmelerinin bileşkesi ve yeri olduğuna göre, gerçek gerilme dağılımı yerine aynı değeri verecek eşdeğer gerilme dağılımı kullanılması hesaplamalarda kolaylık sağlayacaktır. Şekil 3.4’de gerçek gerilme dağılımı yerine alınabilecek eşdeğer gerilme dağılımı verilmiştir. Burada, dikdörtgen gerilme bloğunun genişliği $0.85f_{ck}$ alınmıştır. Buradaki 0.85 katsayısı k_3 olarak belirlenen tüm beton sınıflarında aynı değer alınan bir katsayıdır. 0.85 değeri kolon deneylerinde betonun ezildiği andaki gerilme değerinin betonun karakteristik silindirik dayanımına oranıdır. Eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğunun derinliği (a) ise (x) tarafsız eksen derinliğinin k_1 ($a = k_1 x$) katı olarak alınır.



Şekil 3.4 Basınç gerilmeleri gerçek ve eşdeğer gerilme dağılımı

Dış kuvvetler etkisinde kesitte oluşan iç kuvvet eğilme momenti oluşturduğunda, denge durumunda betonarme kesitte iç kuvvetler oluşmaktadır. Basınç bölgesindeki beton

gerilmelerinin bileşkesi F_C ile çekme bölgesindeki donatılardaki gerilmelerin bileşkesi F_T denge durumunda bir birine eşittir. Çekme kırılması durumunda, yatay izdüşüm denklemi olarak (3.6) bağıntısı yazılır.

$$F_C = F_T \rightarrow 0.85 f_{ck} b_w a = A_s f_{yk} \quad (3.6)$$

Kesite etkiyen moment, kesitte oluşan bileşke kuvvetlerin oluşturduğu momente eşit olacağından, moment taşıma gücü, (3.7) bağıntısında verilen moment denge denklemleri ile bulunur.

$$M_r = F_T \cdot z = F_C \cdot z \rightarrow 0.85 f_{ck} b_w a \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_r = A_s f_{yk} \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (3.7)$$

3.4 Betonarme Kirişlerin Tasarım İlkesi

Betonarme kirişlerin tasarımında, statik çözümleme sonrası elde edilen iç kuvvetlere boyutlandırmak ve donatı koymak gerekir. Güvenlik esası çerçevesinde yapılacak hesaplamalarda amaca yönelik olarak aşağıdaki şartların sağlanması gerekir. Bunlar;

- Göçme limit durumundan belirli bir olasılık dahilinde uzak kalmak
- Kesit taşıma gücüne ulaştığında sünek davranışın gerçekleşmesi
- Aşırı deformasyon (sehim, çatlak genişliği ve titreşim gibi) nedenleri ile kullanım dışı kalmaması gerekir.

Bu şartlardan ilki, işletme yüklerinin yük katsayıları ile çarpılması, malzeme dayanımlarının malzeme katsayısına bölünmesi ve malzemenin gerçek davranışının dikkate alınması ile sağlanır. Diğer şartlar için betonarme kesite konulacak donatı miktarı için üstten ve alttan sınırlandırmak gerekir.

3.5 Donatı Sınırlandırılması

3.5.1 Minimum Donatı Yüzdesi

Çekme bölgesindeki beton çatladığı anda, o ana kadar beton ve çelik tarafından karşılan çekme kuvveti, ani olarak donatıya aktarılacaktır. Kirişte en az bu kuvveti taşıyacak kadar donatı yoksa gevrek bir kırılma biçimi ile karşılaşılacaktır. Bundan dolayı kesite en az donatının konulması gerekmektedir. TS 500/2000 de minimum donatı oranı,

$$\rho_{\min} = 0.8 \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} \quad (3.8)$$

olarak verilmiştir.

3.5.2 Sehim Denetim Sınırı için Maksimum Donatı Sınırı

Taşıma gücü yönteminde, malzeme hesap dayanımı ve basınç bölgesinde gerçek gerilme dağılımı yerine eşdeğer gerilme dağılımı alındığında müsaade edilen maksimum donatı oranı kullanıldığında boyutlar küçülebilir. Bu durumda kirişler aşırı sehim yaparak kullanım dışı kalabilir. Sehim hesabı yaparak oluşan çökmelerin kullanım sınırları içerisinde kalıp kalmadığı kontrol edilmesi gerekir. Bu hesaplar uzun zaman aldığından dolayı, donatı yüzdesi için bir üst sınır vererek, dolaylı yoldan kesit yüksekliği sınırlandırılabilir. Önerilen donatı oranı,

$$\rho_{\max} = \rho_l = 0.235 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \quad (3.9)$$

olarak verilmiştir.

3.5.3 Deprem Bölgelerindeki Yapılar için Maksimum Donatı Sınırı

Deprem etkilerine karşı kirişlerin büyük bir süneklığe sahip olmaları istenir. Şiddetli deprem etkisi altında açığa çıkan enerji, taşıyıcı sistemin büyük deformasyonlar yaparak absorbe etmesi gerekir. Önerilen donatı oranı,

$$\rho_{\max} = \rho_d = 0.6\rho_b \quad (3.10)$$

olarak belirlenmiştir.

3.5.4 Sünek Davranış için Maksimum Donatı Sınırı

Bu sınır, kesitteki maksimum donatı yüzdesinin, dengeli donatı yüzdesinden belirli bir oranda düşük kalmasıyla sağlanır. TS 500/2000 de sünek davranış için tanımlanan maksimum donatı oranı,

$$\rho_{\max} = \rho_m = 0.85\rho_b \quad (3.11)$$

olarak verilmiştir (Eren, 2003).

4. MATERYAL METOD

Betonarme yapılardaki kiriş ve döşeme gibi yatay taşıyıcı elemanlar, uygulanan düşey ve yatay yükler nedeni ile eğilmeye çalışırlar. Kiriş ve döşeme gibi eğilme elemanlarında çekme bölgesine yerleştirilen çelik çubuklar, basınç bölgesindeki betonun tam kapasite ile çalışmasını sağlar. Eğilmeye çalışan elemanların kesitlerinde, basınç bölgesindeki beton basınç bileşkesi F_C ve donatı çekme kuvveti F_T den oluşan bir kuvvet çifti etmektedir. Bu durumda, dış kuvvetler altındaki kesitin iç kuvvet denge durumu;

1. Yatay izdüşüm denge denklemi, $F_C = F_T$

2. Moment denge denklemi, $F_C \cdot (z) = F_T \cdot (z) = M_{res}$

sağlanmasıyla gerçekleşir.

Basınç bölgesindeki bileşke kuvvetin hesaplanmasında, eğilme durumunda kesitte meydana gelen deformasyon değerlerinden ve basınç bölgesindeki gerilme dağılımı için beton malzemeye ait gerilme-şekildeğiştirme (σ - ϵ) bağıntılarından yararlanılır. En alt çekme lifindeki beton birim deformasyonu betonun çekme sınır birim deformasyonunu aştığından, çekme bölgesindeki beton kesit çatlamıştır. Bu yüzden, çekme bölgesindeki bileşke kuvvet hesaplanmasında, betonun katkısı dikkate alınmaz. Çekme bölgesindeki bileşke kuvvet, çekme donatısındaki birim deformasyona bağlı oluşan gerilme dağılımına göre belirlenir. Hesaplarda, çeliğin gerilme-şekildeğiştirme (σ - ϵ) ilişkisi, elasto plastik bir eğri ile idealize edilir.

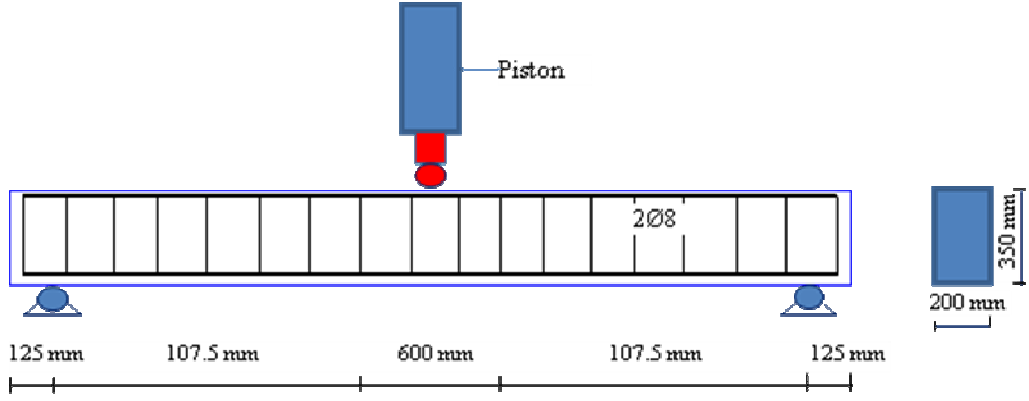
Kesit tasarımında dikkate alınan denge denklemlerinin, davranışı doğru biçimde belirleyebilmek için gerek malzeme gerekse eleman bazında bugüne kadar pek çok deneysel ve kuramsal çalışma yapılmış olmasına rağmen, hala hesaplarda kabul edilen varsayımlara bağlı yaklaşıklıklar söz konusudur. Bunun en önemli sebebi ise belirtilen değişkenlerin hem sayıca çok oluşu hem de çok geniş bir aralıkta değişim göstermesidir. Değişkenlerden bazıları beton basınç dayanımı, boyuna donatı geometrik oranı, akma dayanımı, türü, pekleşme oranı, enine donatı hacimsel oranı, aralık, çap ve akma dayanımı, elemana etkiyen eksenel kuvvetin seviyesi, kesit şekli, yükleme hızı, kesme

kuvvetlerinin ve olası aderans kayıplarının etkileridir. Bu etkilerin her birisinin, betonarme kesit davranışı üzerindeki katkıları farklı seviyelerdedir.

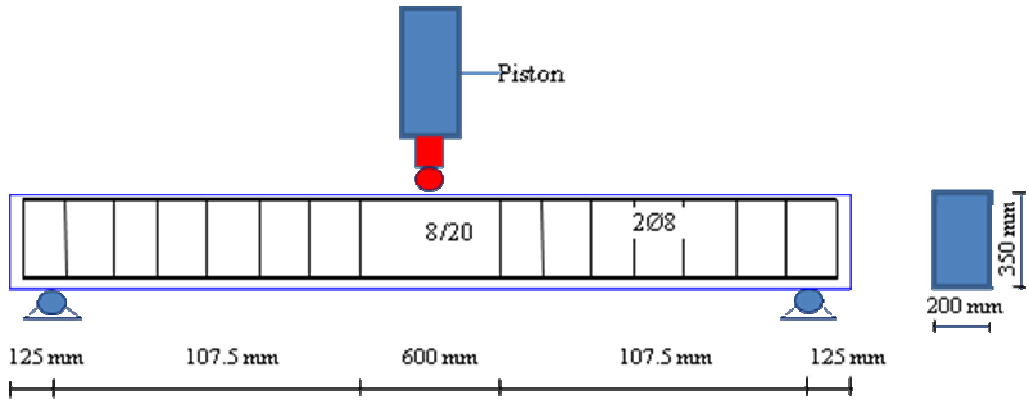
Bu çalışmada, farklı beton sınıfına bağlı betonarme kirişlerin eğilme kapasitelerinin deneysel olarak belirlenmesinde incelenecek parametreler beton sınıfları ve donatı miktarları olmuştur. Deneyler Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi bölümünde Bilimsel Araştırmalar Koordinasyon Birimi (BAP) destekleriyle kurulan Yapı Mekaniği Laboratuvar'ında gerçekleştirileceği için, kiriş numunelerinin belirlenmesinde mevcut imkanlar göz önüne alınmıştır.

4.1 Betonarme Test Kiriş Elemanları

Betonarme kiriş elemanları boyutları olarak daha önceki çalışmalarda kullanılan test numunelerinin kesit ölçüleri dikkate alınmıştır. Betonarme test kirişi olarak kesit genişliği 200 mm, yüksekliği 350 mm ve uzunluğu 3000 mm olan numuneler alınmıştır. Numunelerde iki farklı biçimde donatı düzenlenmesi kullanılmıştır. Birinci seriler, şekil 4.1'de verildiği şekliyle 600 mm uzunluktaki kiriş orta bölgesinde hiçbir etriye kullanılmadan boyuna donatı düzenlemesi yapılmıştır. İkinci serilerde ise kesme etkilerini de karşılamak üzere tüm kiriş uzunluğu boyunca etriyeler kullanılmıştır. Bu serilere ait donatı düzeni şekil 4.2'de verilmiştir. Bu seriler içerisinde iki farklı etriye düzenlenmesi yapılmıştır. Birinci grup düzenlemede etriye aralıkları kiriş boyunca 200 mm etriye aralığı sabit tutulmuş, ikinci grupta ise mesnet bölgesinde kesit yüksekliğinin 2 katı (2xh) bölgede 100 mm, orta bölgede ise 200 mm etriye aralıkları ile enine donatı düzenlemesi yapılmıştır. Boyuna donatı miktarları ise geometrik donatı oranlarına göre belirlenmiştir.



Şekil 4.1 Birinci seri betonarme kiriş numuneleri donatı düzeni



Şekil 4.2 İkinci seri betonarme kiriş numuneleri donatı düzeni

4.1 Malzeme

Betonarme elemanların davranışı üzerinde etkili çok sayıda değişkenlerden birisi de beton basınç dayanımıdır. Basınç dayanımı değişiminin kirişlerin eğilme kapasiteleri üzerinde etkisini belirlemek üzere üç farklı beton sınıfı çalışmada dikkate alınmıştır. Beton sınıflarının seçiminde uygulamada en çok kullanım alanı bulunan beton sınıfları dikkate alınmıştır. Beton malzemesi olarak C20/25, C30/37 ve C40/50 beton sınıfları alınmıştır. Üretilcek numunelerde homojenliği sağlamak üzere hazır beton üretimi tercih edilmiştir.

Donatı olarak ise Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007 (DBYBHY 07) esaslarına göre binalarda kullanılması zorunlu olan BÇ IIIa (S 420a) sınıfı alınmıştır.

4.2 Geometrik Donatı Oranı

Kiriş numunelere yerleştirilecek donatının geometrik oranı ise her beton sınıfında minimum donatı oranı ($\rho_{\min} = 0.8f_{ctd}/f_{yd}$), sehim denetimi gerektirmeyecek donatı oranı ($\rho_l = 0.235f_{cd}/f_{yd}$) ve süneklik koşulu için geçerli olan maksimum donatı oranı ($\rho_m = 0.85\rho_b$) olmak üzere üç farklı biçimde sınır değerler alınmıştır. Beton ve donatı sınıfına bağlı olarak hesaplanan donatı oranları çizelge 4.1 de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Donatı oranları ve alanları

Beton Özellikleri		C20/25	C30/37	C40/50
	f_{ck} (Mpa)	20	30	40
	f_{ctk} (Mpa)	1.57	1.92	2.21
	k_1	0.85	0.82	0.76
	E (Mpa)	28534	31801	34555
Donatı Oranları	$\rho_{\min} = 0.8f_{ctd}/f_{yd}$	0.00229	0.00280	0.00323
	$\rho_l = 0.235f_{cd}/f_{yd}$	0.00858	0.01287	0.01716
	$\rho_d = 0.6\rho_b$	0.00984	0.01424	0.01759
	$\rho_{\max} = 0.85\rho_b$	0.01394	0.02017	0.02492
	ρ_b	0.01640	0.02373	0.02932
Kesit (cm)		h	d^I	d
		35	3.5	31.5
Donatı Alanları	$A_{s(\min)} = (0.8f_{ctd}/f_{yd})b_w d$	1.44	1.77	2.04
	$A_{s(l)} = (0.235f_{cd}/f_{yd})b_w d$	5.42	8.13	10.84
	$A_{s(d)} = (0.6\rho_b)b_w d$	6.22	9.00	11.12
	$A_{s(\max)} = (0.85\rho_b)b_w d$	8.81	12.75	15.75

4.3 Deney Elemanlarının Üretilmesi

Deney numunelerin üretilmesi Sayın Prefabrik İnşaat San. Tic. Ltd. Şti ait prefabrik fabrikasında gerçekleştirildi. Fabrika imkanlarından yararlanarak kalıp hazırlanması ve

beton üretimi daha hassas biçimde gerçekleşti. Betonarme kirişlerin üretiminde kullanılan betonun karışım miktarları çizelge 4.2 de verilmiştir. Burada hazırlanan özel kalıplara birinci seri numuneler için çizelge 4.3 de, ikinci seri numuneler için çizelge 4.4 de verilen donatılar yerleştirilerek, beton dökümleri yapıldı. Beton dökümleri ile ilgili görüntüler resim 4.1-4.3’de verilmiştir. Deney numunelerin isimlendirilmesinde ilk sayı seri numarasını, B kirişi, B harfinin yanındaki rakam beton sınıfını, birinci serilerin sonunda yer alan harf ise geometrik donatı oranı simgelemektedir. M harfi minimum donatı oranı, D harfi sehim denetimi gerektirmeyen donatı oranını ve S harfi ise süneklik şartı için maksimum minimum donatı oranını ifade etmektedir. İkinci serilerin sonundaki harf ise N 20 cm etriye aralıklarını, K ise mesnet bölgesinin 70 cm lik alanda (2xh) 10 cm orta bölgede 20 cm etriye aralığını göstermektedir.



Resim 4.1 Betonarme kirişler donatılarının hazırlanması



Resim 4.2 Betonarme kirişlerin kalıplarının hazırlanması



Resim 4.3 Betonarme kirişlerin betonlanması

Çizelge 4.2 Beton sınıflarının karışım miktarları

1m ³ Beton İçin	C20/25	C30/37	C40/50
Çimento Miktarı (kg)	280	330	420
Su/Çimento Oranı (%)	0.6	0.5	0.4
1.Nolu Agrega (kg)	893	897	837
2.Nolu Agrega (kg)	658	661	616
3.Nolu Agrega (kg)	374	376	351
Katkı Miktarı (kg)	2.8	4.6	6.3

Çizelge 4.3 Birinci seri kiriş numuneleri beton ve donatı özellikleri

Numune	b _w (cm)	h (cm)	a (cm)	L (cm)	Beton sınıfı	Alt donatı	Üst donatı
(1Seri 1 numune) 1B20M	20	35	100	300	C20/C25	2Φ10	2Φ8
(1Seri 2 numune) 1B20D	20	35	100	300	C20/C25	5Φ12	2Φ8
(1Seri 3 numune) 1B20S	20	35	100	300	C20/C25	3Φ14+2Φ16	2Φ8
(1Seri 4 numune) 1B30M	20	35	100	300	C30/C37	2Φ8+1Φ10	2Φ8
(1Seri 5 numune) 1B30D	20	35	100	300	C30/C37	4Φ16	2Φ8
(1Seri 6 numune) 1B30S	20	35	100	300	C30/C37	3Φ14+4Φ16	2Φ8
(1Seri 7 numune) 1B40M	20	35	100	300	C40/C50	4Φ8	2Φ8
(1Seri 8 numune) 1B40D	20	35	100	300	C40/C50	3Φ14+3Φ16	2Φ8
(1Seri 9 numune) 1B40S	20	35	100	300	C40/C50	5Φ12+5Φ16	2Φ8

Çizelge 4.4 İkinci seri kiriş numuneleri beton ve donatı özellikleri

Numune	b _w (cm)	h (cm)	a (cm)	L (cm)	Beton sınıfı	Alt donatı	Üst donatı	Etriye
(2Seri 1 numune) 2B20MN	20	35	100	300	C20/C25	2Φ10	2Φ8	Φ8/20
(2Seri 2 numune) 2B20MK	20	35	100	300	C20/C25	2Φ10	2Φ8	Φ8/20/10
(2Seri 3 numune) 2B30MN	20	35	100	300	C30/C37	2Φ8+1Φ10	2Φ8	Φ8/20
(2Seri 4 numune) 2B30MK	20	35	100	300	C30/C37	2Φ8+1Φ10	2Φ8	Φ8/20/10
(2Seri 5 numune) 2B40MN	20	35	100	300	C40/C50	4Φ8	2Φ8	Φ8/20
(2Seri 6 numune) 2B40MK	20	35	100	300	C40/C50	4Φ8	2Φ8	Φ8/20/10

Üretilen betonarme kirişlere 100 gün sonunda yapı mekaniği laboratuvarında 50 ton kapasiteli rijit yükleme çerçevesinde üç noktalı eğilme testi yapılmıştır. Bu çalışmada, statik yükleme deneyleri yapılmıştır. Böylece, yüklemenin adım adım gerçekleşmesi, her adımda ölçümlerin sağlıklı yapılabilmesi ve yükleme adımları arasında numunelerin hasar durumlarının daha sağlıklı gözlenmesi için yeterli zaman olmasından dolayı statik yükleme tercih edilmiştir.

Deneysel çalışmada ölçüm düzeneği, yine BAP 10.TEF.10 nolu proje kapsamında alınan yerdeğiştirme ölçerler (displacement transducers) ve yük ölçerler (load cells) kullanılmıştır. Yerdeğiştirme ölçerler kiriş numunelerinin orta noktasında yerdeğiştirmeleri ölçmek için kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında deney kirişlerinde, ilk çatlak oluşana kadar yerdeğiştirme artırılmıştır. İlk çatlağa neden olan yerdeğiştirme ve P yük seviyesi belirlendikten sonra kırılmaya ulaşıncaya kadar yüklemeye devam edilmiştir. Numunelerin statik yükleme etkisindeki eğilme davranışları, numunelerin yük taşıma kapasiteleri, yerdeğiştirme süneklikleri, enerji yutma kapasiteleri gözönüne alınarak değerlendirilmiştir. Deneysel veriler, uygulanan düşey yük-düşey yerdeğiştirme ilişkileri şeklinde elde edilmiştir. Yük çerçevesinde kiriş numunelerin test görüntüleri resim 4.4 ve 4.5’de verilmiştir.



Resim 4.4 Rijit yükleme çerçevesinde 2. seri test numunesi



Resim 4.5 Betonarme kirişlerde yükleme durumu oluşan çatlakların görüntüsü

5. BULGULAR

Farklı beton sınıfına bağlı betonarme kirişlerin eğilme kapasitelerinin deneysel olarak belirlenmesi amacıyla, AKÜ Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında geniş kapsamlı deneyler yürütülmüştür. Bu tez çalışmasında, betonarme elemanların davranışı üzerinde etkili çok sayıda değişkenden bir kısmının etkileri deneysel olarak incelenmiştir. İncelenen değişkenler, eğilmeye çalışan betonarme elemanların davranışında önemli etkinliği olan beton basınç dayanımı ve donatı geometrik oranıdır. Bu değişkenleri incelemek amacıyla 15 adet C20/25, C30/37, C40/50 beton sınıflarından ve BÇ IIIa (S 420a) donatı türünden oluşan 20x35x300 cm boyutlarında betonarme kirişler üretilmiştir. Kirişlere yerleştirilecek donatının geometrik oranı ise her beton sınıfında minimum donatı oranı ($\rho_{\min} = 0.8f_{ctd}/f_{yd}$), sehim denetimi gerektirmeyecek donatı oranı ($\rho_l = 0.235f_{cd}/f_{yd}$) ve süneklik koşulu için geçerli olan maksimum donatı oranı ($\rho_m = 0.85\rho_b$) olmak üzere üç farklı biçimde alınmıştır. Kirişler üzerinde statik yükleme deneyleri yapılmıştır. Kiriş numunelerinin kuramsal taşıma güçlerine karşı gelen düşey yük (P_u) ile deneylerde ulaşılan en büyük yük (P_{deney}) belirlenerek, deneysel ve kuramsal taşıma güçlerinin oranları (P_{deney}/P_u) hesaplanmıştır.

5.1 Deneysel Sonuçlar

Yükleme deneylerine başlanmadan önce kiriş orta bölgesinde ultrases cihazı ile ultrases geçiş süreleri tespit edilmiştir. Daha sonra yüklemeye başlanarak ilk çatlak oluşumunda yükleme durdurulmuş, yük-yerdeğiştirme değerleri tespit edilmiş ve tekrar ultrases geçiş süreleri belirlenmiştir. Çizelge 5.1 de kirişlerde ilk çatlak oluşumuna neden olan P kuvveti ve yer değiştirmeler ile ultrases geçiş süreleri verilmiştir. Çizelge 5.2 de kirişlerin kırılma durumunda ölçülen P kuvveti ve yer değiştirmeler ile ultrases hızları verilmiştir.

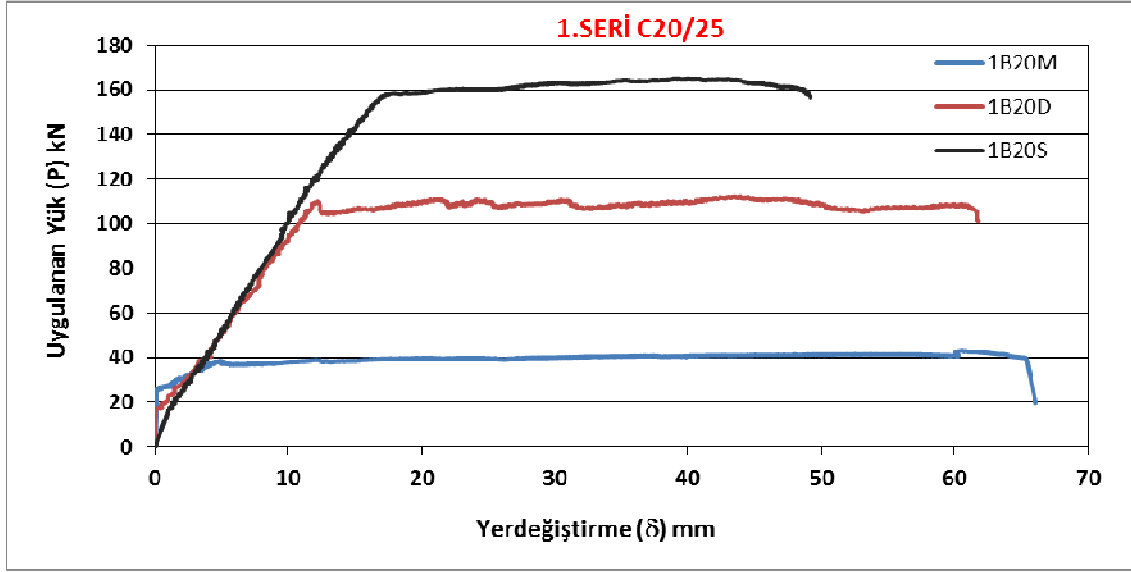
Çizelge 5.1 Betonarme kirişlerde ilk çatlak oluştuğu anındaki ölçümler

Numune	Yük (P)	Yer değiştirme (δ)	Çatlak Genişliği (w)	Ultrases Hızı	
	(kN)	(mm)	(mm)	Çatlak öncesi	Çatlak sonrası
				(m/sn)	(m/sn)
1B20M	25.14	4.0	0.10	4097	3595
1B20D	66.60	7.1	0.16	3988	2906
1B20S	77.10	7.7	0.12	4796	4030
1B30M	42.62	5.6	0.10	3868	2764
1B40M	32.00	8.4	0.12	4219	3874
1B40D	67.66	5.4	0.10	4259	3924
1B40S	119.18	3.2	0.08	4623	4463
2B20MN	20.42	1.6	0.20	4154	2909
2B20MK	22.84	2.2	0.14	3924	2452
2B30MN	21.18	1.8	0.24	3907	2124
2B30MK	18.13	2.6	0.10	4154	2922
2B40MN	20.88	2.8	0.20	4259	3051
2B40MK	20.11	2.0	0.12	3896	2528

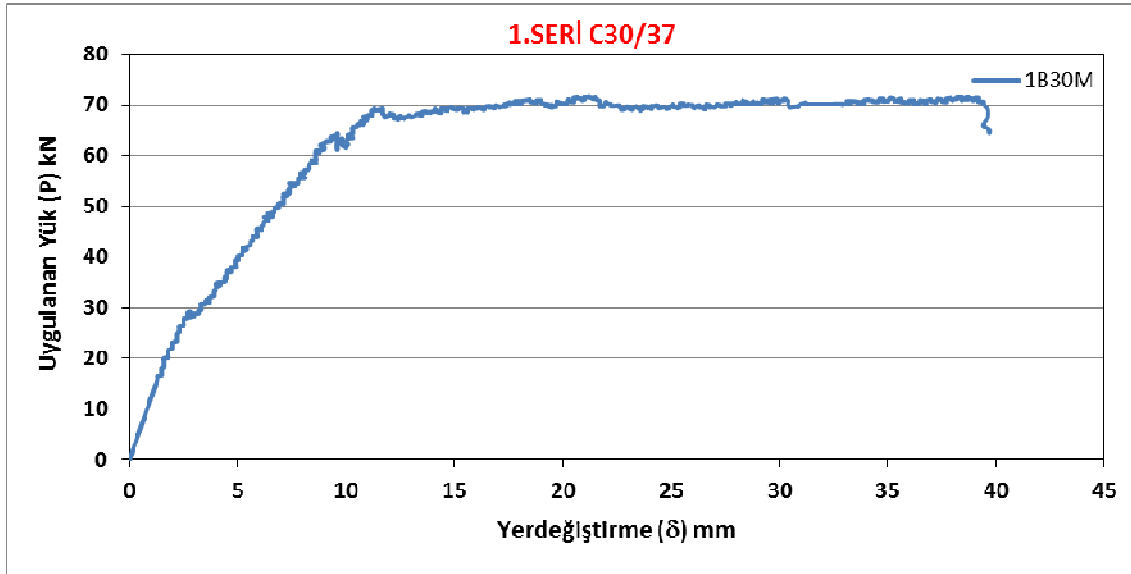
Çizelge 5.2 Betonarme kirişlerde kırılma durumundaki ölçümler

Numune	Yük (P)	Yer değiştirme (δ)	Çatlak Genişliği (w)	Ultrases Hızı
	(kN)	(mm)	(mm)	(m/sn)
1B20M	43.13	66.1	3.60	2237
1B20D	112.32	61.8	4.80	1680
1B20S	164.9	49.2	4.00	2594
1B30M	71.78	39.7	3.80	1543
1B40M	50.44	60.8	5.00	2417
1B40D	184.26	25.3	3.80	3868
1B40S	269.18	16.6	1.80	3771
2B20MN	38.10	44.7	7.00	1678
2B20MK	48.61	34.8	5.00	2452
2B30MN	29.41	69.3	8.00	1531
2B30MK	43.28	79.0	7.00	1366
2B40MN	47.39	20.3	3.00	4259
2B40MK	49.22	72.0	11.00	3896

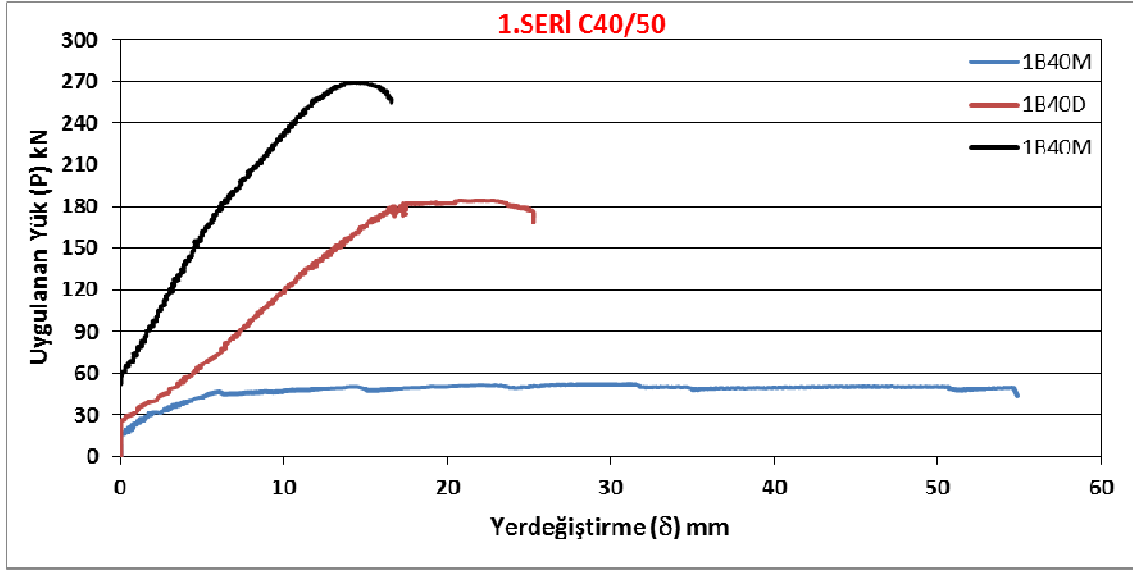
Kiriş numunelerinin yükleme durumundaki yük-yerdeğiştirme ilişkileri seriler ve beton sınıfları için şekil 5.1-5-6 da verilmiştir. 1. seri grubunda C20/25 betonundan üretilen minimum, sehim denetimi gerektirmeyen sınır ve süneklik için maksimum donatı oranlarına sahip kirişlerin yük-yerdeğiştirme ilişkileri şekil 5.1, C30/37 için şekil 5.2 ve C40/45 için şekil 5.3’de verilmiştir. 2. seri grubunda C20/25 betonundan üretilen 20 cm aralıklı ve sıklaştırma bölgesinde 10 cm orta bölgede 20 cm aralıklı etriyeler için şekil 5.4, C30/37 için şekil 5.5 ve C40/45 için şekil 5.6’da verilmiştir.



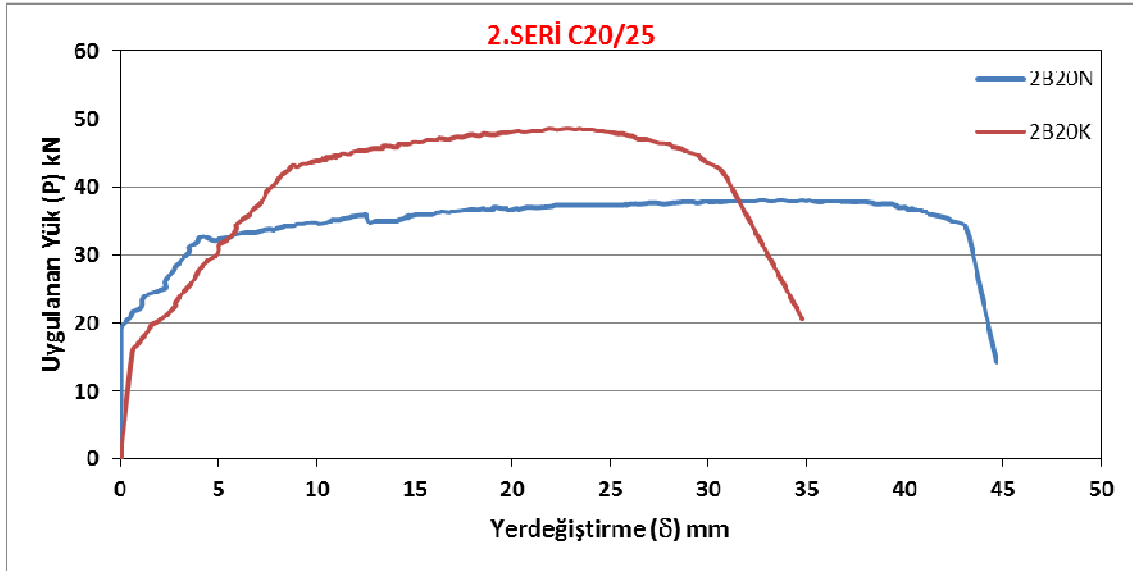
Şekil 5.1 1. Seri C20/25 betonlu test numunelerinin yük-yerdeğiştirme eğrisi



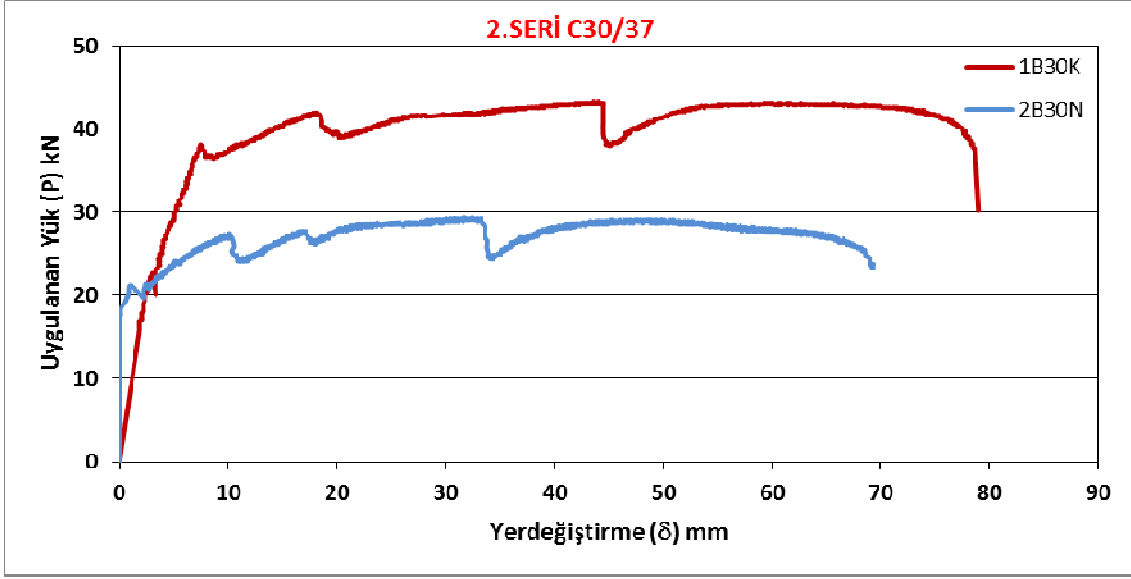
Şekil 5.2 1. Seri C30/37 betonlu test numunesinin yük-yerdeğiştirme eğrisi



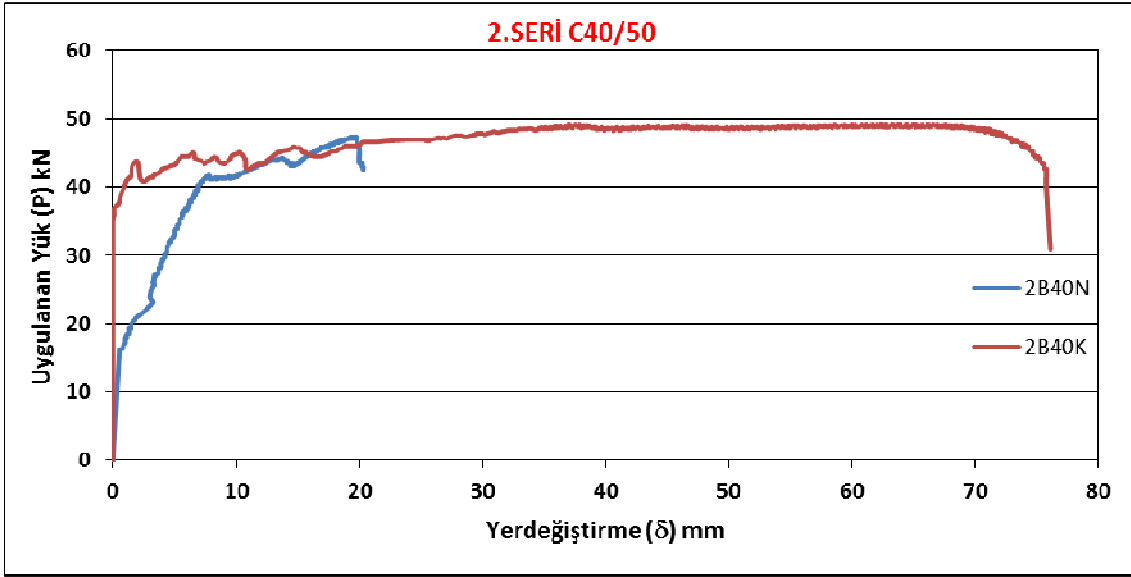
Şekil 5.3 1. Seri C40/50 betonlu test numunelerinin yük-yerdeğiştirme eğrisi



Şekil 5.4 2. Seri C20/25 betonlu test numunelerinin yük-yerdeğiştirme eğrisi



Şekil 5.5 2. Seri C30/37 betonlu test numunelerinin yük-yerdeğiştirme eğrisi



Şekil 5.6 2. Seri C40/50 betonlu test numunelerinin yük-yerdeğiştirme eğrisi

Deneyde kullanılan beton sınıfının karakteristik dayanımını belirlemek amacıyla, deney numune kirişleri ile aynı ortam şartlarında bulunan 15 cm lik küp numuneler beton presinde kırılarak, serilere ait karakteristik beton basınç dayanımı sonuçları çizelge 5.3-5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. 1. Seri için beton basınç dayanım sonuçları

Seri		Beton Sınıfı	Numune	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
1. Seri	1B20M	C20/25	1	30.24	30.63
	1B20D		2	31.89	
	1B20S		3	29.75	
	1B30M	C30/37	1	39.70	38.10
			2	38.38	
			3	36.22	
	1B40M	C40/50	1	51.68	48.95
	1B40D		2	49.00	
	1B40S		3	46.17	

Çizelge 5.4. 2. Seri için beton basınç dayanım sonuçları

Seri		Beton Sınıfı	Numune	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
1. Seri	2B20MN 2B20MK	C20/25	1	27.66	29.08
			2	29.70	
			3	29.88	
	2B30MN 2B30MK	C30/37	1	35.04	35.41
			2	38.47	
			3	32.72	
	2B40MN 2B40MK	C40/50	1	49.09	46.41
			2	43.36	
			3	46.77	

Deneyde kullanılan donatı sınıfının mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, test sonrası deney numune kırılganlığının mesnet bölgelerinden kırılarak çıkartılan donatılar üniversal çekme cihazında çekme deneyine tabii tutulmuş ve donatıların akma ve çekme dayanım sonuçları çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.5 Numunelerde kullanılan donatıların çekme deneyi sonuçları

Donatı Çapı (mm)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
8	478.5	593.0
10	541.5	632.0
12	436.0	561.5
14	446.5	570.0
16	462.5	603.5

Kiriş numunelerinin kuramsal taşıma güçlerine karşı gelen düşey yük (P_u) belirlenmesinde en dış beton basınç lifinde kısılmanın 0.003 olduğu donatıların gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin ise ideal elasto-plastik olduğu kabul edilmiştir. Hesaplamalarda çekme bölgesinde yer alan alt donatı ve basınç bölgesinde yer alan üst donatıya göre çift donatılı ve tek donatılı kesit hesaplamaları betonarme taşıma gücü hesap yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Kuramsal sonuçlara ait veriler çizelge 5.6'da, sonuçlar çizelge 5.7'de verilmiştir.

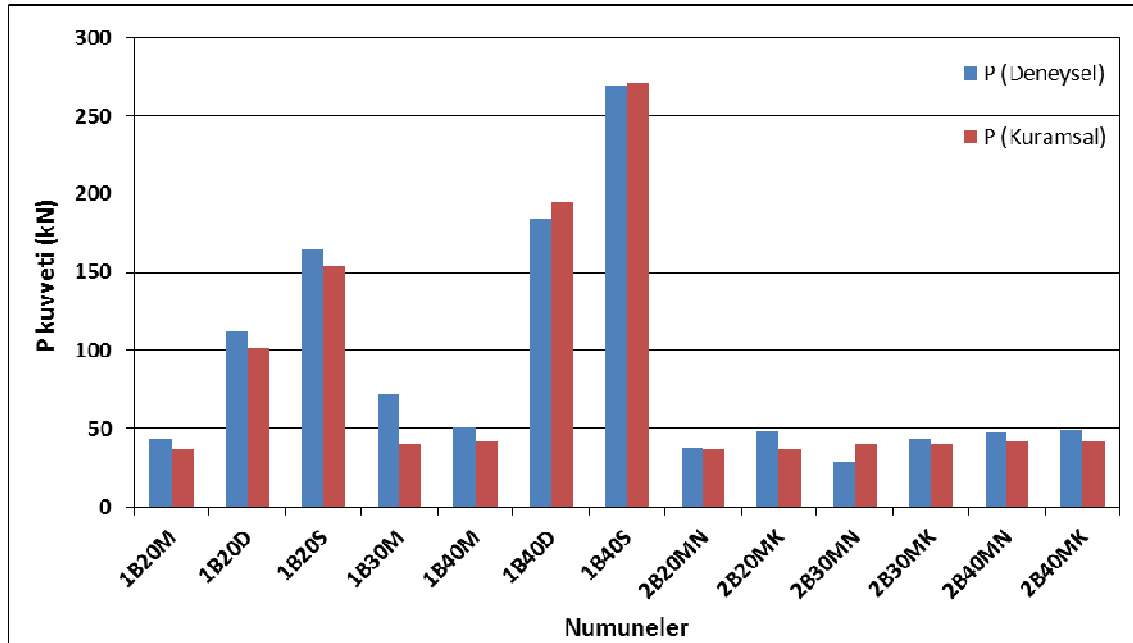
Çizelge 5.6 Kuramsal hesaplamalarda kullanılan veriler

Numune	Üst Donatı		Alt Donatı	f_{ck} (Mpa)	bw (cm)	d (cm)	d' (cm)	k_1
	f_{yk} (Mpa)		f_{yk} (Mpa)					
1B20M	2Φ10	-	2Φ8	24.50	20	31	4	0.85
	541.5	-	478.5					
1B20D	5Φ12	-	2Φ8	24.50	20	31	4	0.85
	436.0	-	478.5					
1B20S	3Φ14	2Φ16	2Φ8	24.50	20	31	4	0.85
	446.5	-	478.5					
1B30M	2Φ8	1Φ10	2Φ8	30.48	20	31	4	0.79
	478.5	541.5	478.5					
1B40M	4Φ8	-	2Φ8	39.16	20	31	4	0.76
	478.5	-	478.5					
1B40D	3Φ14	3Φ16	2Φ8	39.16	20	31	4	0.76
	446.5	462.5	478.5					
1B40S	5Φ12	5Φ16	2Φ8	39.16	20	31	4	0.76
	436.0	462.5	478.5					
2B20MN	2Φ10	-	2Φ8	23.26	20	31	4	0.85
	541.5	-	478.5					
2B30MN	2Φ8	1Φ10	2Φ8	28.33	20	31	4	0.82
	478.5	541.5	478.5					
2B40MN	4Φ8	-	2Φ8	37.13	20	31	4	0.76
	478.5	-	478.5					

Çizelge 5.7 Kuramsal nihai taşıma gücü hesabı

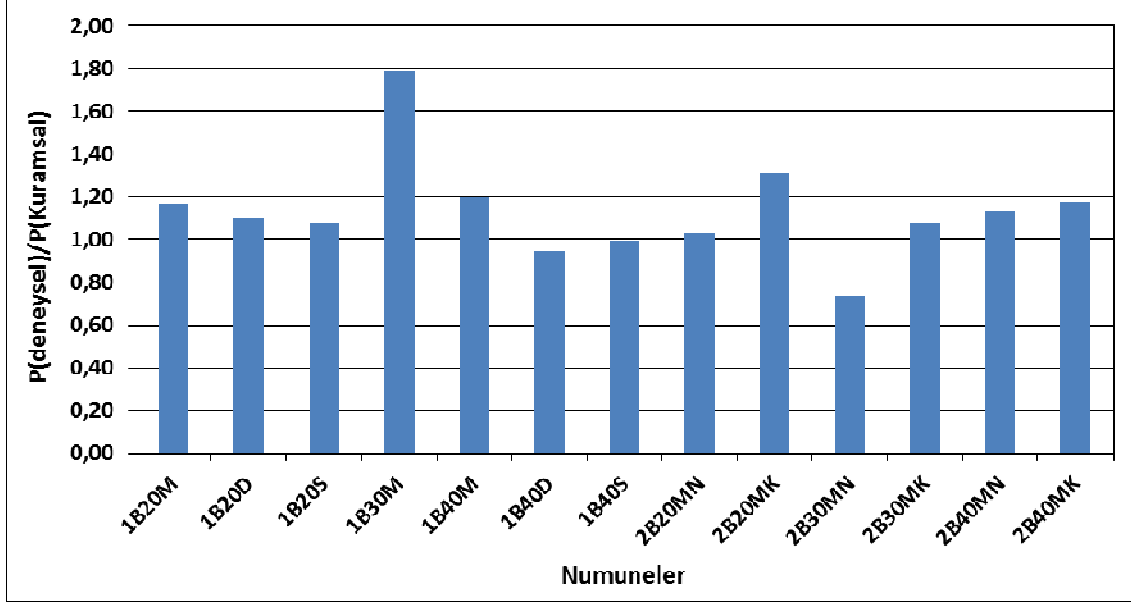
Numune	Tek Donatılı Kesit Hesabı			Çift Donatılı Kesit Hesabı		
	x	M_r	P_u	x	M_r	P_u
1B20M	2.40	25.5	37	2.64	27.9	-
1B20D	6.97	69.2	101	6.10	69.9	102
1B20S	11.08	103.1	150	9.89	105.6	154
1B30M	2.21	27.3	40	2.51	27.4	-
1B40M	1.90	29.1	42	2.28	29.4	-
1B40D	9.59	132.8	193	8.81	134.4	195
1B40S	14.07	182.6	266	13.15	186.0	271
2B20MN	2.53	25.5	37	2.72	25.5	-
2B30MN	2.30	27.3	40	2.56	27.4	-
2B40MN	2.01	29.1	42	2.35	29.3	-

Kiriş numunelerinin kuramsal taşıma güçlerine karşı gelen düşey yük (P_u) ile deneylerde ulaşılan en büyük yük (P_{deney}) ilişkileri ise şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.7 Deneysel ve kuramsal olarak belirlenen kırılma yükleri

Deneysel olarak belirlenen ve kuramsal olarak hesaplanan taşıma güçlerinin oranları (P_{deney}/P_u) hesaplanmış ve şekil 5.8’de değişimleri verilmiştir.



Şekil 5.8 P_{deney}/P_u oranları

6. SONUÇLAR

Farklı beton sınıfına ve geometrik donatı oranlarına bağlı betonarme kirişlerin eğilme kapasitelerinin deneysel olarak belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar ile betonarme taşıma gücü hesap esasları kullanılarak yapılan kuramsal hesaplamalar sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Sünek davranış sınırları içerisinde çekme donatısının miktarına bağlı olarak kesitin eğilme taşıma gücünde artışlar olmuştur.
- Betonarme kirişlerde ilk çatlağı oluşturan P kuvveti, ortalama olarak P_u kırılma yükünün %50 civarında olduğu belirlenmiştir.
- Kırılma durumundaki yerdeğiştirme ile ilk çatlağın olduğu andaki düşey yerdeğiştirme değerleri arasındaki orana bağlı yerdeğiştirme sünekliği beton sınıfı yükseldikçe azalmıştır.
- Aynı geometrik büyüklük ve boyuna donatılara sahip betonarme kiriş numunelerde, maksimum moment bölgesinde etriye ilavesi ile eğilme kapasitelerinde artış olmamıştır. Betonarme kirişlerin mesnet bölgelerinde yapılan etriye sıklaştırması, kesme kapasitesinin yanında eğilme kapasitesinin de artışına neden olmuştur.
- Beton sınıfı yükseldikçe kirişlere yerleştirilen etriye hem eğilme kapasitesini hem de yerdeğiştirme sünekliliği daha fazla artırmıştır.
- Betonarme kirişlerin üretiminde kullanılan beton ve çeliğin gerçek mekanik özellikleri kullanılarak kuramsal olarak hesaplanan kırılma durumunda eğilme momenti ve bu momente neden olan P_u kuvveti, deneysel olarak belirlenen kırılmaya götüren yük seviyesine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Deneysel gözlemler, kuramsal olarak ortaya konan davranış biçimlerini ve taşıma gücü prensiplerini çok iyi bir şekilde sergilemiştir.
- Beton ve çelik malzemesinin dayanım sınırına ulaşması ile kırılmanın gerçekleşmesinin taşıma taşıma gücü hesap yönteminin gerçeğe oldukça yakın bir hesaplama sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

Betonarme kesit hesaplamalarında, basınç bölgesinde betonun tek eksenli gerilme-şekildeğiştirme ilişkisine bağlı gerilme dağılımı yerine eşdeğer

dikdörtgen gerilme dağılımının kullanılması kabulünün gerçek davranışa uygun sonuçlar verdiği görülmüştür.

Yapılan deneysel ve kuramsal hesaplamalar, betonarme elemanların betonarme davranış esaslarına göre hesaplanıp, üretilmesi durumunda yapılan kabullerin gerçekçi olduğunu ortaya koymuştur.

7. KAYNAKLAR

- Abrams, D.P. (1991). Laboratory definitions of behavior for structural components and building systems, Earthquake-Resistant Concrete Structures Inelastic Response and design, American Concrete Institute, 91-152.
- Adhikary, B.B., Mutsuyoshi H. (2006). Shear strengthening of reinforced concrete beams using various techniques. *Construction and Building Materials*, **20**: 366–373.
- Ashour, A.F. (2006). Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars. *Construction and Building Materials*, **20**: 1005–1015.
- Belgin, Ç. M., Şener S. (2007). Aşırı donatılı kirişlerde boyut etkisinde kırılma parametrelerinin doğrusal ve doğrusal olmayan analizi. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, **22**;1: 149-156.
- Can, H., Göğüş M.H. ve Demirel Y. (2002). Betonarme Kirişlerin Açıklık Ortasına Kolon Ekleme Yöntemiyle Güçlendirilmesi *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, **17**;3 : 121-135.
- Celep, Z., Kumbasar N. (1998). Betonarme Yapılar. Beta Dağıtım, İstanbul.
- Cılız, İ.M. (2007). Düşük Dayanımlı Betonla Üretilmiş T Kesitli Betonarme Kirişlerin CFRP İle Güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- DBYBHY 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- El-Dash, K.M. and Ahmad, S.H. (1994). A model for the stress-strain relationship of rectangular confined normal and high strength columns. *Materials and Structures*, **27**: 572-579.
- Eren, İ. (2003). Betonarme I, Taşıma Gücü ve Kesit Hesapları. TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul Şubesi, İstanbul, 1-4.
- Ersoy, U. (1998). Betonarme kiriş ve kolonların moment kapasitelerinin saptanması. *İMO Teknik Dergi*, 1781-1787.

- Ersoy, U., Özcebe G. (2001), Betonarme Temel İlkeler TS - 500 - 2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap. Evrim Kitabevi, İstanbul.
- Junior, F.S. and Venturini W.S. (2007). Damage modelling of reinforced concrete beams. *Advances in Engineering Software* **38**: 538–546.
- Kaltakçı, M.Y., Arslan M.H., Yılmaz Ü.S. (2005). Malzeme Sünekliğinin Sistem Sünekliğine Olan Etkisi Üzerine Bir Çalışma. Deprem Sempozyumu Kocaeli 2005, Kocaeli, 23-25 Mart 2005, 881-893.
- Kaplan, H. ve Şenel Ş.M. (2002). Değişik donatı taşıyan denge altı betonarme kirişlerinin eğilme davranışının tersinir yükleme altında incelemesi. TÜBİTAK INTAG 564 nolu proje.
- Kara, İ.F., Dündar C. (2009). Effect of loading types and reinforcement ratio on an effective moment of inertia and deflection of a reinforced concrete beam. *Advances in Engineering Software*, **40**: 836–846.
- Kassoul, A., Bougara A. (2010). Maximum ratio of longitudinal tensile reinforcement in high strength doubly reinforced concrete beams designed according to Eurocode 8. *Engineering Structures*, **32;10**: 3206-3213.
- Kumbasar, N. ve İlki A. (1999). Betonarme elemanlarının tekrarlı yükler altında doğrusal olmayan davranışı. TÜBİTAK INTAG 559 nolu proje.
- Özcebe, G., Ersoy, U. ve Tankut T. (1997). Yüksek dayanımlı betondan yapılan betonarme elemanların dayanım ve davranışlarının incelenmesi. TÜBİTAK INTAG 502 nolu proje.
- TS 500 (2000). Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara.
- Yazgı, Z. (2007). Dikdörtgen Kesitli Basit Mesnetlenmiş Kirişlerin Eğilme Yönünden Karbon ve Cam Liflerle Güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yehia, N.A.B. (2009). Fracture mechanics approach for flexural strengthening of reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, **31**: 404-416.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Veyis Kemal ÖZHAN
Doğum Yeri ve Tarihi : Çorum 27.08.1985
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 05068237980/veyisozhan@hotmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Ankara-Keçiören İncirli Lisesi 2002
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi 2009
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi 2012

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Sayın Prefabrik İnş.San.Tic.Ltd.Şti. 2011

Yayınları (SCI ve diğer) :

Diğer konular