

**EĞİLME ALTINDA ÇENTİKLİ KİRİŞLERDE
FARKLI MALZEMELER İÇİN BOYUT ETKİSİ**

Nazim MANİÇ

**Yüksek Lisans Tezi
(İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)
93675**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

Eylül 2000

ANKARA

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Nazim MANİĆ tarafından hazırlanan EĞİLME ALTINDA ÇENTİKLİ KİRİŞLERDE FARKLI MALZEMELER İÇİN BOYUT ETKİSİ adlı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.



Prof. Dr. Sıddık ŞENER
Tez Yöneticisi

Bu çalışma jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Zekai Celik



Üye : Prof. Dr. Sıddık Şener



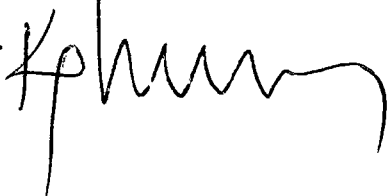
Üye : Doç. Dr. Abdurrahman Arslan



Üye :

Üye :

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	v
SİMGELER.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI.....	4
2.1. Bu Konudaki Önemli Çalışmalar.....	4
3 BOYUT ETKİSİ.....	6
3.1. Boyut Etkisinin Uygulanması.....	7
3.2. En Büyük Yük Sonrası Yerdeğiştirmelerde Boyut Etkisi.....	8
3.3. Gevrek ve Sünek Kırılma	11
3.4. Boyut Etkisinin Enerji İle Açıklanması.....	12
3.5. Kırılma Parametrelerinin Boyut Etkisi ile Bulunması.....	18
3.5.1. Doğrusal regrasyon.....	18
3.5.2. Yaddoğrusal kırılma.....	20
3.6. Kırılma Bölgesi.....	21
3.7. Gevreklik Sayısı.....	23
3.8. Diğer Boyut Etkisi Biçimleri.....	24
3.8.1. Rastgele dayanım yüzünden olasılıksal boyut etkisi.....	24
3.8.2 Farklı rutubet ve kuruma yüzünden boyut etkisi.....	24

3.8.3	Çeper yüzünden boyut etkisi.....	24
3.8.4	Agrega boyutunun etkisi.....	25
4.	DENEY NUMUNELERİ VE DENEY ŞEKLİ.....	26
5.	NORMAL BETON.....	36
5.1.	Genel Bilgi.....	36
5.2.	Göçmede Davranış.....	36
5.3.	Deney Kirişlerin Hazırlanması.....	37
5.4.	Eğilmede Davranış.....	38
6.	YÜKSEK DAYANIMLI BETON.....	39
6.1.	Genel Bilgi.....	39
6.2.	Göçmede Davranış.....	41
6.3.	Deney Numuneleri.....	42
6.4.	Eğilmede Davranış.....	42
7.	HAFİF BETON.....	44
7.1.	Genel Bilgi.....	44
7.2.	Göçmede Davranış.....	46
7.3.	Kullanım Alanları.....	46
7.4.	Hafif Betonun Sınıflandırılması.....	47
7.4.1.	Hafif agregalı beton.....	47
7.4.2.	İnce daneli beton.....	47
7.4.3.	Boşluklu beton.....	48
7.5.	Hafif Betonun Karışım Hesapları.....	48
7.6.	Eğilmede Davranış.....	52
8.	LİFLİ BETON.....	53

8.1.	Lifli Betonun Çeşitleri.....	53
8.2.	Çelik Lifli Betonun Genel Tanıtımı.....	55
8.3.	Çelik Lifli Betonun Özellikleri.....	56
8.4.	Çelik Lifli Betonun Kullanım Alanları.....	57
8.5.	Göçmede Davranış.....	57
8.6.	Deney Numuneleri.....	57
8.7.	Eğilmede Davranış.....	59
9.	DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	61
9.1.	Sonuçların Analizi.....	61
9.1.1.	Normal beton kirişlerin deney sonuçları.....	61
9.1.1.1	Yükleme genişliği sabit kirişlerinde deney sonuçları.....	61
9.1.1.2.	Yük genişliği değişen kirişlerde deney sonuçları.....	64
9.1.2.	Yüksek dayanımlı beton kirişlerinin deney sonuçları.....	66
9.1.3.	Hafif beton kirişlerinin deney sonuçları.....	68
9.1.4.	Çelik lifli beton kirişlerinin deney sonuçları.....	70
9.2.	Sonuçların Değerlendirilmesi.....	72
9.2.1.	Normal betonun deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	72
9.2.1.1.	Mesnet genişliği sabit kirişler.....	72
9.2.1.2.	Mesnet genişliği değişken kirişler.....	75
9.2.2.	Yüksek dayanımlı betonun deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	77
9.2.3.	Hafif betonun deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	79
9.2.4.	Çelik lifli betonun deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	81
9.3.	Regresyon Hesapları.....	83
9.4.	Bütün Sonuçların Birlikte Değerlendirilmesi.....	88
9.5.	Eksenel Yerdeğiştirmeler.....	89
9.6.	Kırılma Mekanizması.....	100

10.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	104
10.1.	Gelecek Araştırmalara Öneriler.....	105
	KAYNAKLAR.....	107
	ÖZGEÇMİŞ.....	111



EĞİLME ALTINDA ÇENTİKLİ KİRİŞLERDE FARKLI MALZEMELER İÇİN BOYUT ETKİSİ

Nazim MANİĆ

(Yüksek Lisans Tezi)

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Eylül 2000**

ÖZET

Bu çalışmada basit mesnetli, üç nokta yüklemesi altında açıklık ortasında çentik içeren farklı boyutlu kirişlerin deney sonuçları verilmiştir. Deney numuneleri normal beton, yüksek dayanımlı beton, hafif beton ve çelik lifli betondan yapılmış olup en büyük agrega çapı 10 mm dir. Üç farklı uzunlukta (200, 400 ve 800 mm), ve üç farklı yükseklikte (40, 80, ve 160 mm), üçüncü boyut sabit (40 mm) kirişler denenmiştir. Kirişler iki boyutta farklı, geometrik olarak benzerdir. Sonuçlar Bazant'ın önerdiği yaklaşık boyut etkisi ifadesini sağlamaktadır.

Bilim Kodu : 624.03.01

Anahtar Kelimeler : Boyut etkisi, kırılma enerjisi, gevrek, sünek, kırılma bölgesi, çatlak, göçme

Sayfa Adedi : 111

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Sıddık ŞENER

**SIZE EFFECT TESTS OF NOTCHED
BEAMS IN BENDING WITH DIFFERENT MATERIALS**

(M. Sc. Thesis)

Nazim MANIĆ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

September 2000

ABSTRACT

In this study the results of simply supported three point bend beams of different sizes containing notch at the mid span are reported. The specimens were made of normal concrete, high strength concrete, light weight concrete and steel fiber concrete with maximum aggregate size 10 mm. Beams of the three different length (200, 400 and 800 mm) and three different heights (40, 80 and 160 mm) were tested. The beams were geometrically similar in two dimensions. The results reveal the size effect which can be approximately proposed by Bažant.

Science Code :624.03.01

Key Words :Size effect, fracture energy, brittle, ductile,
fracture zone, crack, failure

Page Number : 111

Adviser :Prof. Dr. Sıddık ŞENER

TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanması sürecinde benim için değerli zamanlarını ayırarak, çalışmalarına yön veren , yapıcı öneriyle büyük katkılarda bulunan sayın hocam Prof. Dr. Sıddık ŞENER' e şükran ve saygı duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

Deneyler sırasında yardımlarını esirgemeyen Uzman Faruk Ogün'e, deney sırasında ve deney sonuçların değerlendirilmesinde büyük yardımda bulunan Araş. Görev. Özgür Anıl'a , Araş. Görev. Çağatay Belgin'e ve Araş. Görev. Ufuk Çağdaş' a yürekten teşekkür ederim.

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Yüksekliğin kesit boyutuna oranının dayanıma etkisi.....	33
Çizelge 7.1. Hafif agregaların birim ağırlığı.....	49
Çizelge 7.2. Beton sınıfına göre yaklaşık çimento ağırlıkları.....	50
Çizelge 9.1. Normal beton kirişlerin deney sonuçları.....	62
Çizelge 9.2. Normal betonun doğrusal regresyonu.....	63
Çizelge 9.3. Normal betonun doğrusal regresyon sonuçları.....	63
Çizelge 9.4. Yinelenen normal betonun deney sonuçları.....	64
Çizelge 9.5. Yinelenen normal betonun doğrusal regresyonu	65
Çizelge 9.6. Yinelenen normal betonun doğrusal regresyon sonuçları.....	65
Çizelge 9.7. Yüksek dayanımlı betonun deney sonuçları.....	66
Çizelge 9.8. Yüksek dayanımlı betonun doğrusal regresyonu.....	67
Çizelge 9.9 Yüksek dayanımlı betonun doğrusal regresyon sonuçları.....	67
Çizelge 9.10. Hafif betonun deney sonuçları.....	68
Çizelge 9.11. Hafif betonun doğrusal regresyonu	69
Çizelge 9.12. Hafif betonun doğrusal regresyon sonuçları.....	69
Çizelge 9.13. Çelik lifli betonun deney sonuçları.....	70
Çizelge 9.14. Çelik lifli betonun doğrusal regresyonu.....	71
Çizelge 9.15. Çelik lifli betonun doğrusal regresyon sonuçları.....	71
Çizelge 9.16. Normal betonun regresyon hesapları.....	83
Çizelge 9.17. Yinelenen normal betonun regresyon hesapları.....	84
Çizelge 9.18. Yüksek dayanımlı betonun regresyon hesapları.....	85
Çizelge 9.19. Hafif betonun regresyon hesapları.....	86
Çizelge 9.20. Çelik lifli betonun regresyon hesapları.....	87

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil.....	Sayfa
Şekil 3.1. Weibull zincir teorisi ve Donnell paralel bağ teorisi.....	7
Şekil 3.2. Boyut etkisi yasası.....	9
Şekil 3.3. Gevrek, yarı gevrek ve sünek malzemeler.....	10
Şekil 3.4. Gevrek ve sünek kırılma.....	12
Şekil 3.5. Boyut etkisinin enerji ile açıklanması.....	13
Şekil 3.6. Boyut etkisinin grafik gösterimi.....	17
Şekil 3.7. Doğrusal regrasyon.....	19
Şekil 3.8. Yaddoğrusal kırılma.....	20
Şekil 3.9. Farklı malzemelerin çatlak tepesindeki kırılma bölgeleri.....	22
Şekil 4.1. Deney numunelerin boyutları	27
Şekil 4.2. Yükleme düzeneği.....	28
Şekil 4.3. Beton basınç dayanımı.....	31
Şekil 4.4. Beton basınç dayanım deneyi.....	32
Şekil 4.5. Betonun basınçta davranışı.....	34
Şekil 4.6. Deney türüne göre betonun çekme dayanımı.....	35
Şekil 5.1. Betonun mukavemetine göre σ - ϵ diyagramı.....	36
Şekil 5.2. Normal beton kiriş eğilmesinde gerilme dağılımı.....	38
Şekil 6.1. Süper akışkanlaştırıcı ve silis dumanın katkısı.....	40
Şekil 6.2. Farklı betonlarda σ - ϵ diyagramı.....	41
Şekil 6.3. Yüksek dayanımlı beton kiriş eğilmesinde gerilme diyagramı.....	42
Şekil 7.1. σ - ϵ diyagramı.....	46
Şekil 7.2. Hafif betonun eğilmesinde gerilme diyagramı.....	52
Şekil 8.1. Çimento bazlı çeşitli kompozitlerin yüksek ve düşük kırılma uzamasına sahip matriks ve liflerin şematik σ - ϵ diyagramları.....	54
Şekil 8.2 Çeşitli geometrideki çelik lifler.....	55
Şekil 8.3. Dramix çelik teli.....	58
Şekil 8.4. Çelik lifli beton kiriş eğilmesinde gerilme dağılımı.....	59
Şekil 9.1. Normal betonun doğrusal regresyon ve yaddoğrusal kırılma mekaniği.....	74

Şekil 9.2. Yinelenen normal betonun doğrusal regresyon ve yaddoğrusal kırılma mekaniği	76
Şekil 9.3. Yüksek dayanımlı betonun doğrusal regresyon ve yaddoğrusal kırılma mekaniği	78
Şekil 9.4. Hafif betonun doğrusal regresyon ve yaddoğrusal kırılma mekaniği.....	80
Şekil 9.5. Çelik lifli betonun doğrusal regresyon ve yaddoğrusal kırılma mekaniği	82
Şekil 9.6. Bütün kirişlerin deney sonuçları.....	88
Şekil 9.7. Normal betonun yük-düşey yerdeğiştirme	90
Şekil 9.8. Normal betonun yük-yatay yerdeğiştirme	91
Şekil 9.9. Yinelenen normal betonun yük-düşey yerdeğiştirme.....	92
Şekil 9.10. Yinelenen normal betonun yük-yatay yerdeğiştirme	93
Şekil 9.11. Yüksek dayanımlı betonun yük-düşey yerdeğiştirme	94
Şekil 9.12. Yüksek dayanımlı betonun yük-yatay yerdeğiştirme	95
Şekil 9.13. Hafif betonun yük-düşey yerdeğiştirme	96
Şekil 9.14. Hafif betonun yük-yatay yerdeğiştirme	97
Şekil 9.15. Çelik lifli betonun yük-düşey yerdeğiştirme	98
Şekil 9.16. Çelik lifli betonun yük-yatay yerdeğiştirme diyagramı.....	99
Şekil 9.17. Normal beton kirişlerinin kırılma sonrası resmi.....	101
Şekil 9.18. Yinelenen normal beton kirişlerinin kırılma sonrası resmi.....	101
Şekil 9.19. Yüksek dayanımlı beton kirişlerinin kırılma sonrası resmi.....	102
Şekil 9.20. Hafif beton kirişlerinin kırılma sonrası resmi.....	102
Şekil 9.21. Çelik lifli beton kirişlerinin kırılma sonrası resmi.....	103

SİMGELER

Bu çalışmada kullanılan bazı simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simge	Açıklama
A	Lineer Regresyon Doğrusunun Eğimi
a	İlerlemiş Çatlak Uzunluğu
a_0	İlk Çatlak Uzunluğu
B	Malzeme Özelliğine Bağlı Sabit
b	Numune Genişliği
C	Lineer Regresyon Doğrusunun Düşey Eksenini Kestiği Nokta
c_n	Uygunluk Katsayısı
d	Numunenin Yararlı Yüksekliği
d_a	Maksimum Agregat Boyutu
D_0	Yapı Biçimine Bağlı Boyutsuz Sabit
E	Betonun Elastisite Modülü
f_c	Betonun Basınç Dayanımı
f_t	Betonun Çekme Dayanımı
G_f	Kırılma Enerjisi
h	Numune Yüksekliği
h_0	Çatlak Genişliği
L	Numune Uzunluğu
LEKM	Lineer Elastik Kırılma Mekanizması
P	Kırılma Yüğü
r	Korelasyon Katsayısı
W	Yapıda Depolanmış Potansiyel Enerji
z	Kuvvet Kolu

β	Gevreklik Sayısı
σ_N	Nominal Göçme Gerilmesi
σ_y	Standard Sapma



1. GİRİŞ

Beton, yarı gevrek bir malzeme olup sadece plastik ya da elastik teori ile davranışının açıklanması pek gerçekçi değildir. Beton davranışı için kırılma mekaniği kullanılmalıdır. Kırılma mekaniğinde malzeme davranışı, gerilme ve uzama cinsinden tam olarak tanımlanamaz. Beton gibi malzeme deneylerinde boyut etkisi görüldüğünden matematik modelde boyut etkisi bulunmalıdır. Boyut etkisi geometrik olarak benzer farklı boyutlu yapılar karşılaştırılırsa; kırılma anındaki nominal gerilme σ_N ' in elemanın karakteristik boyutu D ile azalması olarak tanımlanabilir. Malzemenin matematiksel modeli gerçek davranışı göstermesi için, kırılma enerjisi (G_f) ve kırılma bölgesinin karakteristik uzunluğu (c_f) denilen değişken içermelidir.

Boyut etkisinin betonarme elemanların tasarımında kullanılması önemli yararlar getirir. Özellikle farklı boyutlu yapı elemanları için aynı güvenliğe ulaşma boyut etkisinin gözönüne alınması ile mümkündür. Böylece daha güvenli, daha ekonomik yapı yapma ve ayrıca yeni beton malzeme ile yeni tasarım yöntemlerinin kullanılma olasılığı artmaktadır. Boyut etkisi (kırılma mekaniği) kullanımı ile yüksek dayanımlı betonlar, lifli betonlar, çok büyük boyutlu beton yapılar (barajlar, nükleer santraller, savunma yapıları) ile öngerilmeli yapılar güvenli ve ekonomik inşaa edilebilmektedir.

Önceki çalışmalar, betonarme yapıların gevrek göçmesinde boyut etkisi göstermiştir. Var olan yönetmelik T.S.500 [1] plastik limit analize dayanmakta olup boyut etkisi göstermez. Plastik limit analizde yapı göçme anında tek serbestlik dereceli sistem gibi davranarak göçme yüzeyinde bütün noktalar aynı anda hareket ederek göçer. Gerçekte malzeme dayanımı ise göçme yüzeyinin farklı noktalarında farklı zamanlarında aşılır. En büyük yükte göçme yüzeyinin sadece bir noktası dayanım limitine ulaşırken diğer

kısımlar dayanım limitine ulaşmaz. En büyük yük sonrası davranış yapı boyutları ile değişiklik gösteren yumuşama görülür. Çatlak gelişip yayılarak en büyük yük civarında lokalize olarak hareket ederek yapıyı göçmeye götürür. Lokalizasyon ve enerji açığa çıkışı kırılma mekanikçileri tarafından ele alınmıştır.

Plastik limit analize zıt olarak kırılma mekaniği daima boyut etkisi gösterir. En kuvvetli boyut etkisi lineer elastik kırılma mekaniğinde oluşur ki, burada malzeme göçmesi herhangi bir zamanda sadece bir noktada çatlak tepesinde oluşarak kesit boyunca hareket eder. Beton gibi yarı gevrek malzemede göçme sonlu boyutlu kırılma bölgesinde oluşur. Büyük yapıda kırılma bölgesi kesitin küçük bölgesini kaplar yani göçme lokalize olur ve lineer elastik kırılma mekaniğine yakındır. Küçük yapılarda örnek olarak laboratuvar numunelerinde kırılma bölgesi kesitin büyük kısmını kaplar ve göçme davranışı plastik limit analizine yakındır. Uygulamadaki çoğu yapıların göçmesi ise çok küçük kirişlerde geçerli olan plastik kırılma mekaniğinin ile çok büyük kirişlerdeki lineer elastik kırılma mekaniği arasındadır.

Boyut etkisi, betonun çekme gerilmelerini taşımadığı için meydana gelen göçmeler (çekme, eğilme, kesme) de değil betonun basınç gerilmeleri taşıyamadığı için meydana gelen göçmeler için de geçerlidir. Basınç göçmesi öngerilmeli beton kirişler kadar betonarme kolonlar için de geçerlidir. Boyut etkisi yalnız en büyük yüklerde görülmez, en büyük yük sonrası, eleman boyutu ile farklı yumuşamalarda (artan yerdeğiştirmelerle yüklerin azalması) görülür. Deneylerden de görüldüğü [2,3] gibi betonarme elemanlarda hatta P- Δ etkisinin ihmal edilebildiği kısa kolonlarda da en büyük yük sonrası yumuşama görülmektedir.

Geçmişte betonarme elemanlarının davranışının anlaşılması için bir çok çalışma yapılmıştır. Ancak betonarme yapı elemanlarının tasarımında çekme, kesme, eğilme, burulma, kolonlarda basınç altında olduğu gibi eğilme altındaki çentikli kırımlarda de boyut etkisi ihmal edilmiştir.

Boyut etkisinin varlığı basit mukavemet halleri olan eksenel basınç, eğilme, kesme, burulma, zımbalama ayrıca öngerilmeli beton elemanlarda, kolonların basınç göçmesinde, Brezilya yarma deney sonuçlarında deneysel ve analitik olarak yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir.

Yapı analizindeki boyut etkisinin, fizikte karşılığı olan ölçek yasasının anlaşılması ile bir çok fiziki olayın doğru analiz edilmesi olasılığı artmıştır. Betonarme yapıların gerçekçi analizi boyut etkisi ile ekonomik ve güvenli tasarlanabilir. Yakın zamana kadar betonarmede boyut etkisine, olasılıksal davranışın bir sonucu olarak bakılırdı. Weibull tipi teorilerle , boyut etkisi açıklanır ve güvenlik katsayıları kullanılırdı.

Daha büyük yapı daha fazla şekil değiştirme enerjisi yutabilir, birim alanda çatlak gelişimi için enerji tüketimi yapı boyutuna bağlı olmaksızın aynıdır. Enerji açığa çıkış hızları ise yapı boyutuna bağlı olup küçük yapılarda yavaş büyük yapılarda ise ani gevrek olmaktadır [4].

2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Üç nokta yüklemesi altında , farklı boyutlu ve farklı malzemelerden yapılmış açıklık ortasında çentik içeren beton kirişlerde, göçme yükleri deneysel olarak bulunmuştur. Ayrıca kırılma enerjisi (G_f) ve kırılma bölgesinin karakteristik uzunluğu (c_f) elde edilmiştir. Kiriş malzemeleri olarak normal beton, lifli beton, yüksek dayanımlı beton, ve hafif beton kullanılmıştır. Yükün altındaki mesnet genişliğini değiştirerek beşinci karışım olarak normal beton deneyleri yinelenmiştir.

Beton kirişlerde en büyük agrega boyutu 10 mm dir. Deney elemanları üç ayrı kesit boyutuna sahip ve her boyuttan 3'er adet yani toplam 45 adet kirişten oluşmaktadır. Kirişlerin kesit boyutları orantılı olarak değişmektedir.

Bu çalışmada, beton kirişlerde boyut etkisinin varlığı, Bazant'ın önerdiği yaklaşık boyut etkisi formülünün deney sonuçlarına uygunluğu incelenmiştir.

2.1. Bu Konudaki Önemli Çalışmalar

Kırılma mekaniğinin önemli bir uygulaması olan boyut etkisi; günümüzde birçok araştırmacı tarafından deneysel ve analitik çalışmalar olarak sürdürülmektedir. Boyut etkisi üzerine özellikle Amerika'da Northwestern Üniversitesi'nde Prof. Bazant yoğun araştırmalar yapmaktadır. İngiltere'de Prof. Barr, İtalya'da Prof. Carpinteri, Almanya'da Prof. Reinhardt, İsviçre'de Prof. Witmann, ve Japonya'da Prof. Mihashi konu üzerinde çalışan diğer bilim adamlarıdır.

Bugüne kadar yapılmış boyut etkisi çalışmaları şöyle özetlenebilir: Betonarme kirişlerde kesme göçmesinde boyut etkisi [5], boyuna donatılı ve donatısız

kirişlerin deneysel ve analitik burulma göçmesi [6,8], çekip çıkarma deneylerinde boyut etkisi [9, 10], Brezilya yarma deneylerinde boyut etkisi [11], yüksek mukavemetli, çentikli kirişlerde boyut etkisi [12], betonda dağılı çatlakların doğurduğu boyut etkisi [13], gevrek malzeme göçmesinde boyut etkisi [14], beton küplerden demir çubukların çekip çıkarılma yüklerinde boyut etkisi [15], kırılma enerji bulunmasında boyut etkisi ve kırılma bölgesinin oluşumu [16], değişken çentik uzunluğu için kırılma enerjisinin bulunması ve kırılma bölgesinin oluşumu [17].

Bu konudaki çalışmalar paralel Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde de deneysel ve analitik çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarından bazıları; Direk çekme altında aderans ekinde boyut etkisinin araştırılması [18, 19], aderans ekinde dolaylı yükleme altında boyut etkisinin araştırılması [20], sargılı donatıların aderans ekinde boyut etkisi [21,22], çelik lifli çentikli kirişlerde boyut etkisi [23], beton kirişlerin burulma tasarımında boyut etkisi [24].

3. BOYUT ETKİSİ

Kırılma mekaniğinin homojen gevrek malzemelere (cam) uygulanması bu yüzyılın başlarında 1913 ' de Inglis tarafından başlanmış sonra 1921' de Griffith ile devam etmiştir. Betona uygulanması ise çok sonraları 1960' da Prof. Kaplan (Cape Town), tarafından ilk kez başlatılmıştır. Kırılma mekaniğinin betonarmeye uygulanmasında en önemli gerekçelerinden biri de geometrik olarak benzer farklı boyutlu elemanlarda göçmedeki gerilmenin boyutu arttıkça azalmasıdır. Boyut etkisi üzerindeki çalışmaların yoğunluğu, günümüzde artıp, yayılmaktadır. Araştırma sonuçlarındaki değişimden ötürü birkaç yıl önceki sonuçlar dahi hızla eskiyip kullanılmaz olmaktadır.

Boyut etkisi kullanımı için birçok gerekçe vardır. Bunları aşağıda özetleyebiliriz;

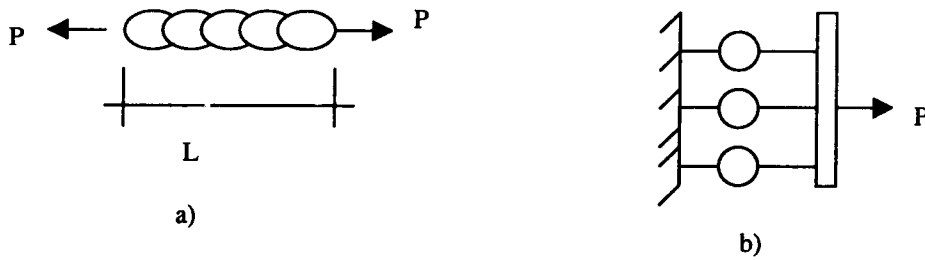
- a) Diğer mukavemete dayanan göçme teorileri (elastisite-plastisite) göçmede enerji kriterleri kullanılmazken, boyut etkisi enerji yöntemi kullanır. Çatlak gelişmesi, yayılması için de enerji gereklidir.
- b) Farklı boyutlu yapıların en büyük yük sonrası davranışlarını (yumuşama) mukavemet kriterleri göz önüne almaz iken, kırılma mekaniği bu farklılığı göz önüne alır.
- c) Farklı boyutlu geometrik olarak benzer elemanlarda göçme yüklerine karşı gelen nominal gerilme, mukavemet kriterlerine göre değişmez, sabit kalırken, gerçek davranış boyut etkisi içeren lineer olmayan kırılma mekaniği ile temsil edildiğinde artan boyutla gerilmelerin azaldığı görülür.
- d) Farklı kalınlıklardan (boyut etkisi) ötürü sonuçlar da farklı olabilir. Ancak iki boyutlu elemanlar (kalınlık sabit) test edilirse sonuçlar etkilenmez.

- e) Çeper etkisi ile iri malzeme, çeperlerden uzağa kaçır ve ince daneli malzemeler yüzeye (çepere) toplanır. İri malzemelerin elemanlarda uniform dağılması sonuçları etkileyen bir başka boyut etkisidir.

3.1 Boyut Etkisinin Uygulanması

Boyut etkisi uygulamada bir çok şekilde görülür.

- 1- Geometrik olarak benzer farklı boyutlu elemanların maksimum yüklerinde boyut etkisi görülür.
- 2- Olasılıksal boyut etkisi; Weibull'un 1938'de önerdiği teoridir. Bu teoriye göre zincirin boyu arttıkça; zincirde zayıf halka olma olasılığı artar. Zincir uzadıkça zincirin kopma mukavemeti azalacaktır (Şekil 3.1.a). Bu teoride yapı birbirine bağlı halkalar dolayısıyla seri bağlı düşünülmemektedir. Bir başka teoriye göre ise (Donnell Model 1950) yapı paralel bağlı düşünülmemektedir (Şekil 3.1 b).



Şekil 3.1. a) Weibull zincir teorisi, b) Donnell paralel bağ teorisi

Ancak gerçek yapı davranışı karmaşık (paralel+seri) bağlı bir davranış sergilemektedir. Weibull teorisinin (seri bağlı) beton yapılara uygulanması kabul edilemez.

3.2 En Büyük Yük Sonrası Yer Değiştirmelerde Boyut Etkisi

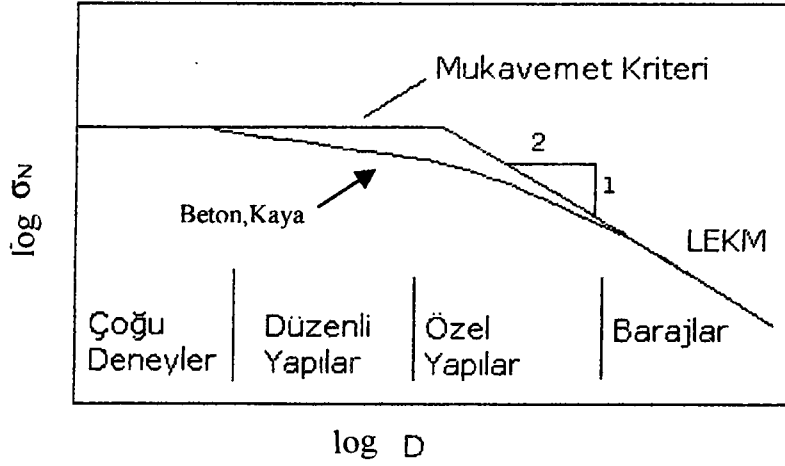
Boyut etkisi iki farklı biçimde karşımıza çıkar; İlki sonlu eleman analizinde farklı boyut kullanımı sonucu bulunan farklılıklardır. İkinci tip boyut etkisi ise yapısal boyut etkisidir.

Boyut etkisi, farklı boyutlu geometrik olarak benzer yapıların (P) göçme yüklerini (en büyük yük) karşılaştırarak tanımlanır. Burada σ_N , nominal göçme gerilmesi cinsinden belirtilmiştir. İki boyutlu benzerlik için (levha gibi) $\sigma_N = c_n P / bD$ ve üç boyutlu benzerlik için (silindir gibi) $\sigma_N = c_n P / D^2$ dir. Burada; b=iki boyutlu yapının kalınlığı, D=Yapının herhangi boyutu olarak tanımlanan karakteristik boyuttur, c_n =uygunluk için kullanılan katsayı. Sadece σ_N ' nin bağıl değeri gerektiğinden D boyutu, kirişin yüksekliği, kesit kenar uzunluğu olabilir [25].

Betonarme yapılar, boyut etkisinin çok fazla olduğu için lineer elastik kırılma mekaniğı (LEKM) ile boyut etkisinin olmadığı dayanım, elastik teori yada taşıma gücü kriteri arındadır.

Plastik limit analizinde (taşıma gücü) ya da elastik analizinde (emniyet gerilmeleri yöntemi), gerilmeler cinsinden kullanılan herhangi bir teoriye göre σ_N göçme gerilmesi, yapı boyutundan bağımsızdır. Dolayısıyla eğilme, kesme yada burulma elastik yada plastik teoriye dayanan formüller ile verilmiştir.

Betonda göçme, çatlak önünde tek bir noktada başlayıp sonlu bölgede kırılma bölgesi oluşur. Bu da göçmenin yayılarak ilerlediğini gösterir. Lineer elastik kırılma mekaniğı'nde (LEKM) göçme ise çatlak tepesindeki küçük bölgede olunca eleman göçer kabulü yapılmıştır. Elemanın diğer kısımlarının ise elastik kaldığı kabul edilmektedir.

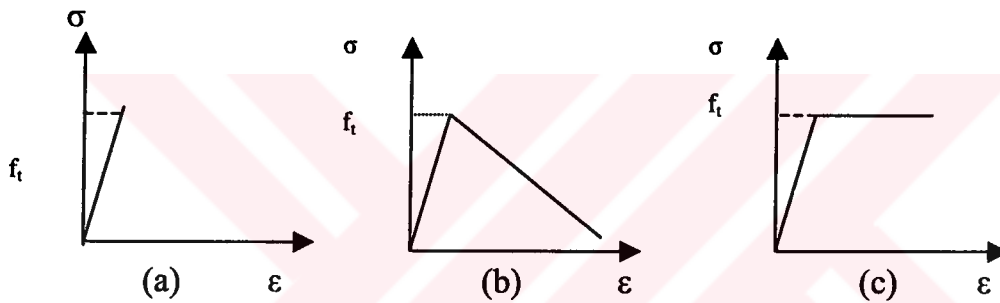


Şekil 3.2. Boyut etkisi yasası

Geometrik olarak benzer farklı boyutlu elemanların göçme yüklerinden elde edilen değerler aynı ise boyut etkisi yoktur demektir. σ_N 'nin yapı boyutuna bağımlılığı boyut etkisini gösterir.

Elastik analiz (Emniyet Gerilmeleri Yöntemi) ile plastik analize (taşıma gücü) dayanan göçme kriterleri yapı boyutundan bağımsız olduğundan boyut etkisi içermezler. Eğer $\log \sigma_N$ 'nin $\log D$ 'ye göre değişimi çizilirse elastik yada plastik göçme kriterleri yatay çizgiyle verilir (Şekil 3.2'deki yatay çizgi). Bu yüzden elastik yada plastik göçme kriterleri boyut etkisi göstermez. Lineer elastik kırılma mekaniği Şekil 3.2'de gösterildiği gibi $-1/2$ eğimli çizgi ise kuvvetli boyut etkisi gösterir. Gerçekte betonarme yapılar Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, eğri ile dayanım kriterinden lineer elastik kırılma mekaniğine geçiş gösterir. Eğer yapı çok küçük ise deney sonuçları yatay doğruya (dayanım kriteri), eğer yapı çok büyük ise eğimli doğruya yaklaşır (lineer elastik kırılma mekaniği).

Betonarme yapıların göçmesi, en büyük yüke ulaşmadan önce büyük çatlakların gelişmesi ile oluşur. Kırılma mekaniği teorileri bu yüzyılın ortasında elde edildiği halde tasarım henüz, kırılma mekaniğe dayanmamaktadır. Bunun nedeni kırılma mekaniği son zamanlarda elde edilmiş olup, sadece cam gibi homojen gevrek malzemeye uygulanmıştır. Kırılma teorilerinin betona uygulanması ilk olarak Kaplan tarafından düşünülmüş fakat başarılı olmamıştır. Betonarme yapılarda, kırılma sırasındaki çatlak önündeki agreganın sağladığı gerilme köprüsü ve çatlakların dağılımı sonucu yumuşama göz önüne alınmalıdır.



Şekil 3.3. Malzemelerin σ - ϵ diyagramı a) Gevrek (cam), b)Yarı gevrek (beton), c) Sünek (demir)

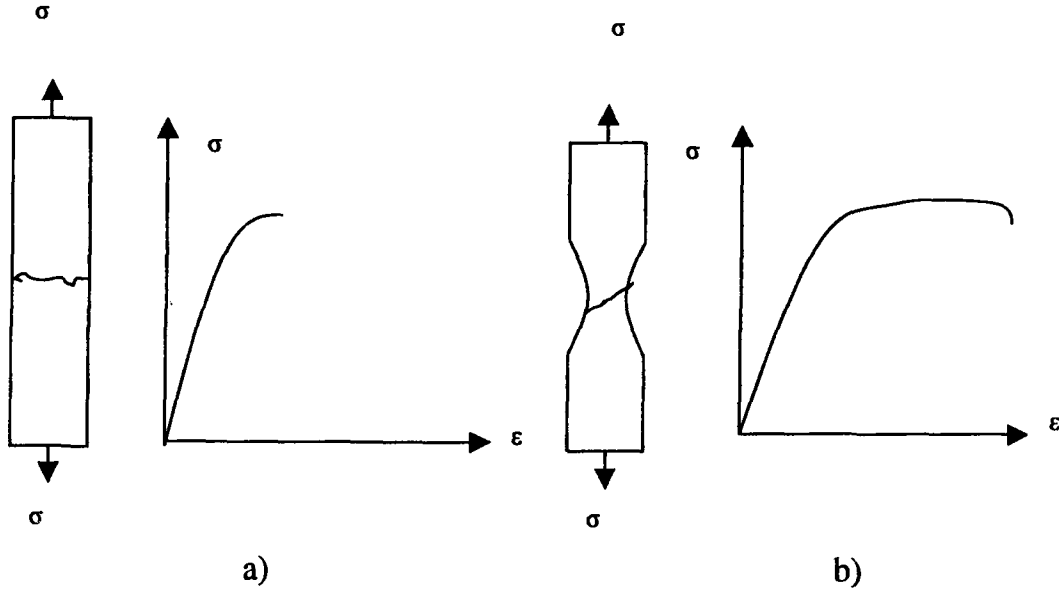
Betonarmeye uygulanan kırılma mekaniği biçimi son yıllarda çok gelişmiştir. Betonarme yapı tasarımı günümüze kadar iki devrim görmüştür. İlk devrim betonarme yapıyı elastik ve betonun çekme almadığı varsayımına dayanan Emniyet Gerilmeleri Yöntemi 1900-1930'larda kullanılmıştır. İkinci devrim 1930'daki önceki teoriye dayanmakta olup, plastik limit analizin 1940-1970'li yıllarda kullanılması sonucu ortaya çıkan Taşıma Gücü yöntemidir. Kırılma mekaniğinin betonarme yapıların tasarımında kullanılmasına üçüncü devrim olarak bakılmaktadır. Kırılma mekaniğinin kullanılması betonarme yapı tasarımında önemli yararlar sağlayacaktır. Farklı boyutlu yapılar için aynı güvenliğe ulaşmak olası olacaktır. Böylece yapısal güvenlik ve ekonomi arttırılır. Bununla yeni betonarme malzemesi ve yeni tasarımların kullanılması

olası olacaktır. Özellikle yüksek dayanımlı ve çok büyük boyutlu betonarme yapılar, lifli beton yapılar, öngerilmeli betonarme yapılar, büyük beton barajlar, nükleer reaktör hücreleri gibi güvenliğin yüksek olduğu ve hasarları büyük felaketlere neden olabilecek yapılar için kırılma mekaniğine göre tasarım çok önemlidir.

Boyut etkisinin dayandığı kırılma mekaniği yapıda göçmenin yayılmasını gözönüne alan mukavemete dayanan enerji kriteri kullanan, göçme teorisi olarak tanımlanabilir.

3.3. Gevrek ve Sünek Kırılma

Çatlak tepesinde gerilmenin yığılması sonucu gerilme kritik değere ulaşınca (malzeme çekme dayanıma erişince) çatlak ilerlemeye başlar. Kırılma gerekli enerji miktarına göre sınıflandırılabilir. Gevrek kırılma az enerji gerektirir (Şekil 3.4 a), sünek kırılma ise fazla enerji gerektirir (Şekil 3.4.b).



Şekil 3.4. a) Gevrek kırılma, b) Sünek kırılma

Gevrek kırılmada kırılan parçalar genelde orijinal boyutlarındadır. Kalıcı deformasyon yoktur ve davranış elastiktir. Sünek kırılmada ise, kırılmadan önce geriye dönmeyen büyük plastik deformasyonlar (akma platosu) oluşur ve parçaların tekrar uyumu imkansızdır.

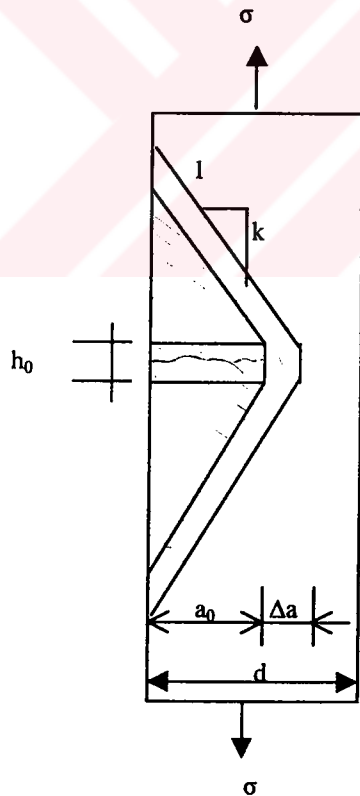
Yüksek ısı ve düşük yükleme hızlarında metallerde sünek davranış hakim iken, yüksek yükleme hızlarında ve düşük ısılarda aynı malzemede gevreklik hakim olur. Gevrek malzeme göçmesi ani, habersiz, sesli, az enerji yutulması ile mikroskopik ölçekte ise aderans kopması gözlenir. Sünek kırılmada aksine kırılma yavaş, büyük enerji yutulması ile, mikroskopik ölçekte düzlemler üzerinde kayarak ısınma ve büyük deformasyonlar gözlenir.

3. 4. Boyut Etkisinin Enerji ile Açıklanması

Kırılma mekaniğinin enerji açığa çıkması yüzünden, boyut etkisiyle olan ilişkisi Şekil 3.5'de gösterilen üniform gerilmeli levha düşünülerek açıklanabilir. Şekil 3.5'de sol kenardaki küçük bölgenin dayanımının levhanın

diğer kısmından daha az olduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla çatlak bandının oluşumu soldan sağa doğru olacaktır.

Beton gibi gevrek heterojen malzeme için kırılma önünde dağılı çatlakların gözönüne alınması önemlidir. Bu bölgenin boyutu yapı boyutu ile orantılı değil, maksimum agrega boyutu ile ilişkilidir. En basit yaklaşımla, kırılma önündeki çatlak bandının h_0 genişliği, yapı boyutundan bağımsız ve yaklaşık sabit varsayılmıştır (Aynı betondan yapılmış benzer yapılar karşılaştığı zaman). Benzer olarak maksimum yükte a_0 çatlak uzunluğu, yapı boyutu D ile orantılıdır. Yani $a_0/D = \text{sabittir}$. (Eleman analizlerinde ve betonarme yapıların gevrek göçme deneylerinin çoğunda görülmüştür).



Şekil 3.5. Boyut etkisinin enerji ile açıklanması

h_0 genişliği, a_0 uzunluklu çatlak bandı ile kırılmanın oluşumu (Şekil 3.5'deki taralı alandan) $\sigma_N^2/2E$ uzama enerjisinin açığa çıkar (σ_N =en büyük yüke karşı gelen gerilme, E = betonun Young modülü). a_0 uzunluklu çatlak Δa uzarsa ek uzama enerjisi Δa genişlikli sık taralı şeritten çatlak önüne açığa çıkar. Büyük yapılarda bu taralı alan daha büyüktür. $\Delta A=h_0\Delta a+2ka\Delta a$, k =Şekil 3.5'te eğim olup yapı biçimine bağlı amprik sabittir (boyut etkisinde önemli olmayan k değeri, sonlu eleman analizlerinde ve deney sonuçlarından $\pi/2$ bulunmuştur).

Çatlak bandının birim uzunluğu veya çatlak oluşturan gerekli enerji, büyük yapılarda Δa çatlak uzaması sonucu, aynı σ_N için daha fazla enerji açığa çıkar. Kırılma düzleminin birim alanında kırılma ile kaybolan enerji yaklaşık sabit olduğundan (malzeme özelliği olan G_f kırılma enerjisine eşittir) büyük yapı için σ_N değeri, hacmin aynı kalacağı daha büyük bölgede açığa çıkan toplam enerjiden az olmalıdır. Büyük yapılarda birim çatlak gelişmesi için açığa çıkan daha büyük enerji için kırılma yayılacağından σ_N küçülecektir. Dolayısıyla σ_N yapı boyutundan etkilendiğinden boyut etkisinin varlığı görülmektedir.

W , yapıda depolanan potansiyel enerji; b , kalınlık; G_f kırılma enerjisidir. Dış yüklemeler sonucunda levhanın sık taralı şeridinden açığa çıkan enerji (Şekil 3.5);

$$\Delta W=b(h_0\Delta a+2ka\Delta a) \sigma_N^2/2E \quad (3.1)$$

Levhada yutulan enerji,

$$\Delta W= G_fb\Delta a \quad (3.2)$$

Dış etkiler (3.1) ile levhanın yuttuğu enerji (3.2) eşitliğinden,

$$\sigma_N^2 [h_0 + 2k(a/D)D] = 2EG_f \quad (3.3)$$

$$\sigma_N = \left| \frac{2EG_f}{h_0 + 2k(a/D)D} \right|^{1/2} \quad (3.4)$$

$$D_0 = \frac{h_0 D}{2ka} \text{ ile gösterirsek} \quad (3.5)$$

pay ve payda f_t ile çarpıldığında,

$$\sigma_N = \left| \frac{2EG_f}{h_0(1 + D/D_0)} \right|^{1/2} \frac{f_t}{f_t} \quad (3.6)$$

elde edilir. Sonuçta;

$$\sigma_N = \left| \frac{2EG_f f_t^2}{h_0 f_t^2 (1 + D/D_0)} \right|^{1/2} \quad (3.7)$$

Bazant'ın önerdiği boyut etkisi yasası elde edilir.

$$\sigma_N = B f_t (1 + \beta)^{-1/2}, \quad B = (2EG_f / h_0 f_t^2)^{1/2}, \quad \beta = D / D_0 \quad (3.8)$$

B, malzeme dayanımına; D_0 , yapı biçimine bağlı boyutsuz sabitlerdir; f_t , betonun çekme dayanımı; B'yi boyutsuz yapabilmek için kullanılmıştır. Daha

genel boyut etkisi yasası $\sigma_N = Bf_t(1 + \beta^r)^{-1/2r}$, r =geometriye bağlıdır. Bütün geometri ve malzemeler için $r \cong 1$ bulunmuştur.

Denklem 3.8 yaklaşık bir ifadedir, fakat boyut değişiminin 1:20'ye kadar aralığı için yeterlidir. Daha büyük boyut değişimi için karmaşık formüller gereklidir. 3.8 denkleminin elde edilmesinde aşağıdaki varsayımlardan yararlanmıştır.

1. Göçme anında çatlak önünde açığa çıkan enerji; çatlak uzunluğuna bağlıdır.
2. Açığa çıkan enerji aynı zamanda en büyük agrega boyutu d_a 'nın birkaç katı olan çatlak bandının genişliğine bağlıdır (deneyler ile kayada $5d_a$, betonda $3d_a$ bulunmuştur).
3. Farklı boyutlu geometrik olarak benzer yapılarda oluşan kırılma yüzeyleri de geometrik olarak benzerdir.
4. Yapı göçmesi çatlak başlangıcı ile değil, çatlamış bölgenin tüm yapıya yayılması ile oluşur.

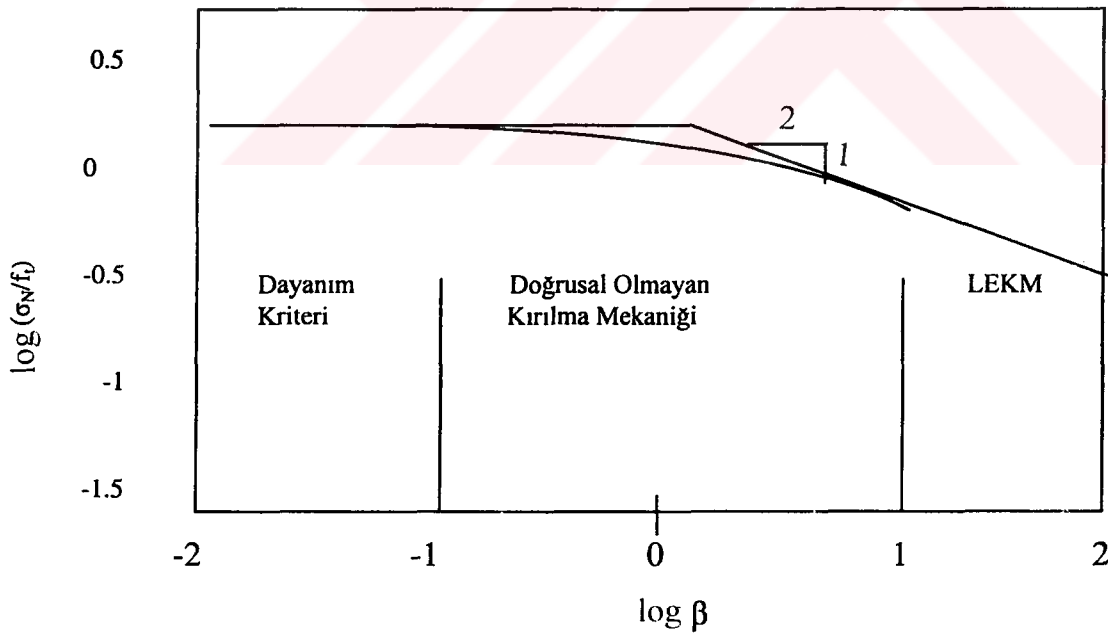
Bazant'ın önerdiği ve boyut etkisinin ifadesinde denklem 3.8 için, yapı çok küçük $D \ll D_0$ ise $\beta = D/D_0$ değeri birin yanında küçük olduğundan ihmal edilebilir. $\sigma_N = Bf_t$ olurki göçme gerilmesi plastik limit analiz yada emniyet gerilmeleri yöntemi ile temsil edilmektedir. Eğer yapı çok büyük ise $D \gg D_0$ bir değeri β değeri yanında çok küçüktür, $\sigma_N = Bf_t \beta^{-1/2}$ olur. Yani göçme gerilmesi doğrusal elastik kırılma mekaniği ile temsil edilmektedir yada her iki tarafın Logaritması alındığında $\log \sigma_N = -1/2 \log \beta + \text{sabit}$, Şekil 3.6' da logaritmik eksen takımında , eğimi -1/2 olan doğru ile gösterilmektedir.

Asimtotun kesim noktası, plastik analiz ve LEKM teorileri eşitlenerek,

$$Bf_t = Bf_c \beta^{1/2} \quad (3.9)$$

$\beta^{-1/2} = 1$, buradan $\beta=1$, $D=D_0$ bulunur. β gevreklik sayısıdır.

3.8 denklemi sadece aynı betondan yapılmış ve en büyük agrega boyutu aynı olan yapılara uygulanabilir. Agreganın küçük farklılık göstermesi durumunda bu yasa yaklaşık olarak uygulanabilir. Agreganın büyük farklılık göstermesi durumunda 3.8 denkleminde düzeltme terimleri kullanılmalıdır.



Şekil 3.6. Boyut etkisinin grafik gösterimi

Şekil 3.6. dan

$\beta < 0.1$ ise plastik limit analiz

$0.1 < \beta < 10$ ise yaddoğrusal kırılma mekaniği

$\beta > 10$ ise doğrusal elastik kırılma mekaniği (LEKM) geçerlidir.

3.5. Kırılma Parametrelerinin Boyut Etkisi ile Bulunması

Kırılma parametrelerinden olan G_f kırılma enerjisi ile c_f kırılma bölgesi uzunluğu değerleri aşağıdaki işlemler ile bulunur.

$$\sigma_{NU} = \frac{K_{IC}}{\sqrt{D_0^2(a_0 + c_f / D)}} \quad (3.10)$$

$$\sigma_{NU} = \frac{Bf_t}{\sqrt{1 + D/D_0}} \quad , \quad K_{IC} = Bf_t \sqrt{D_0} k_0 \quad ; \quad k_0 = \text{şekil çarpanı}$$

Kırılma bölge uzunluğu ile kırılma enerjisi

$$c_f = \frac{k_0}{k_0'} D_0 \quad , \quad G_f = \frac{(Bf_t)^2 D_0 k_0^2}{E} \quad (3.11)$$

elde edilir.

3.5.1. Doğrusal regrasyon

Boyut etkisi denkleminin üstünlüğü lineer regrasyon için düzenlebilir olmasıdır. Bu düzenlemeler yapılırsa deney sonuçları

$$Y = AX + C \quad (3.12)$$

Biçiminde bir doğru ile gösterebilir, bu cebrik düzenleme yapılırsa.

$$\sigma_{NU} = \frac{Bf_t}{\sqrt{1 + \frac{D}{D_0}}} \quad (3.13)$$

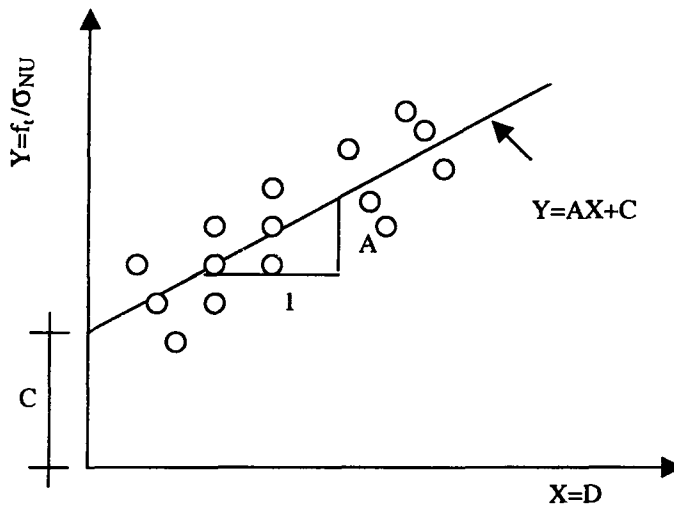
her iki tarafın karesi alınırsa,

$$(f_t / \sigma_{NU})^2 = \frac{1}{B^2} \left(1 + \frac{D}{D_0} \right) \quad (3.14)$$

(3.14) denklemi $Y=AX+C$ şeklinde temsil edilebilir.

$$Y = (f_t / \sigma_N)^2, \quad C=1/B^2, \quad X=D, \quad A=C/D_0 \quad (3.15)$$

Bu dönüşüm ile X,Y eksen takımında doğru denklemi elde edilir. Gerçekte sonuçlar dağılım göstereceğinden lineer korelasyon ile A doğru eğimi, C ise doğrunun Y eksenini kestiği nokta bulunur (Şekil 3.7). Bunlardan yararlanarak B ve D_0 sabitleri bulunarak boyut etkisi yasasının bilinmeyenleri bulunmuş olur.



Şekil 3.7. Doğrusal regrasyon

3.5.2. Doğrusal olmayan regresyon

$$\sigma_{NU} = \frac{Bf_i \sqrt{D_0}}{\sqrt{D + D_0}} \quad (3.15)$$

Burada;

$$Bf_i \sqrt{D_0} = M$$

$$\ln D = x$$

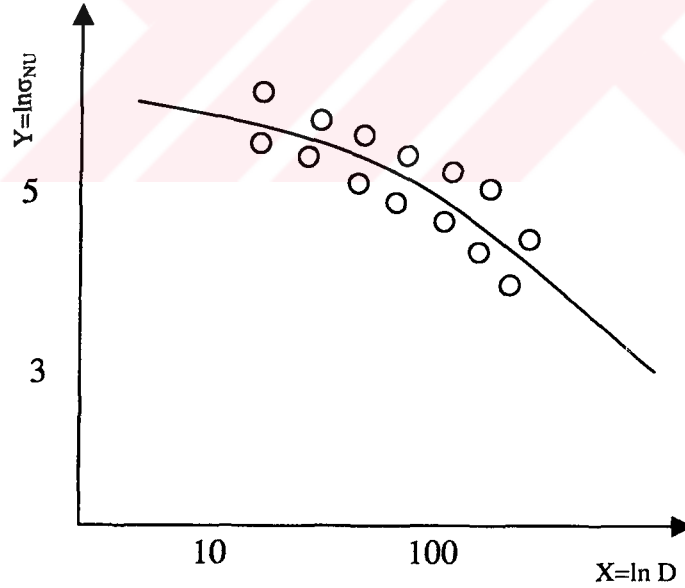
$$D = e^x$$

$$\ln \sigma_{NU} = y$$

$$D_0 = N$$

ile gösterirsek denklem (3.15) aşağıdaki şekilde yazabiliriz.

$$y = \ln \frac{M}{\sqrt{N + e^x}} \quad (3.16)$$



Şekil 3.8. Doğrusal olmayan regresyon

$$K_{IC} = k_0 M$$

$$G_f = \frac{k_0^2}{E} M^2, \quad c_f = \frac{k_0}{2k_0} N$$

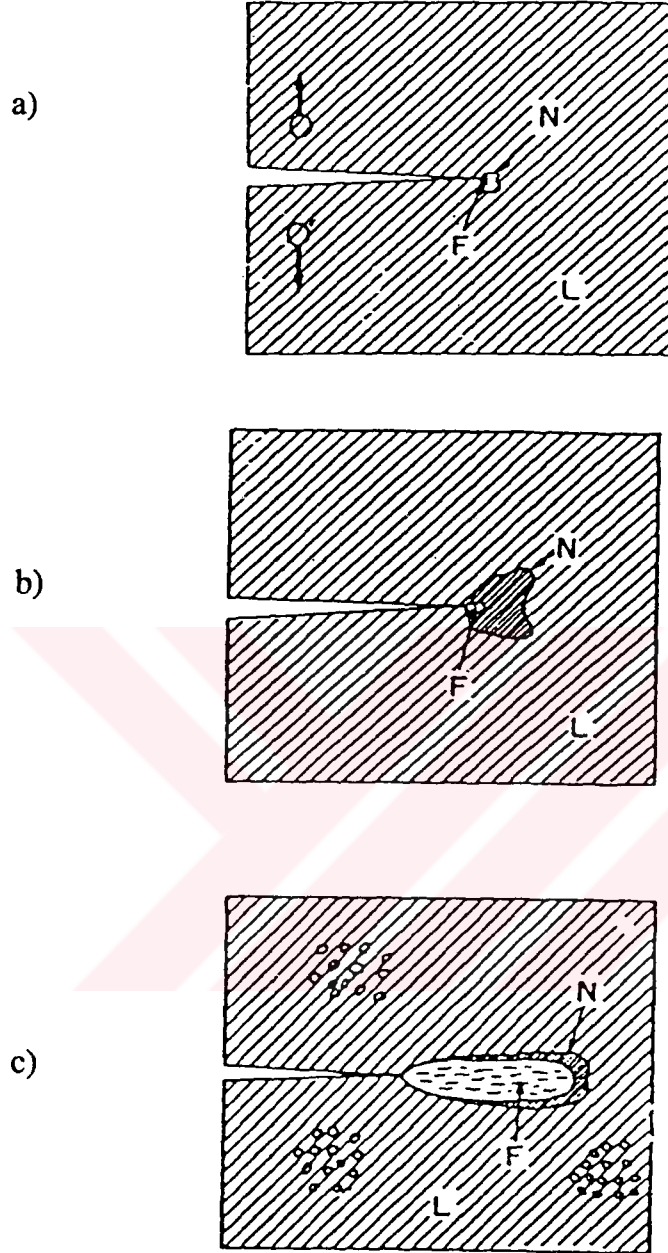
3.6. Kırılma Bölgesi

Farklı malzemelerde çatlak tepesinde de farklı bölgeler oluşur. Şekil 3.9'da verildiği gibi betonda boyut etkisinin en büyük gerekçelerinden biri kırılma bölgesinin (F) büyüklüğüdür .

Genelde iki tip yaddoğrusal kırılma mekaniği vardır;

- 1) Sünek (metaller),
- 2) Sünek olmayan (beton, seramik).

Şekil 3.9'da doğrusal elastik kırılma mekaniği (L) (Şekil 3.9.a) yaddoğrusal bölge (N) ve kırılma bölgesinin (F) her ikisinden de büyüktür. Sünek kırılmada, yaddoğrusal bölgenin çoğu plastiktir, ve kırılma bölgesi (F), yaddoğrusal kısmın (N), küçük bir kısmıdır. Sünek olmayan betonun kırılmasının aksine kırılma bölgesi (F), büyük olup yaddoğrusal bölgenin (N), hemen hemen tamamını kapsar [26].



Şekil 3.9. Farklı malzemelerin çatlak tepesindeki kırılma bölgeleri

a) Cam b) Metal c) Beton

3.8. Diğer Boyut Etkisi Biçimleri

3.8.1. Rastgele dayanım yüzünden olasılıksal boyut etkisi

Malzemenin heterojenliği, malzeme dayanımını bulmada önemli rol oynar. Malzeme dayanımında iç yapıda küçük çatlakların dağılımı boyut etkisi doğurur. Malzemenin heterojenliği yüzünden dayanım rastgele olması Weibull-tipi istatistik modellerle tanımlanmıştır. Ancak yapının ilk çatlakla göçmesi yada yapının büyük parçasında gerilmenin uniform olduğu betonda, Weibull teorisinin etkisi, boyut etkisine göre çok azdır.

3.8.2. Farklı rutubet ve kuruma yüzünden boyut etkisi

Hidratasyon sırasında açığa çıkan ısı; farklı ısıdan doğan sünmenin uniform olmayışı, yapıdaki rutubet, betonun kuruması sırasında difüzyon yüzünden, önemli yapısal boyut etkisi elde edilir.

3.8.3. Çeper yüzünden boyut etkisi

Beton yüzeyine yakın sınır tabaka, beton yapının mukavemet ve karışım farklılığı, başka bir boyut etkisi doğurur. Bu tabaka bir agrega kalınlığında olup, ince malzeme yüzdesi fazla, büyük agrega yüzdesi azdır. Bu düşünce "çeper etkisi" olarak bilinir. Sınır tabakanın kalınlığının yapı boyutundan bağımsızlığı yüzünden bu tabakanın etkisi küçük yapılarda, büyük yapılardan fazladır. Çok büyük kesitlerde bu etki önemsiz olur.

3.8.4. Agreg a boyutunun etkisi

Boyut etkisi ve kırılma parametreleri aynı agreg a boyutlu, aynı betondan yapılmış yapılar için geçerlidir. Eğer agreg a boyutu değişirse, kırılma parametreleri ve boyut etkisi parametreleri değişir. Boyut etkisi düzeltilmelidir

$$\sigma_N = \frac{Bf_t}{\sqrt{1+\beta}}, \quad f_t = f_t^0 \left(1 + \sqrt{\frac{c_0}{d_a}} \right), \quad \beta = D/D_0 \quad (3.18)$$

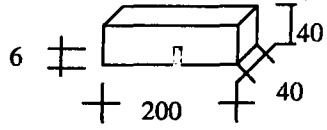
Burada f_t^0 referans olarak seçilen betonun çekme dayanımıdır. f_t maksimum agreg a boyutu d_a için çekme dayanımıdır. c_0 ampirik sabittir. Bu formül dislokasyon teorisi ile elde edilen çok kristalli metallerin, akma mukavemetinde dane boyutu etkisi formülüne benzerdir. 3.18 deney sonuçları ile uyumlu c_0 elde edilir.

4. DENEY NUMUNELERİ VE DENEYİN ŞEKLİ

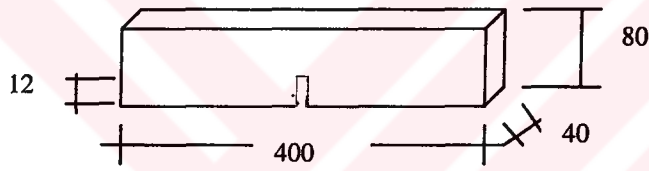
Boyut etkisini araştırmak için geometrik olarak benzer farklı boyutlu çentik içeren kirişler (Şekil 4.1) denenmiştir. Kirişler üç nokta yüklemesi altında Şekil 4.2.'de gösterildiği gibi kırılmıştır, 200KN kapasiteli 100N hassasiyetli load cell ile, yerdeğiştirme okumaları yük altında ve çentik tepesinde 50 mm değişim aralıklı 100×10^{-6} mm duyarlıklı LVDT'ler (Tokyo Sokki Kenkyujo Co.SDP-50C) ile yapılmıştır. Deney sırasında yük altındaki yerdeğiştirme çatlak tepesinde açılma ile yük değerleri data logger (30 kanallı Bucem) sürekli olarak bilgisayara kaydedilmiştir. Kirişler iki boyutta benzer olup t kalınlıkları 4 cm sabittir. Kiriş yükseklikleri h, açıklıkları L ile orantılı olarak değiştirilmiştir. Kiriş çentikleri açıklık ortasında yapılacak ve boyutları Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.

Üç farklı boyutta kirişler, her boyuttan üçer adet numune üzerinde deneyler yapılmıştır. En büyük agreganın en büyük boyutu 10 mm dir. Kaba agreganın boyutları 4.76mm-10mm arasında, ince agrega 4 no'lu eleğin altında kalan malzeme olup boyutlar 3mm-4.76mm arasındadır. Betoniyerde ilk olarak kum, çakıl ve çimento kuru olarak yaklaşık 2 dakika karıştırılmıştır, su sonradan ilave edilerek yine yaklaşık 2 dakika karıştırılmıştır.

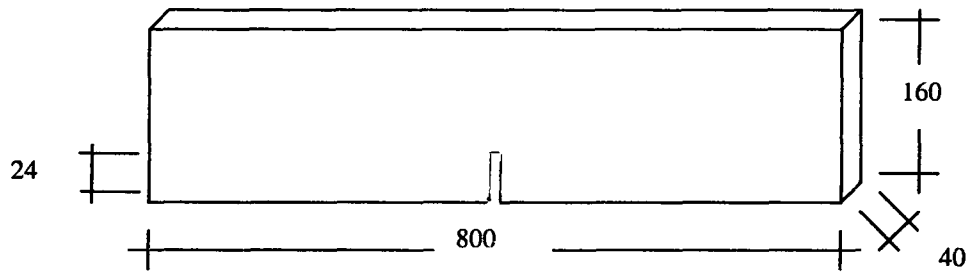
Aynı numuneden 150 mm çaplı 300 mm yükseklikli üç silindir numune beton dayanımı bulmak için dökülmüştür. Çimento olarak katkılı portland çimentosu (KPÇ 350), kullanılmıştır.



a) Küçük numune

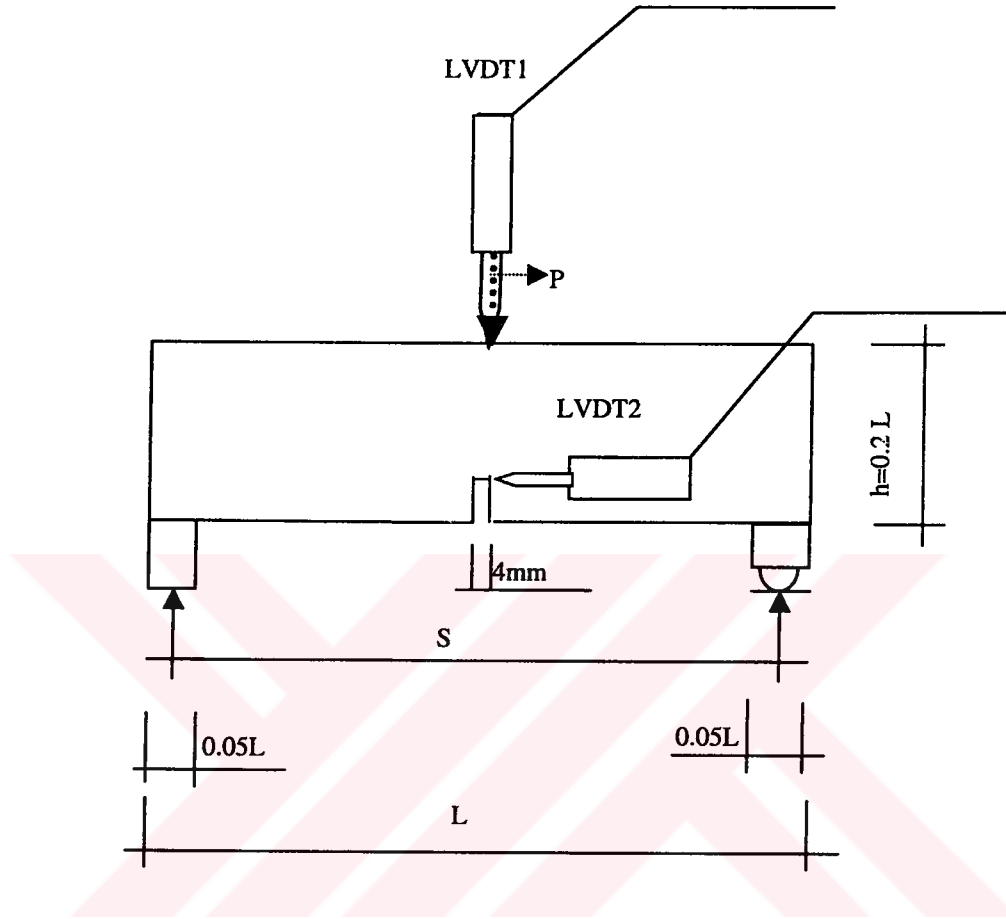


b) Orta numune



c) Büyük numune

Şekil. 4.1. Deney numunelerinin boyutları



Şekil 4.2. Yükleme düzeneği

Bilindiği üzere beton birçok özelliği bakımından inşaat için elverişli bir malzemedir. Beton maliyeti bakımından ucuz bir malzemedir. Basınca ve yangına karşı mukavemeti yüksektir. Yapılması, işçiliği büyük bir beceri istemez. Mimari isteklere uygun biçim kolaylıkla verilebildiği için modern inşaatlarda aranan bir malzeme olmuştur. Betonun ömrü uzunluğu, kargirde olduğu gibi, tecrübe ile tam olarak tespit edilmemiş olmakla beraber, beton mukavemetinin zamanla artma özelliği ve iyi yapılmış kompakt betonun bir yüzyılı geçen deneyim aşamasında kendini iyi bir şekilde koruması, zaman etkilerine dayanıklı olduğunu göstermektedir.

Bütün bu iyi özellikleri yanında betonun zayıf noktası çekme mukavemetinin hem düşük hem de güvenilir cinsten olmamasıdır. Bu neden ile yapılar, kargir gibi sırf basınç gerilmeleri çıkacak şekilde, eskiden olduğu gibi kemer, kubbe, tonoz şeklinde yapılmak zorundadır. Halbuki yapı elemanlarının çoğunda büyük eğilme momentleri ve bunun neticesi olarak çekme gerilmeleri meydana gelmektedir.

Beton bir yapı elemanının analiz edilmesi bir çok faktorlerin etkisi nedeniyle oldukça güç ve karmaşık görünümündedir. Problemin teorik çözümünü güçleştiren faktörler 3 ana grupta toplanabilir.

- Betonun yük-deformasyon bağıntısı lineer değildir. Çok eksenli gerilme durumunda gerilme deformasyon bağıntıları karışıktır.
- Yükleme sırasında betonun sürekli olarak çatlaması nedeniyle kırılma kanununun formüle edilmesi zordur.
- Sünme ve büzülme gibi olaylar betonun davranışını zamanla değiştirir.

Bu sayılan nedenlerle, yapılan çalışmalarda deneylere dayanan amprik formüller kullanılmakta olup, analizlerde ise çok basitleştirici (lineer-elastik gibi) kabullere yer verilmiştir.

Araştırmacılar çok eksenli gerilme durumunda betonun gerilme-birim deformasyon bağıntılarını ve göçme mekanizmasını veren kanunları geliştirmek üzere çalışmalarına halen devam etmektedirler. Uygulamada karşılaşılan problemlerde çok defa, iki boyutlu bir analiz yeterli olmakta ve gerçeğe oldukça yakın doğrulukta sonuçlar elde edilmektedir. Betonun yük altındaki davranışını anlayabilmek üzere günümüze dek, çok sayıda analitik ve deneysel araştırmalar yapılmıştır.

Beton tanımlanması ve sınıflandırılması basınç dayanıma göre yapılır. Basınç dayanımı, taban çapı 15 cm ve yüksekliği 30 cm olan, suda $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$

sıcaklıkta saklanmış, 28 günlük standard deney silindirlerden elde edilir. Gerilme cinsten ifade edilen dayanım, silindirin kırılma yükü, alana bölünerek bulunur. Karakteristik beton dayanımı f_{ck} , denenecek numunelerden bulunacak basınç dayanımlarının, bu değerden düşük olma olasılığının %10 olduğu değerdir.

Silindir yerine zaman zaman 200x200x200 mm'lik küp numuneleri de kullanılmaktadır. Küp ve silindir dayanımları arasındaki ilişkiyi saptayabilmek için çok sayıda deney yapılmıştır. Bu araştırmalar sonunda, silindir dayanımının küp dayanımına oranının, ortalama 0,80 ~0,85 olduğu bulunmuşsa da bir çok numunede bir oranın 0,7'ye kadar düştüğü veya 1,1'e kadar yükseldiği görülmüştür. Yapılan çalışmalar silindirin, küpten daha iyi olduğu kanıtlandığından, Avrupa Beton Komitesi (CEB)' de silindiri standard numune kabul edilmiştir. Tercih nedenleri aşağıda kısaca özetlenmiştir.

a) Küp numunesinin alanı ve dayanımı silindire kıyasla daha büyük olduğundan, kırılma yükü yaklaşık % 40 daha fazladır. Bu durumda şantiyede kullanılacak presin kapasitesi küp deneyi için yeterli olmayabilir.

a) Küpün keskin köşelerinde büzülme (rötre) nedeni ile gerilme yığılmaları olabilir.

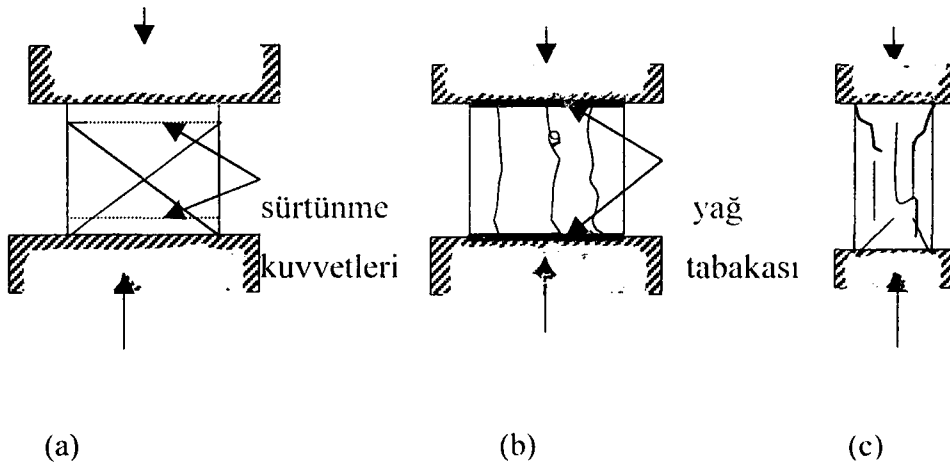
c) Küp deneyinde kırılma, şekil 4.3.(a)'da gösterildiği gibi, eğik çatlakların oluşması ile başlar ve giderek bu çatlaklar numunenin bir piramit biçiminde kırılmasına neden olur. Eksenel basınç altındaki bir numunenin bu tür kırılışının nedeni, pres tablası ile numune arasındaki sürtünmeden oluşan yük eksenine dik yatay kuvvetlerdir. Yapılan deneyler, numunenin alt ve üst yüzeyleri ile pres tablası arasında oluşturulan bir yağ tabakasının, sürtünmeyi azaltarak, kırılma biçimini değiştirdiğini göstermiştir. Bu durumda, şekil 4.3.(b)' de gösterildiği gibi, kırılma eksenel basınç deneyinden beklendiği

biçimde, yük eksenine dik çatlaklarla oluşmakta ve dayanımda % 50'ye varan azalmalar gözlenmektedir.

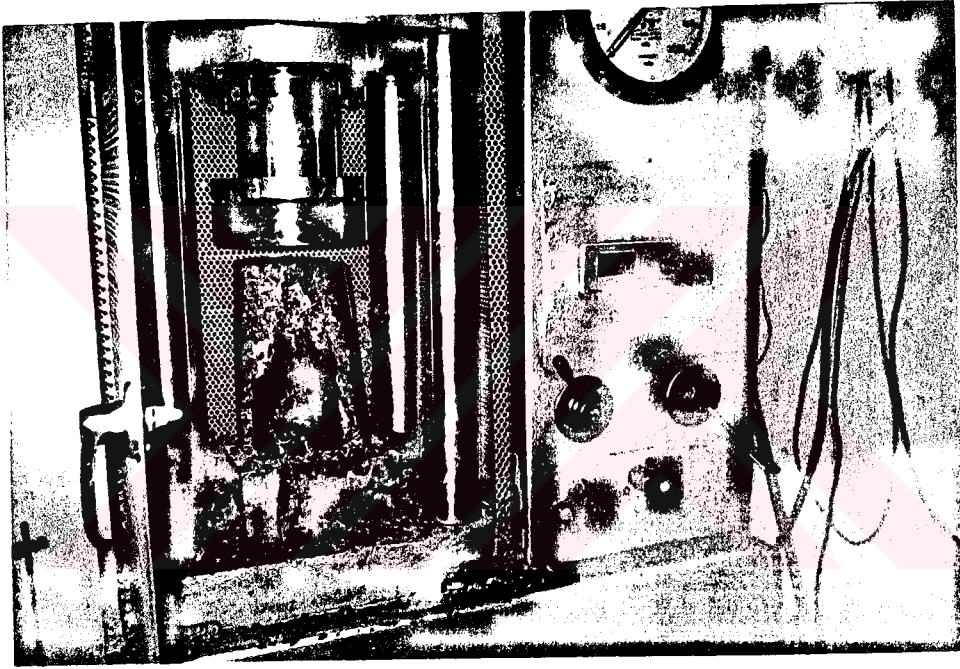
Pres tablası ile numune yüzeyleri arasında sürtünme nedeni ile oluşan kuvvetlerin etkisi, yükün uygulandığı yüzeyden uzaklaştıkça azalmaktadır. Bunun doğal bir sonucu olarak, numune yüksekliğinin kesit boyutuna oranı büyüdükçe, sürtünme etkisi kırılmayı daha az etkilenmektedir.

Bu nedenle, yüksekliğin kesit boyutuna oranı 2.0 olan silindir, oranın 1.0 olduğu küpe kıyasla daha güvenilir bir numune olmaktadır. Standard silindir basınç deneyinde, yönetmeliklerde öngörülen kükürt ve parafinden oluşan başlık sürtünmeyi azalttığından, kırılma şekil 4.3. (c)' de gösterildiği gibi oluşmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi, yerel sürtünme kuvvetleri numune ortalarında etkisini kaybetmektedir.

Beton zamanla dayanım kazanan bir malzemedir, ilk 7 günde çok hızlı olan dayanım kazanımı, yavaşlayarak devam eder. Bu nedenle standard dayanımın belirli bir beton yaşı ile ifade edilmesi zorunlu olmuştur. Bugün tüm uluslararası ve ulusal yönetmeliklerde 28 günlük dayanım, standard dayanım kabul edilmiştir.



Şekil 4.3. Beton basınç dayanımı



Şekil 4.4. Beton basınç dayanım deneyi

Zamanla dayanım kazanan betonun basınç dayanımını birçok değişken etkimektedir.

Bunlar;

- i) Numune geometrisi ve boyutları

Numune boyunun kesit boyutuna oranının (h/a) basınç dayanımına etkisi bir çok kişi tarafından araştırılmış olup, elde edilen sonuçlar çizelge 4,1' de verilmiştir.

Çizelge 4.1.Yüksekliğin kesit boyutuna oranının dayanımına etkisi

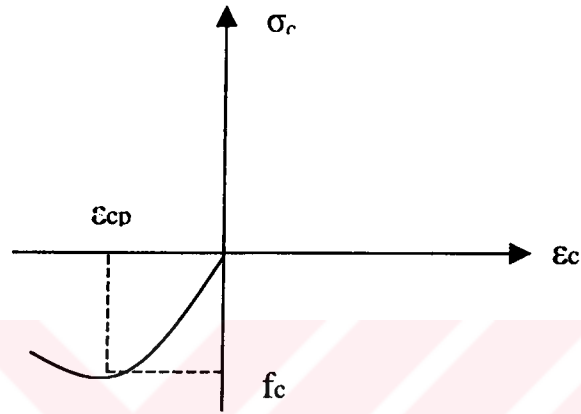
h/a oranı	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Basınç dayanımının,boyu enine eşit bir numune dayanımına oranı	1,0	0,87	0,80	0,75	0,74

ii) Yükleme hızı

Yapılan deneyler, yavaş yüklenen bir numune dayanımının, hızlı yüklenen bir numuneye oranla daha düşük olduğunu göstermiştir. Standard basınç deneyinde yükleme hızı $\text{kgf} / \text{cm}^2 / \text{saniye}$. Türk standartları bu hız $1,0 \text{ kgf} / \text{cm}^2 / \text{saniye}$ olarak vermiştir.

iii)Diğer etkenler

Basınç dayanımını etkileyen diğer önemli faktörler su-çimento oranı, numunenin bakımı (kür), deney sırasında numunenin nemli olup olmaması ve deney presinin özellikleridir. Nemli denenen bir numune, kuru denenen bir numuneye oranla %25' varan bir dayanım azalması gösterebilir



Şekil 4.5. Betonun basınçta davranışı

Eksenel basınçta beton için yumuşamayı içeren gerilme uzama davranışı denklem nonlinear olup (Şekil 4.5.) aşağıdaki gibidir.

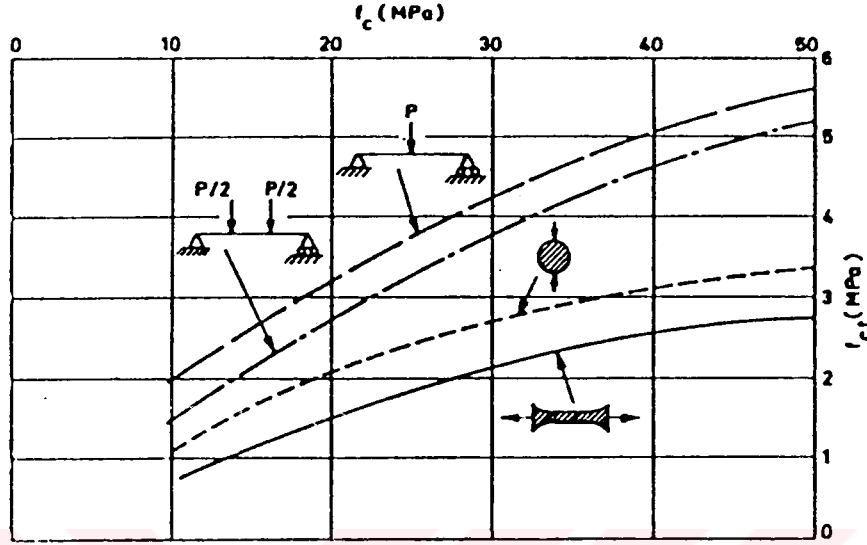
$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + \left(\frac{E_c \varepsilon_{cp}}{\sigma_{cp}} - 2 \right) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cp}} \right) + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cp}} \right)^2} \quad (4.1)$$

Burada; σ_{cp} =Betonun Eksenel Gerilmesi(N/mm²)

ε_{cp} =Betonun Eksenel Uzaması

E_c =Betonun Young Modülü (N/mm²)

Denklem (4.1)' deki parabol denklemi ile beton davranışı basınçta belirlenir.



Şekil 4.6. Deney türüne göre betonun çekme dayanımı

Tek nokta yüklü kirişte kırılmanın belirli bir kesitte meydana gelmesi gerekirken, çift nokta yüklü kirişte kırılma, iki noktasal yük arasında herhangi bir kesitte olabilir. Sonlu bir uzaklıkta yerel zayıflık olma olasılığı, tek bir kesitte yerel zayıflık olma olasılığından çok daha fazla olduğundan, çift nokta yük altındaki kirişlerin ortalama dayanımı daha düşük olmaktadır. Şekil 4.6'da, basit çekme altındaki dayanım, silindir yarma dayanımından düşük olduğu görülmektedir. Eksenel çekme deneyinde deney elemanı uzunluk boyunca herhangi bir kesitte kırılabilir. Silindir yarma deneyinde ise mümkün olan tek bir kırılma düzlemi vardır. Bu durumda, sonlu bir parçada yerel zayıflıklar bulunma olasılığı tek kesitte oranla daha yüksek olduğundan, çok sayıda deneyden elde edilen dayanım ortalamasının daha düşük olması doğaldır.

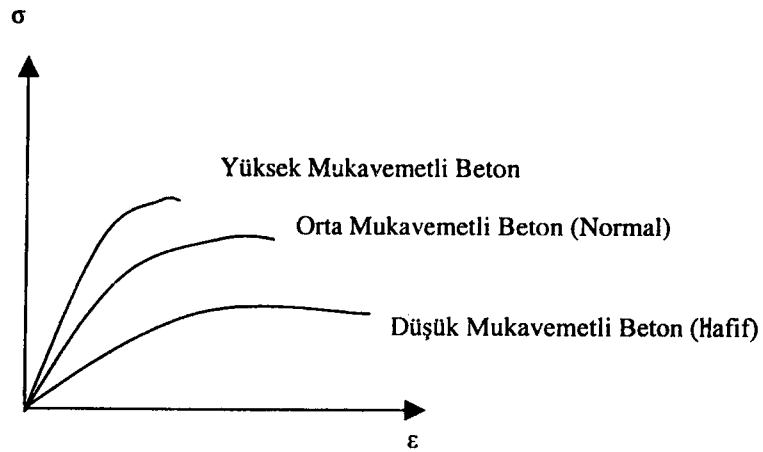
5. NORMAL BETON

5.1. Genel Bilgi

T.S. 500'e [1] göre karakteristik basınç dayanımı 16 ile 25 MPa olan beton normal beton olarak tanımlanmaktadır. Karışım olarak sadece agrega çimento ve su kullanılır. Normal beton yarı gevrek olduğundan yapı tasarımı kırılma mekaniğine dayanmalıdır.

5.2. Göçmede Davranış

Beton Yapıların göçmesinin sünek olması istenir fakat betonun heterojen yapısı nedeni ile gevrek göçme kaçınılmazdır. Sünek malzeme göçmesinde taşıma gücüne erişildiğinde, artan deformasyonlar ile yük sabit kalırken , gevrek malzeme göçmesinde ise taşıma gücüne erişildikten sonra yük azalır (yumuşama). Davranış ve güvenliği olumsuz etkileyen bu yük azalmasının nedeni büyük bir olasılık ile boyut etkisidir. Çünkü geometrik olarak benzer farklı boyutlardaki elemanlarda da göçme gerilmesi artan boyutlar ile azalmaktadır.



Şekil 5.1. Betonun mukavemetine göre σ - ϵ diyagramı

Şekil 5.1. de görüldüğü gibi normal beton yüksek dayanımlı betona nazaran daha sünek davranıyor.

5.3. Deney Kirişlerin Hazırlanması

Kuru beton karışım oranı su/çimento/kum/çakıl=0.5/1/1.87/3.13 (ağırlık olarak) tır. Kaba agreganın en büyük boyutu 10 mm dir. Kaba agreganın boyutları 4.76mm-10mm arasındadır, ince agrega 4 no'lu eleğin altında kalan malzemedir. Betoniyerde ilk olarak kum, çakıl ve çimento kuru olarak yaklaşık 2 dakika karıştırılmıştır, su sonradan ilave edilmiştir ve yine yaklaşık 2 dakika karıştırılmıştır.

Aynı numuneden 150 mm çaplı 300 mm yükseklikli üç silindir numune beton dayanımı bulmak için dökülmüştür. Çimento olarak katkılı portland çimentosu (KPÇ 350), kullanılmıştır. $a_0=0.2h$, $S=4.75h$, $h=0.2L$ deneylerde kullanılacak büyüklüklerdir. Burada; a_0 =başlangıçta açılan çentik uzunluğudur.

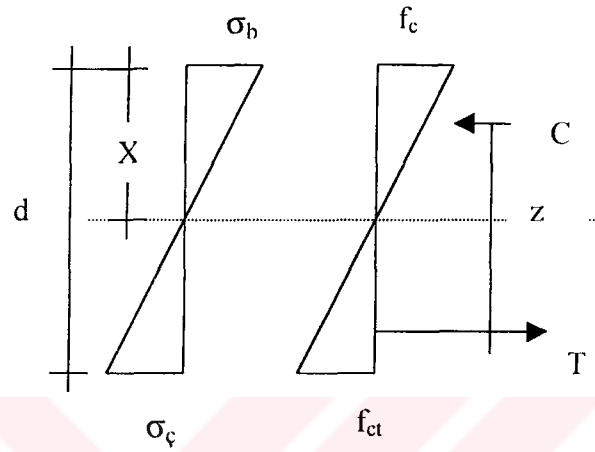
Beton, basınç kuvvetlerini iyi taşıyan bir yapı malzemesidir. Betonun taşıma özelliği ve birim kısalması, çekme kuvveti etkisinde oldukça küçüktür. Aşağıda TS 500'de öngörülen çekme dayanımları verilmiştir. Denklemde çekme ve basınç dayanımları N/mm^2 olarak alınmıştır.

$$\text{Türk (TS 500)} \quad f_{ct}=0,35\sqrt{f_c}$$

(eksenel çekme)

5.4. Eğilmede Davranış

Normal betonun eğilmede davranışı şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Kiriş eğilmesinde gerilme dağılımı

Şekil 5.2’ ten üçgen benzerliğinden

$$\frac{X}{d} = \frac{\sigma_h}{\sigma_h + \sigma_v} = k_x \quad (5.1)$$

$$\sigma_v = \sigma_h \quad (5.2)$$

$$k_x = \frac{1}{2} \text{ elde edilir.} \quad (5.3)$$

$$X = \frac{1}{2} \text{ burdan da kuvvet kolu} \quad (5.4.)$$

$$z = \frac{2d}{3} \text{ bulunur} \quad (5.5)$$

$$M = Ps/4 = Cz = Tz; a = s/2 \text{ ise} \quad (5.6)$$

$$T = M/z = \frac{Ps}{4z} = \frac{2Pa}{4z} = \frac{Pa}{2z} = \frac{Pa}{2 \times 2d/3} = \frac{3Pa}{4d} \quad (5.7)$$

6. YÜKSEK DAYANIMLI BETON

6.1. Genel Bilgi

TS 500'e göre karakteristik basınç dayanımı 30 MPa ve daha fazla olan beton yüksek dayanımlı beton olarak tanımlamaktadır [1]. Yüksek dayanımlı betonda amaç, yüksek basınç gerilmelerini taşımaktır. Dayanımı yüksek betonlar ise çok gevrek olduklarından yapı tasarımı kırılma mekaniğe dayanmalıdır. Betonun kırılma mekaniği büyük ölçüde eksenel çekme kırılması için elde edilmiştir. Basınç kırılması, üç eksenli göçme olup, davranışı elde etmek oldukça güçtür.

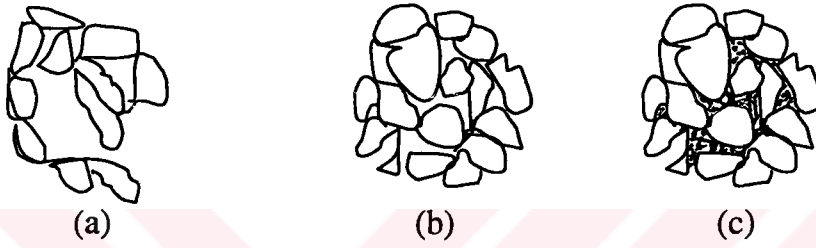
Beton endüstrisinde amaç basınç dayanımı arttırmaktır. Araştırmalarda basınç dayanımını arttırmak için toplam boşluk azaltılır ve /veya boşluk boyut dağılımı optimize edilir. Bunun için çeşitli teknikler kullanılır [26].

- 1) Çimento hamurunun 35 MPa yüksek basınç altında sıkıştırarak suyu atıp, çimento danelerini birbirine yaklaştırmak için titreşimli sıkıştırma gibi mekanik işlem yapılır.
- 2) Karışımın işlenebilirliğini bozmadan çimento danelerini dağıtan ve kullanılan suyu azaltan katkıları kullanılır.
- 3) Karışımın gözenekleri reçine, sülfür, silis dumanı gibi katkı parçaları ile doldurulur.

Mikro silika yada silis dumanı silikon ve demirli silikon ürünüdür. Parçalar küresel biçimi ve boyutları 0.005 ile 0.5 μm arasında değişir. Ortalama ϕ 0.1 μm dir. Bu boyutlar çimento dane boyutundan (0.5-1.0 μm) iki merteye küçüktür. Bu yüzden mikro silisler, çimento daneleri arasını dolduran mikro dolduruculardır. Ayrıca mikro silisler saf amorf silisler olup gözeneklerde

alkali hidratasyon iyonlar ile kimyasal reaksiyona girer bağlayıcı hamur, çimento daneleri arasındaki boşlukta homojen çok küçük mikro silisler içerir.

Süper akışkanlaştırıcı (sulphaneted, naphthaline) çimento ve mikrosilis parçacıkların birbirinin üzerinden karışım sırasında kaymasına yardımcı olarak yoğunluğu arttırmak amacı ile kullanılır.



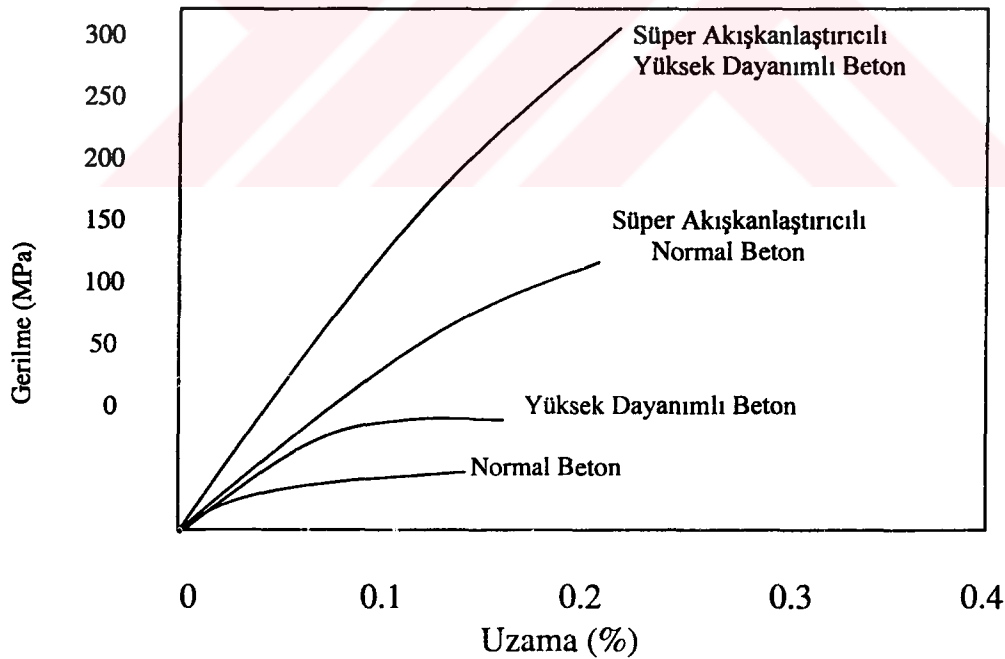
Şekil 6.1. a) Çimento hamuru b) Süper akışkanlaştırıcı çimento hamuru
c) Silis dumanı eklenmesi

Böylece karışımın işlenebilirliğini değiştirmeksizin su ihtiyacı azalır. Tipik silis dumanlı harç , ağırlık olarak Portland Çimentosunun %10-50 si kadar mikro silis içerir, %1-4 (kuru ağırlık) süper akışkanlaştırıcı ve 0.12-0.22 katı (çimento+mikrosilis) için su, kum, çakıl uygulamaya bağlı olarak eklenmelidir.

Mikrosilisler, çimento daneleri arasındaki boşlukları doldurur ve alkali gözenek çözümlerindeki iyonlar ile etkileşme yanında çimento daneleri arasındaki kapiler kanalları kapatarak iç sıvı geçişini azaltır. Yüksek dayanımlı betonda çok yüksek iç yapışma olur. Bu yüzden su altı beton işlerinde çok uygundur. Aynı nedenle yüksek dayanımlı beton normal dayanımdan daha dayanıklıdır. Donma çözülme deneylerinde çok dayanıklıdır.

6.2. Göçmede Davranış

Yüksek dayanımlı betonda agrega ve matriksin Young Modülleri ve mukavemeti arasındaki fark normal betondan çok küçüktür. Yüksek dayanımlı beton, daha homojen malzeme olarak davranır ve sonuçta kırılma bölgeleri daha küçüktür. Boyut etkisi incelemesinde aynı yapı boyutu için yüksek mukavemetli beton lineer elastik kırılma mekaniğine daha yakındır yani normal betona göre davranışı daha gevrektr. Bu yüzden kırılma mekaniği analizi ve boyut etkisi, yüksek dayanımlı betonlarda, normal dayanımlı betonlardan çok daha önemlidir.



Şekil 6.2. Farklı betonlarda σ - ϵ diyagramı

6.3. Deney Numuneleri

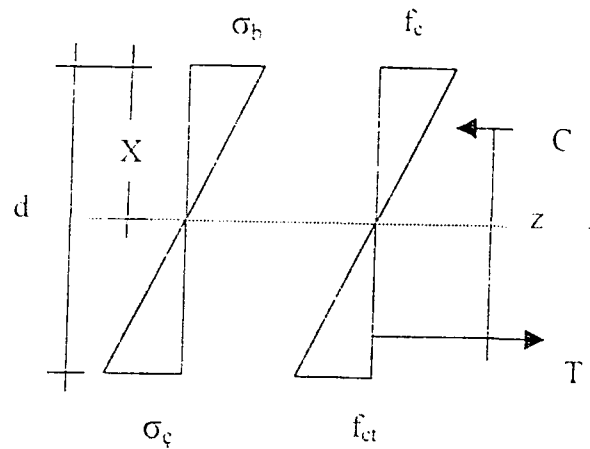
Numune şekli ve boyutları normal beton ile aynıdır, ancak dayanımı yükseltmek için karışıma silis dumanı ve akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir.

Beton karışım oranı su / çimento / kum / çakıl / süper akışkanlaştırıcı / silis dumanı = 0.5/1/1.87/3.13/0.05/0.11 (ağırlık olarak) tır. Kaba agreganın en büyük boyutu 10 mm dir. Kaba agreganın boyutları 4.76mm-10mm arasındadır, ince agrega 4 no'lu eleğin altında kalan malzemedir. Betoniyerde ilk olarak kum, çakıl, çimento ve silis dumanı kuru olarak yaklaşık 2 dakika karıştırılmıştır, su ve süper akışkanlaştırıcı sonradan ilave edilerek yine yaklaşık 2 dakika karıştırılmıştır.

Aynı numuneden 150 mm çaplı 300 mm yükseklikli üç silindir numune beton dayanımı bulmak için dökülmüştür. Çimento olarak katkıli portland çimentosu (KPÇ 350), kullanılmıştır.

6.4. Eğilmede Davranış

Yüksek dayanımlı betonun eğilmede davranışı normal betonun ile aynıdır.



Şekil 6.3. Yüksek dayanımlı betonun gerilme diyagramı

Şekil 6.3' ten üçgen benzerliğinden, 5.4 bölümdeki benzer sonuçlar elde edilir (5.1-5.7). Çekme kuvveti Denklem (6.1)' de verilmiştir.

$$T=3Pa/4d \quad (6.1)$$



7. HAFİF BETON

7.1 Genel Bilgi

İnşaatlarda en çok kullanılan malzeme yoğun agrega, çimento ve sudan meydana gelen betondur. Betonun yerini alabilecek özelliklere sahip ve daha ucuz malzeme arayışlar değişik araştırmacılar tarafından yapılmaktadır. Bu konuda yıllardan beri çeşitli suni ve doğal hafif agregalarla yoğunluğu normal betona göre az olan hafif beton üretilmektedir. Genellikle bu betonlar atık maddeleri değerlendirmek amacı ile ısı ve ses yalıtımı yada dolguda kullanarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Bu betonlar meydana geldikleri malzemelere göre;Yüksek fırın cürufu betonu, kömür cürufu betonu, genleştirilmiş kil ve perlit betonu, uçucu kül betonu, odun talaşı betonu, tuf betonu, ahşap yongalı betonlar ve diatomit betonu gibidir.

Gelişmiş ülkelerde son yirmi yıl içerisinde, hafif beton teknolojilerini geliştirerek kullanım alanlarını artırmışlardır. Hafif beton üretiminde yurdumuzda en çok ponza taşı kullanılmaktadır. Bu malzemenin dane dağılımı düzensiz bir granülometriye sahip olmasına rağmen kırma ve eleme işleminden sonra beton agregası olarak kullanılabilen özelliktedir.

Türkiye, pomza agregası bakımından Dünyanın en kaliteli ve zengin kaynaklarına sahiptir. Hafif agrega olarak kullanılan doğal malzemelerin başında pomza taşı gelmektedir. Günümüzde işletilmekte olan varolan pomza taşı yatakları; Kayseri (Develi), Kayseri (Talas, Reşadiye, Gömeç köy), Niğde (Gölcük), Nevşehir-Ürgüp (Ayaktaşı, Demirkuyu, Cemil ve Boğaz köy), Bitlis-Tatvan, Adilcevaz ve Ahlat (Sor köy), Muş (Bulancak ve Karahasan

nahiyesi), Kars-Iğdır, Van (Alay, Avis ve Mollakasım köyleri) ve Van-Erçiş, İsparta.

Bu kadar yaygın olarak bulunan malzeme inşaat alanında yeterince değerlendirilmemektedir. Hafif agrega ile yapılan betonların normal betona göre sayısız üstünlükleri vardır [27].

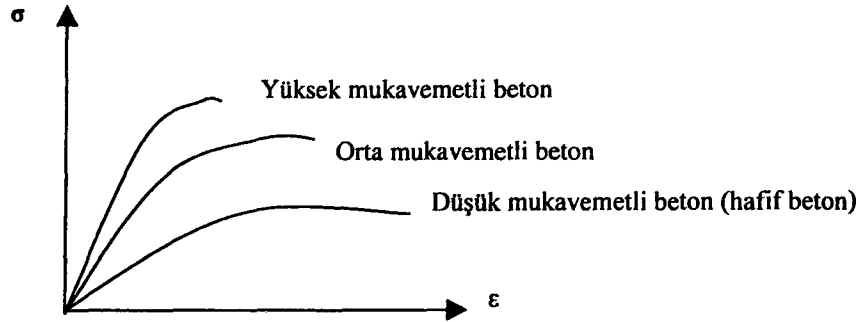
Bu üstünlükler;

- Bina elemanlarının ölü yükü az olacağından kesit küçülmesinde, malzeme tasarrufu ve hacim genişlemesi sağlanacaktır.
- Yoğunluğunu az olmasından dolayı depremlerden az etkilenerek can ve mal kaybı daha az olacaktır.
- Isı ve ses yalıtkanlığı daha iyidir. İkinci bir yalıtıma gerek olmayacaktır.
- Yangına karşı dayanımı daha fazladır.
- Normal agregaya göre su emme oranı yüksektir. Fakat agreganın içindeki gözenekleri tamamı su ile dolmadığı için buzlanmadan meydana gelebilecek genişlemeden etkilenmez. Bu özelliğinden dolayı hafif betonun donmaya karşı dayanımı yüksektir.
- Hafif betonla kış aylarında beton dökmek mümkün olduğundan önemli bir zaman kazanılmış olacaktır.

Dezavantajlar;

- İstenilen mukavemet sağlanamaz
- Elastisite modülü düşük, büyük deformasyonlar meydana gelir.

7.2 G   mede Davranış



şekil 7.1.  -  diyagramı

Grafikten görüldüğü gibi hafif betonun mukavemeti daha düşük olduğ  için kırılmada daha sünek davranması bekleniyor.

7.3. Kullanım Alanları

- Katlarda ısı ve ses yalıtımı için
- Düşük döşemelerde hafif dolgu betonu olarak
- Tasviye betonu olarak değişik tatbikatlarda
- Teraslarda, balkonlarda, eğimli ve düz  atılarda
- Renovasyon ve onarım işlerinde
- Villa-konut sanayi ve zirai tesislerde taban tesviye ve izolasyon betonu olarak
- Özel yapılarda tesviye ve izolasyon betonu olarak
- Yollarda, köprülerde, menfezlerde ve probleml  arazi tatbikatlarında dolgu ve izolasyon için
- Deprem bölgelerinde  zel Parasismik yapılarında izolasyon ve dolgu/k nstr ksiyon malzemesi olarak.

7.4. Hafif Betonun Sınıflandırılması

- a) Hafif agregalı betonlar
- b) İnce danesiz betonlar
- c) Boşluklu betonlar (hafif gaz betonlar)

7.4.1. Hafif agregalı beton

Hafif agregalar doğal olabileceği gibi yapay agregalar da olabilir. Doğal agregalardan en fazla kullanılan malzeme pomza taşıdır. Yapay agregalar kil, şist, uçucu kül, arduaz türü killi malzeme pişirilerek elde edilir. Yapay malzemenin (agrega) üretimi enerji gerektirdiğinden çok pahalıdır. Harcın mukavemeti direk çimento ile ilgilidir, çünkü agreganın mukavemeti düşüktür.

Su emme kapasitesi çok yüksektir ve suyu kolay kaybetmez . Su/Çimento oranı hafif betonda kontrol oldukça güçtür. Karışımdan önce agrega doymun hale getirilemez ise ve Su/Çimento oranı düşük tutulmuşsa karışımdan sonra suyun büyük bir kısmı agregalar tarafından emmeyerek beton içinde ağ şeklinde rötne çatlakların meydana gelmesine neden olur. Bu durum betona çok iyi kür yapması halinde bile engellenemez.

7.4.2. İnce danesiz beton

Agregalar hafif yada normal olabilir karışımda sadece iri agrega ve çimento harcı vardır. İnce agrega olmadığından beton içinde boşluk meydana gelmektedir. Genellikle döşeme veya duvar panel yapımında kullanılır. Tamamen geçirgen olduğundan her iki yüze de özel kaplama yapılmalıdır. Prefabrike yapılarında kullanılır.

7.4.3. Boşluklu beton

1. Gaz Betonlar
2. Köpük betonlar

1. Gaz betonlar taşıyıcı elemanlar olarak kullanılmaz. Genelde ısı ve ses izolasyonu olarak kullanılırlar. Yapım ve üretim esası kireç ve alüminyum tozunun karıştırılması sonucu H gazının açığa çıkmasıyla ortaya çıkar. Çıkan H gazı kireç içinde kabarcıklar ve boşluklar meydana gelir. Yoğunluğu 800-1400 kg/m³ ve daha düşük da olabilir. Alüminyum miktarı düşürülerek yoğunluğu 450 kg/m³ olabilir. En büyük sıkıntı boşluk oranı ve boşlukların birleştirilmesi.

2. Köpük betonlar Protein esaslı bir katkı maddesiyle betoniyerde süratle karıştıran beton içinde köpük oluşmaktadır . Ayrıca bu köpüğün kaybolması için stabilizan katkı maddeleri kullanılmaktadır. Stabilizan maddeler silikatlı maddelerdir.

7.5. Hafif Betonun Karışım Hesapları

Karışım hesabı TS 2511 [28], "Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları", Türk standardı esas alınmıştır.

Çoğunlukla hafif agregalı betonların net su/çimento oranı, karışım hesabına esas olabilecek yeterli doğrulukta saptanamadığından hafif agregalı beton karışımları şart koşulan kıvamda, çimento dozu esasına göre bir seri deney karışımı yaparak hesaplanmalıdır. Karışım hesabında ince ve iri agrega kuru gevşek hacim esasına göre eşit olarak alınmıştır.

Taşıyıcı hafif beton agregası TS 1114' e [29] uygun olmalıdır. Hafif agreganın özgül ağırlığı tane büyüklüğüne bağlı olarak değişebileceğinden aşağıdaki çizelgedeki granülometri limitleri hacim esasına göre uygulanmalıdır.

Çizelge 7.1 -Hafif agregaların birim ağırlığı

Agrega Türü	Gevşek Birim Ağırlığı kg/m ³ (max)
İnce agreg	1200
İri agreg	1000
Karışık agreg	1100

Genellikle 1m³, 1.1m³ veya 1.2m³ kuru gevşek agreg öngörülmektedir. Agregada maximum birim ağırlık yöntemi uygulanarak, iri ve ince agreg oranları tespit edilmiştir.

Çeşitli hafif agregaların özellikleri arasında büyük değişiklikler görüldüğünden, belirli bir dayanım elde edilebilmesi için gereken çimento miktarı da geniş sınırlar arasında değişir. Bu sınırlar aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 7.2- Beton sınıfına göre yaklaşık çimento miktarları
(PÇ 325 için)

Beton Sınıfı	Çimento Miktarı, kg/m ³
BS 16	300-450
BS 20	325-500
BS 30	350-500

Rötre yönünden sakıncalı olabileceğinden çimento dozu mümkünse 450 kg/m³ ün üzerine çıkmamalıdır.

İstenilen kıvam sağlayacak net su miktarı yeterli deneyi ile saptanmalıdır. Çeşitli agregalarda yaklaşık 5 cm çökme verecek kıvamda 1 m³ beton için gerekli net su miktarı 180 kg ile 270 kg arasında değişir.

Karışımın yapılan genel kabülleri:

Bütün agregası hafif olan bir BS 16 betonun karışım hesabı istenmektedir. Beton karışımında özgül ağırlığı 3.1 olan PÇ 325 normuna uygun çimento kullanılmıştır. İri agreganın kuru gevşek birim ağırlığı 650 kg/m³, inceninki ise 720 kg/m³ dür. Kaba agreganın özgül ağırlığı 124 kg/m³, İnce agreganın ise 146 kg/m³. Numunelerde nem oranı sıfır varsayılmıştır.

Çizelge 7.2'e göre çimento dozu 300~450 kg/m³ arasında olmalıdır. Buna göre çimento dozu yaklaşık 400 kg seçilmiştir. 1m³ beton için 1.150 m³ kuru agrega

1. 1 m³ için gerekli agrega ağırlıklarının hesabı:

$$\text{İri agrega ağırlığı} = 0.575 \times 650 = 374 \text{ kg}$$

$$\text{İnce agrega ağırlığı} = 0.575 \times 720 = 414 \text{ kg}$$

2. Agreganın karışım içinde kapladığı hacim hesabı:

$$\text{İri agrega hacmi} = 374 / 1.24 = 302 \text{ dm}^3$$

$$\text{İnce agreganın hacmi} = 414 / 1.46 = 284 \text{ dm}^3$$

3. Çimentonun karışım içinde kapladığı hacim:

$$\text{Çimento hacmi} = 400 / 3.1 = 129 \text{ dm}^3$$

4. Gerekli suyun hesabı:

Karışımı 1 m³ tamamlamak için gerekli su miktarı, çimento ve agrega hacimlerinin toplamından geriye kalan hacimdir.

$$\text{Su hacmi} = 1000 - (302 + 284 + 129) = 285 \text{ dm}^3$$

$$\text{Su ağırlığı} = 285 \text{ kg.}$$

5. 36 dm³ lük karışımı için malzeme miktarları:

$$\text{Çimento} = 400 \times 0.036 = 14.4 \text{ kg}$$

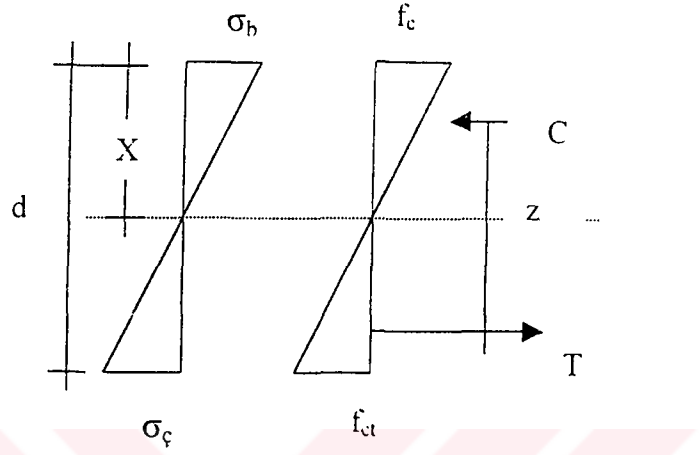
$$\text{İri agrega} = 374 \times 0.036 = 13.46 \text{ kg}$$

$$\text{İnce agrega} = 414 \times 0.036 = 14.90 \text{ kg}$$

alınmıştır.

7.6. Eğilmede Davranış

Hafif betonun eğilmede davranışı normal betona benzer varsayılmıştır.



Şekil 7.2.Hafif betonun eğilmesinde gerilme diyagramı

Şekil 7.2.' den üçgen benzerliğinden, (5.1-5.7)' deki denklemler geçerli olup.

Eğilme Kirişlerde çekme kuvveti Denklem (7.1)' den alınır.

$$T = 3Pa/4d \text{ elde edilir.} \quad (7.1)$$

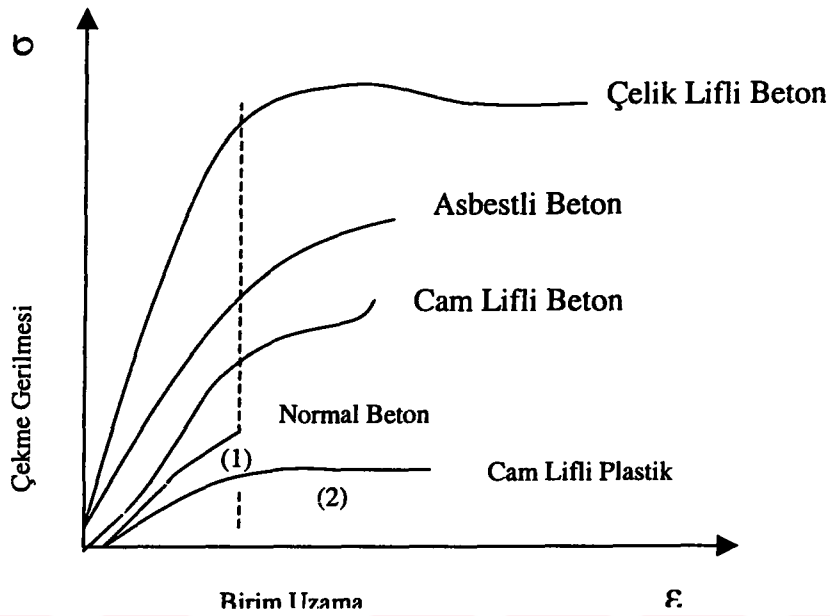
8. LİFLİ BETON

8.1 Lifli Beton Çeşitleri

Lifli kompozit malzemeler teknolojinin çeşitli uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Araştırmalar sonucu çeşitli lifli betonlar ortaya çıkmıştır. Bu kompozit malzemelerin en yaygın olanları:

- Cam lifli beton
- Çelik lifli beton
- Plastik lifli beton
- Polymer lifli beton
- Mika levhalı beton
- Plastik lifli beton

dur. Şekil 8.1'de betonlardan bazılarının çekme etkisi altındaki davranışı görülmektedir.



Şekil 8.1. Çimentlo bazlı çeşitli kompozitlerin yüksek ve düşük kırılma uzamasına sahip matriks ve liflerin şematik σ - ϵ grafikleri. 1) Düşük kırılma uzaması olan matriks (beton), 2) Yüksek kırılma uzaması olan matriks (plastik) göstermektedir.

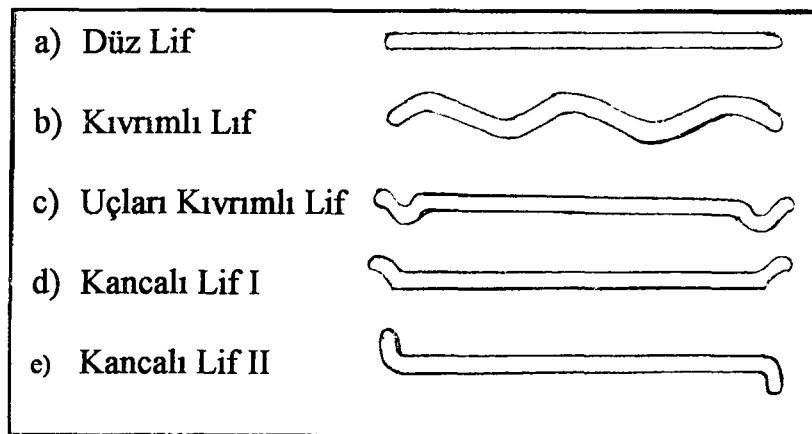
Betonda lif malzemesi olarak kullanılan malzemesi cam, plastik ve polypropylen gibi malzemelerin ilavesi, yeni yapılan lif takviyeli betonda bir mukavemet artışı sağlamamaktadır. Bu malzemelerin elastisite modülü betonun elastisite modülünden daha küçük olması, bu sonucu oluşturmaktadır. Çünkü liflerin, beton matriks deforme olmadan önce gelen yükü karşılamada çok az miktarda katkısı olmaktadır. Bu malzeme betonun düktilitesini artırmaktadır.

Çeliğin elastisite modülü betondan daha büyük olduğundan, betona gelen yükün taşınmasında çelik liflerin payı diğer liflere göre daha büyüktür.

8.2. Çelik Lifli Betonun Genel Tanıtımı

Çelik lifli beton, içerisindeki aralıklarla dağıtılmış küçük çelik teller bulunan ince veya ince ve kaba agrega kullanılarak yapılmış bir kompozit malzemedir. Bilinen normal beton ile birlikte puzzolanları ve katkı maddeleri ile ortak olarak kullanılabilir.

Bu çelik liflerin $30-118 \text{ kg/m}^3$ miktarda ilave edilmesi, beton ve diğer harçların mühendislik özelliklerin bir çoğunda önemli düzeltmeler sağlanmaktadır (Örneğin, çarpma dayanımı büyük miktarda artış göstermektedir, eğilme mukavemeti yorulma mukavemetini ve kırılma mukavemetini arttırmaktadır). Çelik lifli betonun hazırlamasında çok değişik boyut ve geometride lifler kullanılmaktadır. En çok kullanılan lifler şekil 8.2' de gösterilmiştir.



Şekil 8.2. Çeşitli geometrideki çelik lifler

8.3 Çelik Lifli Betonun Özellikleri

Beton, basınç kuvvetlerini iyi taşıyan bir yapı malzemesidir. Betonun taşıma özelliği ve birim kısalması, çekme kuvveti etkisinde oldukça küçüktür. Betona karıştırılan liflerin yapısı onun çekme özelliğini düzeltir ve artırır. Çekme mukavemetinin yanında diğer özelliklerinde de bir düzelme fark edilir.

Özellikle, çelik liflerin betona belirli oranda karıştırılması ile elde edilen yeni betonun, birçok mühendislik özelliklerinde iyileşmeler gözlenmiştir. Basınç mukavemeti, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti ve düktilitesinde önemli derecede düzelmeler meydana gelmiştir.

Basınç ve çekme kuvvetleri etkisi altında, liflerin çekme mukavemeti tam olarak kullanılmadan önce, beton matrikste çok sayıda kılcal çatlakların meydana gelmesini önlemektedir.

Çelik lifli beton , dinamik yükleme ve şekil değiştirmelere karşı oldukça fazla teknik bir avantaj sağlamaktadır. Özellikle, dinamik etkilerin bulunduğu yapı elemanlarında kullanımı çok uygundur. Titreşimli makine temellerinin yapımında ve deprem etkisi altında bulunan yapılarda, normal çelik çubuklar ile birlikte çok başarılı bir şekilde kullanılabilir.

Çelik lifli beton basınç düktilitesini gösterir. Yani taşıma gücüne eriştiği halde yük taşıma özelliği vardır. Ayrıca kesme, burulma ve yorulmaya karşı mukavemeti fazladır. Çatlamlar, dökülme, parçalanma ve dağılmalar azdır. Basınç mukavemetinde de belirli artış görülür. Çekme mukavemetinde ise normal betona göre oldukça önemli artışlar gözlenir.

Bu üstün özelliklerden dolayı kesitler daha küçülerek malzemedan tasarruf sağlanır. Bazı yapı uygulamalarında donatıya bile gerek kalmaz.

8.4. Çelik Lifli Betonun Kullanım Alanları

- Endüstri yapılarında
- Hidrolik yapılarında
- Shotcrete astarlamalarında
- Shotcrete kaplamalarında
- İnce kabuk yapılarında
- Patlamaya karşı mukavemetli yapılarda
- Deprem olası yapılarda

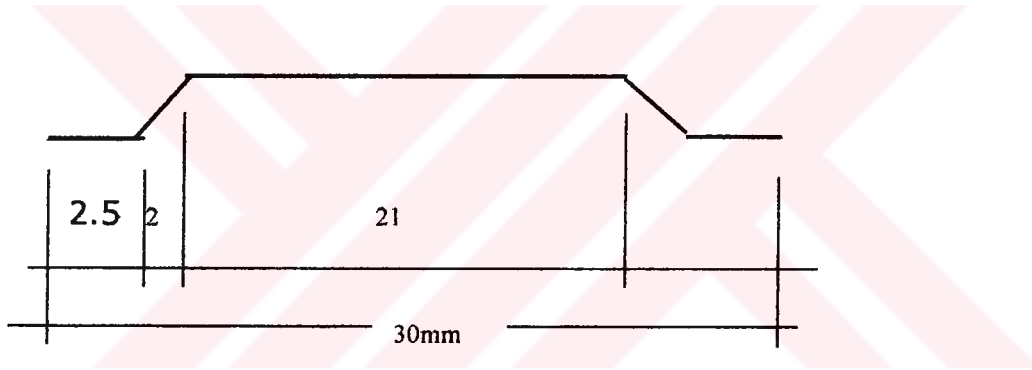
8.5. Göçmede Davranış

Yapılan araştırmalardan görülmüştür ki normal betondan farklı olarak göçme ilk çatlak ile olmuyor büyük numuneler de dahil plastik göçme vardır. Elemanların betonarme kirişler gibi liflerin varlığı yüzünden iki parça olmayıp az da olsa yük taşır durumda göçme olur. Çelik lifli beton göçmelerinde boyut etkisi görülmüştür. Çelik liflerin kullanılması göçme gevrekliğini azalmaktadır.

8.6. Deney Numuneleri

Deney numunelerin şekli ve boyutları normal beton ile aynıdır. Beton karışım oranı su/çimento/kum/çakıl=0.5/1/1.87/3.13/ (ağırlık olarak) tır. Çelik lif Sabancı Holding-Bekaret ortaklığı ile kurulan Beksa'nın üretimi, Dramiks Çelik telleri kullanılmıştır (Şekil 8.3). Çelik lifler toplam ağırlığının 0.02 si olacak şekilde kullanılmıştır. İri agreganın en büyük boyutu 10 mm dir. İri

agreganın boyutları 4.76mm-10mm arasındadır, ince agrega 4 no'lu eleğin altında kalan malzemedir. Aynı oranlarda iki karışım hazırlanmış lifsiz olan ilkinden 150mm çaplı 300mm yükseklikli üç silindir numune beton dayanımı bulmak için dökülmüştür. İkinci karışım olan lifli betonda ise önce lifler topaklanmayı önlemek için betoniye çakıl ile birlikte konmuş sonra kum, çimento ve su sırası ile katılarak hazırlanan karışımdan numuneler ile üç silindir lifli olarak elde edilmiştir. Çimento olarak katkılı portland çimentosu (KPÇ 350), kullanılmıştır.

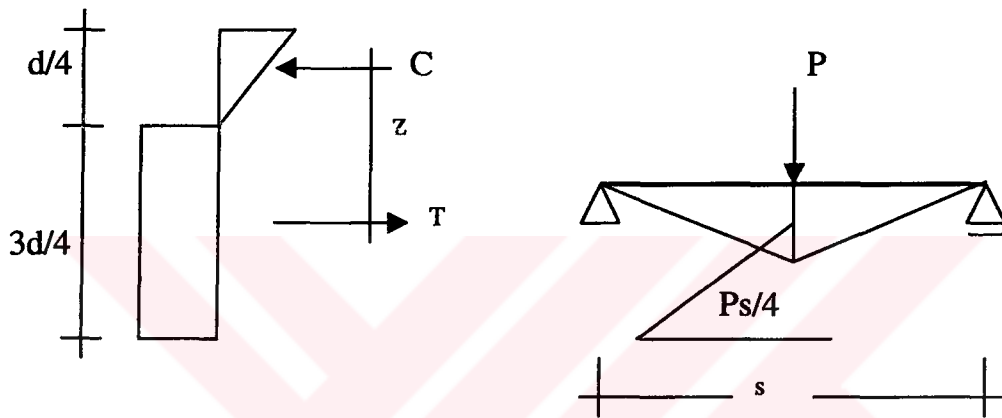


Şekil 8.3. Dramix çelik teli

Deneyde çelik liflerin 30 mm olanı kirişlerin en küçük boyutu 40 mm olduğundan seçilmiştir. Çelik liflerin tipi ZP305 dir. Uzunluğu 30 mm, çapı 0.5 mm, çekme dayanımı 1100 MPa dır. Uzunluk/çap (aspect) oranı kıvrıklar da gözönünde alındığında 70 dir.

8.7. Eğilmede Davranış

Lifli betonun eğilme gerilmeleri altında davranışı bilinen geleneksel teori ile açıklanamaz. Gerilme bloğu aşağıdaki gibi (Şekil 8.4) alınmıştır [23].



Şekil 8.4. Kiriş eğilmesinde gerilme dağılımı

Aşağıdaki varsayımlar kullanılmıştır.

- Çekmede gerilme-uzama orantılı değildir.
- Lifli beton çekme ve basınçta farklı davrandığı için tarafsız eksen ağırlık merkezi değildir.
- Elastik davranış varsayımı ile bulunan eğilme çekmesi direk çekmenin üç katına yakındır.
- Gerçekte olmadığı halde elastik davranışı tasarımda kullanmak, yeterlidir.

Uygulanan dış yük momenti

$$M = Ps/4 = Cz = Tz$$

(8.1)

Kuvvet kolu Şekil 5.4'den

$$z=13d/24 \quad (8.2)$$

elde edilir.

Çekme bölgesindeki gerilmelerin bileşkesi

$$T=M/z \quad (8.3)$$

$$T=3Pa/13d \quad (8.4)$$

elde edilir.

9. DENEY SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

9.1. Sonuçların Analizi

Deney sonuçların incelenmesi bu bölümde verilmiştir. Sonuçların analizinde Bazant'ın önerdiği yaklaşık boyut etkisi denklemi kullanılmıştır. Boyut etkisi denklemi lineer regresyon ile düzenledikten sonra daha önce bulunan sonuçların $Y=AX+C$ biçimine getirilmesi, dolayısıyla ilgili çizelgelerin ışığında grafiklerin oluşturulması bu bölümde sunulacaktır.

X ve Y eksen takımında X ile gösterilen bölge boyut değişimini $X=D$, Y ise $(f_t/\sigma_N)^2$ değerini göstermektedir. Bu ifadeler $Y=AX+C$ ile tanımlandığından C'nin pozitif ve sıfırdan farklı olması gerekmektedir. Boyut etkisini en açık bir şekilde gösteren Bazant'ın logaritmik eğrisidir. Burada daha önce sözü edilen betonarme elemanların dayanım kriteri ile LEKM arasındaki geçiş bölgesini bu grafikten görmek olası olacaktır. Lineer Regresyon için Excel 7 programı kullanılmıştır.

9.1. 1. Normal beton kirişlerin deney sonuçları

9.1.1.1. Yükleme genişliği sabit kirişlerin deney sonuçları

Bu deneyde yük altındaki mesnet genişliği 1cm olarak yapılmıştır. Aşağıda çizelge 9.1'de kiriş yükleri, göçme değerleri ile göçmeye karşı gelen nominal kırılma değerleri verilmiştir.

Çizelge 9.1. Normal beton kirişlerin deney sonuçları

Kiriş No:	Kırılma Yükü (kN)	f_c MPa	b (mm)	D (mm)	L (mm)	σ_N (MPa)
NS1	1,742	22,9	40	136	800	13,73
NS2	1,657	22,9	40	136	800	14,84
NS3	1,699	22,9	40	136	800	13,36
NS4	1,607	22,9	40	68	400	20,47
NS5	1,181	22,9	40	68	400	20,03
NS6	0,968	22,9	40	68	400	16,42
NS7	0,574	22,9	40	34	200	19,45
NS8	0,578	22,9	40	34	200	19,58
NS9	0,946	22,9	40	34	200	32,06

Normal betonun lineer regresyon sonuçları çizelge 9.2’de verilmiştir. Burada verilen deney sonuçlarının Bazant’ın önerdiği boyut etkisi yasasını destekleyip desteklemediği araştırılmıştır.

Çizelgelerde, kirişlerin kırılma yükleri, silindir basınç dayanımı (f_c), kiriş kesitinin genişliği (b), yüksekliği (D), uzunluğu (L) ve göçme gerilmesi verilmiştir. Bu amaçla bu çizelgelerden yararlanılarak veriler, $Y=AX+C$ ile temsil edilir. Dolayısıyla B ve D malzeme ile yapı biçimine bağlı sabitler belirlenip, Bazant’ın önerdiği boyut etkisi araştırılır.

Çizelge 9.2. Normal betonun doğrusal regresyonu

Kiriş No:	f_t (MPa)	$(f_t/\sigma_N)^2$	$I \log (\sigma_N/Bf_t)$	$I \log \beta$
NS1	1,67	0,014869	-0,42504	0,510289
NS2	1,67	0,012731	-0,39132	0,510289
NS3	1,67	0,015691	-0,43672	0,510289
NS4	1,67	0,003775	-0,12738	0,209259
NS5	1,67	0,006988	-0,21609	0,209259
NS6	1,67	0,010401	-0,34743	0,209259
NS7	1,67	0,007413	-0,27389	-0,091770
NS8	1,67	0,007311	-0,27087	-0,091770
NS9	1,67	0,002723	-0,05679	-0,091770

Excel 7,0' den elde edilen lineer regresyon sonucu bulunan değerler çizelge 9.3'de verilmiştir.

$$Y=AX+C$$

Çizelge 9.3. Normal betonun doğrusal regresyon sonuçları

C	A	$D_0=C/A$ (mm)	$B = \frac{1}{\sqrt{C}}$	r	G_f (N/mm)	c_f	δ	σ_y	w_y
0.0021	0.00005	42	21.82	0.850	12.397	6.072	0.161	0.0044	0.286

Burada: r: korelasyon katsayısı, G_f : kırılma enerjisi, c_f : kırılma bölgesi uzunluğu, δ : varyasyon, σ_y : standart sapma, w_y : değişim katsayısıdır.

9.1.1.2. Yük genişliği değişken kirişlerde deney sonuçları

Bu deneyde yükün altındaki mesnet numunenin altındaki mesnet ile aynıdır. Aşağıda izelge 9.4’de kiriş yükleri, göçme değerleri ile göçmeye karşı gelen nominal kırılma değerleri verilmiştir.

Çizelge 9.4. Yinelenen normal betonun deney sonuçları

Kiriş No:	Kırılma Yükü (kN)	f_c MPa	b (mm)	D (mm)	L (mm)	σ_N (MPa)
NS01	1,4824	22,6	40	136	800	12,5631
NS02	1,4824	22,6	40	136	800	12,5631
NS03	1,6104	22,6	40	136	800	13,6478
NS04	0,7116	22,6	40	68	400	12,0613
NS05	1,0956	22,6	40	68	400	18,5699
NS06	0,7546	22,6	40	68	400	12,7902
NS07	0,3484	22,6	40	34	200	11,8105
NS08	0,3914	22,6	40	34	200	13,2682
NS09	0,5614	22,6	40	34	200	19,0310

Tekrarlanan Normal betonun lineer regresyon sonuçları izelge 9.5’de verilmiştir. Burada verilen deney sonuçlarının Bazant’ın önerdiği boyut etkisi yasasını destekleyip desteklemediği araştırılmıştır.

Çizelge 9.5. Yinelenen normal betonun doğrusal regresyonu

Kiriş No:	f_t (MPa)	$(f_t/\sigma_N)^2$	$\log(\sigma_N/Bf_t)$	$\log\beta$
NS01	1,66	0,01754	-0,05847	-0,69254
NS02	1,66	0,01754	-0,05847	-0,69254
NS03	1,66	0,01486	-0,02251	-0,69254
NS04	1,66	0,01903	-0,07617	-0,99357
NS05	1,66	0,00803	0,11124	-0,99357
NS06	1,66	0,01692	-0,05069	-0,99357
NS07	1,66	0,01985	-0,08530	-1,29460
NS08	1,66	0,01573	-0,03476	-1,29460
NS09	1,66	0,00766	-0,12189	-1,29460

Excel 7,0' den elde edilen lineer regresyon sonucu bulunan değerler çizelge 9.6'da verilmiştir.

$$Y=AX+C$$

Çizelge 9.6. Yinelenen normal betonun doğrusal regresyon sonuçları

C	A	$D_0=C/A$ (mm)	$B = \frac{1}{\sqrt{C}}$	r	G_f (N/mm)	c_f	δ	σ_y	w_y
0.0134	0.00002	670	8.64	0.232	2.647	108.7	0.085	0.0187	0.304

9.1.2. Yüksek dayanımlı beton kirişlerinin deney sonuçları

Aşağıda çizelge 9.7’de kiriş yükleri, göçme değerleri ile göçmeye karşı gelen nominal kırılma değerleri verilmiştir.

Çizelge 9.7. Yüksek dayanımlı betonun deney sonuçları

Kiriş No:	Kırılma Yükü (kN)	f_c MPa	b (mm)	D (mm)	L (mm)	σ_N (MPa)
HS1	1,44	34,01	40	136	800	12,23
HS2	1,96	34,01	40	136	800	16,57
HS3	1,70	34,01	40	136	800	14,40
HS4	1,14	34,01	40	68	400	19,30
HS5	0,80	34,01	40	68	400	13,52
HS6	0,97	34,01	40	68	400	16,42
HS7	0,56	34,01	40	34	200	19,04
HS8	0,56	34,01	40	34	200	19,04
HS9	0,52	34,01	40	34	200	17,62

Yüksek dayanımlı betonun lineer regresyon sonuçları çizelge 9.8’de verilmiştir. Burada verilen deney sonuçlarının Bazant’ın önerdiği boyut etkisi yasasını destekleyip desteklemediği araştırılmıştır.

Çizelge 9.8. Yüksek dayanımlı betonun doğrusal regresyonu

Kiriş No:	f_t (MPa)	$(f_t/\sigma_N)^2$	$\log(\sigma_N/Bf_t)$	$\log\beta$
HS1	2,041133	0,027848	-0,22456	0,040994
HS2	2,041133	0,015173	-0,09297	0,040994
HS3	2,041133	0,020089	-0,15365	0,040994
HS4	2,041133	0,011185	-0,02648	-0,26004
HS5	2,041133	0,022792	-0,18105	-2,26004
HS6	2,041133	0,015455	-0,09670	-0,26004
HS7	2,041133	0,011492	-0,03237	-0,56107
HS8	2,041133	0,011492	-0,03237	-0,56107
HS9	2,041133	0,013125	-0,06612	-0,56107

Excel 7,0' den elde edilen lineer regresyon sonucu bulunan değerler Çizelge 9.9'da verilmiştir.

$$Y=AX+C$$

Çizelge 9.9. Yüksek dayanımlı betonun doğrusal regresyon sonuçları

C	A	$D_0=C/A$ (mm)	$B = \frac{1}{\sqrt{C}}$	r	G_f (N/mm)	c_f	δ	σ_y	w_y
0.0099	0.00008	123.75	10.05	0.651	6.940	17.9	0.0384	0.0055	0.2859

9.1.3. Hafif beton kirişlerinin deney sonuçları

Aşağıda çizelge 9.10'da kiriş yükleri, göçme değerleri ile göçmeye karşı gelen nominal kırılma değerleri verilmiştir.

Çizelge 9.10. Hafif betonun deney sonuçları

Kiriş No:	Kırılma Yükü (kN)	f_c MPa	b (mm)	D (mm)	L (mm)	σ_N (MPa)
LW1	0,848	8,4	40	136	800	7,19
LW2	0,591	8,4	40	136	800	7,03
LW3	0,676	8,4	40	136	800	5,73
LW4	0,574	8,4	40	68	400	9,72
LW5	0,830	8,4	40	68	400	14,06
LW6	0,489	8,4	40	68	400	8,28
LW7	0,226	8,4	40	34	200	7,68
LW8	0,341	8,4	40	34	200	11,58
LW9	0,256	8,4	40	34	200	8,69

Hafif betonun lineer regresyon sonuçları çizelge 9.11'de verilmiştir. Burada verilen deney sonuçlarının Bazant'ın önerdiği boyut etkisi yasasını destekleyip desteklemediği araştırılmıştır.

Çizelge 9.11. Hafif betonun doğrusal regresyonu

Kiriş No:	f_t (MPa)	$(f_t/\sigma_N)^2$	$I \log (\sigma_N/Bf_t)$	$I \log \beta$
LW1	1,014396	0,019923	-0,25689	0,348209
LW2	1,014396	0,020812	-0,26637	0,348209
LW3	1,319096	0,031352	-0,35534	0,348209
LW4	1,319096	0,010882	-0,12557	0,047179
LW5	1,319096	0,005203	0,034663	0,047179
LW6	1,319096	0,014997	-0,19522	0,047179
LW7	1,319096	0,017456	-0,22818	-0,25385
LW8	1,319096	0,007679	-0,04985	-0,25385
LW9	1,319096	0,013611	-0,17416	-0,25385

Excel 7,0' den elde edilen lineer regresyon sonucu bulunan değerler çizelge 9.12'de verilmiştir.

$$Y=AX+C$$

Çizelge 9.12. Hafif betonun doğrusal regresyon sonuçları

C	A	$D_0=C/A$ (mm)	$B = \frac{1}{\sqrt{C}}$	r	G_f (N/mm)	c_f	δ	σ_y	w_y
0.0061	0.0001	61	12.80	0.698	7.813	8.82	0.0299	0.0074	0.382

9.1.4. Çelik lifli beton kirişlerinin deney sonuçları

Aşağıda çizelge 9.13’de kiriş yükleri, göçme değerleri ile göçmeye karşı gelen nominal kırılma değerleri verilmiştir.

Çizelge 9.13. Çelik lifli betonun deney sonuçları

Kiriş No:	Kırılma Yükü (kN)	f_c MPa	b (mm)	D (mm)	L (mm)	σ_N (MPa)
SF1	1,440	26,2	40	134	800	0,938
SF2	1,480	26,2	40	134	800	0,966
SF3	1,014	26,2	40	134	800	0,660
SF4	0,584	26,2	40	68	400	0,738
SF5	0,627	26,2	40	68	400	0,792
SF6	1,181	26,2	40	68	400	1,493
SF7	0,305	26,2	40	33.5	200	0,795
SF8	0,348	26,2	40	33.5	200	0,907
SF9	0,363	26,2	40	33.5	200	0,947

Hafif betonun lineer regresyon sonuçları çizelge 9.14’de verilmiştir. Burada verilen deney sonuçlarının Bazant’ın önerdiği boyut etkisi yasasını destekleyip desteklemediği araştırılmıştır.

Çizelge 9.14. Çelik lifli betonun doğrusal regresyonu

Kiriş No:	f_t (MPa)	$(f_t/\sigma_N)^2$	$\log (\sigma_N/Bf_t)$	$\log \beta$
SF1	1,791508	3,650322	0,011491	-0,6257
SF2	1,791508	3,441706	0,024270	-0,6257
SF3	1,791508	7,361735	-0,03337	-0,6257
SF4	1,791508	5,891208	0,015015	-0,9267
SF5	1,791508	5,110632	0,045880	-0,9267
SF6	1,791508	1,440058	0,320927	-0,9267
SF7	1,791508	5,072220	0,047518	-1,2277
SF8	1,791508	3,897443	0,104727	-1,2277
SF9	1,791508	3,582336	0,123034	-1,2277

Excel 7,0' den elde edilen lineer regresyon sonucu bulunan değerler çizelge 9.15'de verilmiştir.

$$Y=AX+C$$

Çizelge 9.15. Çelik lifli betonun doğrusal regresyon sonuçları

C	A	$D_0=C/A$ (mm)	$B = \frac{1}{\sqrt{C}}$	r	G_f (N/mm)	c_f	δ	σ_y	w_y
3,849	0,0068	565,98	0,509	0,178	0,0978	91,12	0,00297	1,6	0,41

9.2. Sonuçların Değerlendirilmesi

Boyut etkisi denkleminin (denklem 3.8) sonuçlara uygunluğu $\sigma_N = Bf_t(1 + \beta)^{-1/2}$, $\beta = D/D_0$ denenmiştir. Doğrusal regresyon ile elde edilen doğru $(f_t/\sigma_N)^2$ değerinin D'ye göre grafik gösterimi düşey eksen $1/B^2$ noktasında kesmekte ve eğimi $1/B^2 D_0$ dır.

Şekil 9.1. a, 9.2. a, 9.3. a, 9.4.a, 9.5. a' da $(f_t/\sigma_N)^2$ 'nin D'ye karşılık çizilen regresyon doğrusundan elde edilen B ve D_0 sabitleri yardımıyla $\log(\sigma_N/Bf_t)$ 'ye karşılık $\log \beta$ grafikleri çizilmiştir (Şekil 9.1. b, 9.2. b, 9.3. b, 9.4.b, 9.5. b). Bu çalışmada $(f_t/\sigma_N)^2$ nin D'ye göre çizilmiş grafiklerde boyut etkisi açıkça görülmektedir. Deney sonuçları boyut etkisinin dayanım kriteri plastik limit analize ulaşsaydı doğrunun yatay olması gerekirdi.

Şekilde r = korelasyon katsayısı, A = doğrunun eğimi, C = doğrunun Y eksenini kestiği noktayı göstermektedir. Grafiklerdeki deney sonuçlarının eğimli doğru ile temsil edilecek şekilde yerleşmesi boyut etkisinin varlığının göstergesidir. $1/2$ eğimli çizgi lineer elastik kırılma mekaniği göstermektedir.

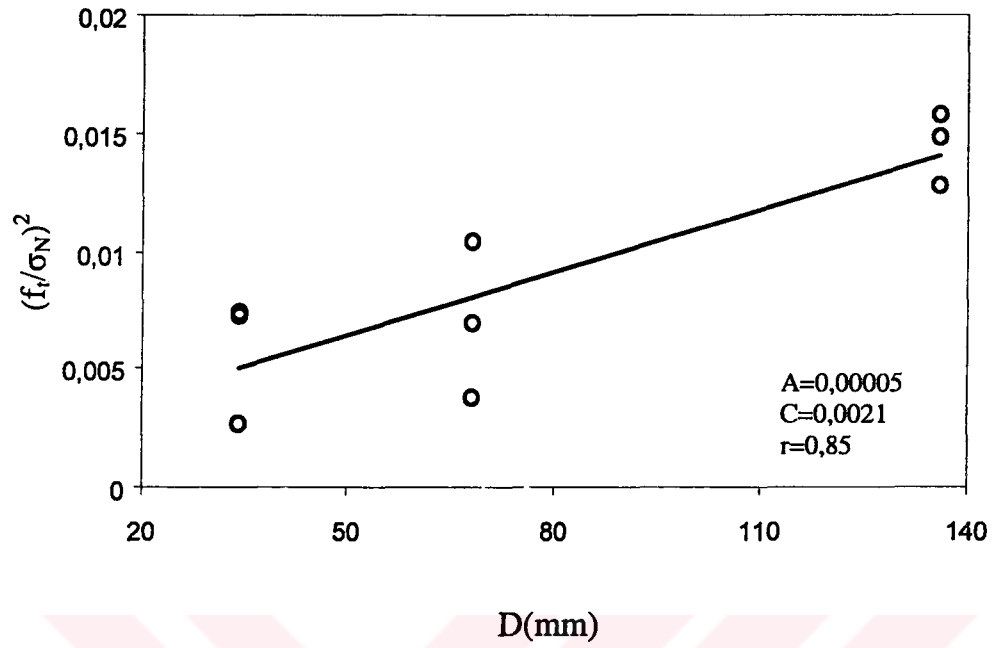
9.2.1. Normal betonun sonuçlarının değerlendirilmesi

9.2.1.1. Mesnet genişliği sabit kirişler

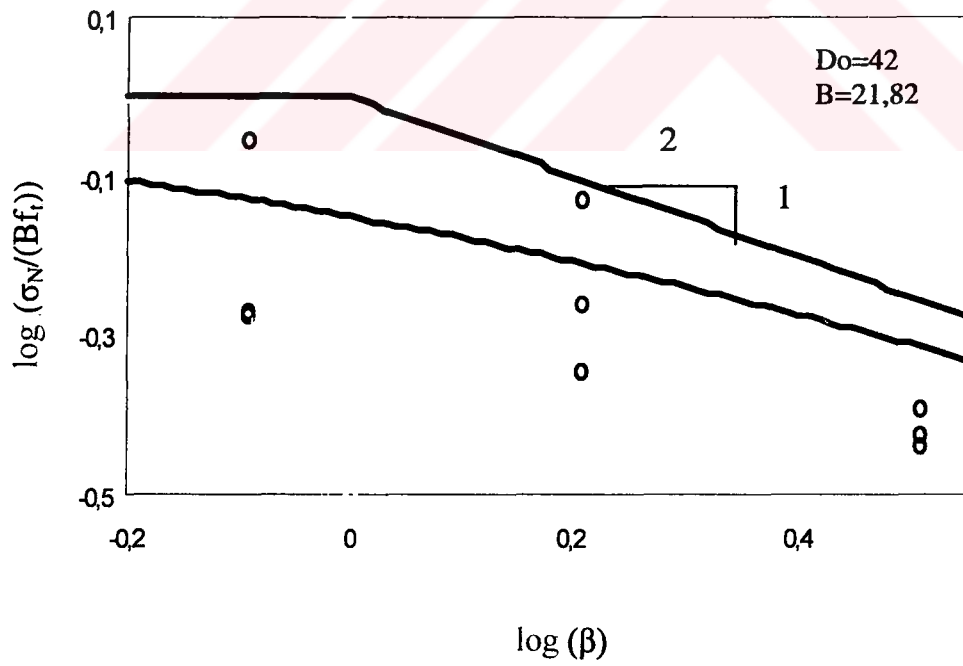
Normal betonun deney sonrası oluşturulan çizelgelerden sonra, boyut etkisinin gösterimi olan Bazant'ın önerdiği Boyut Etkisi Yasasının deney

sonuçlarıyla değişimi Şekil 9.1. deki grafiklerle gösterilmiştir. Şekil 9.1 a’da lineer regresyon sonuçları $Y=AX+C$ biçiminde bir doğru ile temsil edilmiştir. Denklem 3.15 ‘e göre $Y = (f_t / \sigma_N)^2$, $X=D$ ’ye karşı gelmektedir. Bu verilerden Boyut Etkisi Yasasının ifadesindeki B ve D_0 sabitleri Şekil 9.1 a’ dan bulunarak boyut etkisi ifadesi Şekil 9.1 b’de gösterilmiştir. Bu grafiklerde düşey eksen σ_N / Bf_t , yatay eksen olarak D/D_0 seçilerek boyut etkisinin geçiş bölgesi logaritmik ölçekle gösterilmeye çalışılmıştır. $B=21,82$ MPa, $D_0=42$ mm bulunmuştur.

Deney sonuçlarının incelenmesinde boyut etkisinin varlığını görmek olasıdır. Şekil 9.1 a’da lineer doğrunun belirli bir eğimli olması boyut etkisinin varlığını göstermektedir. Eğer boyut etkisi olmasaydı $A=0$ yani, doğrunun yatay olması gerekirdi.



a)



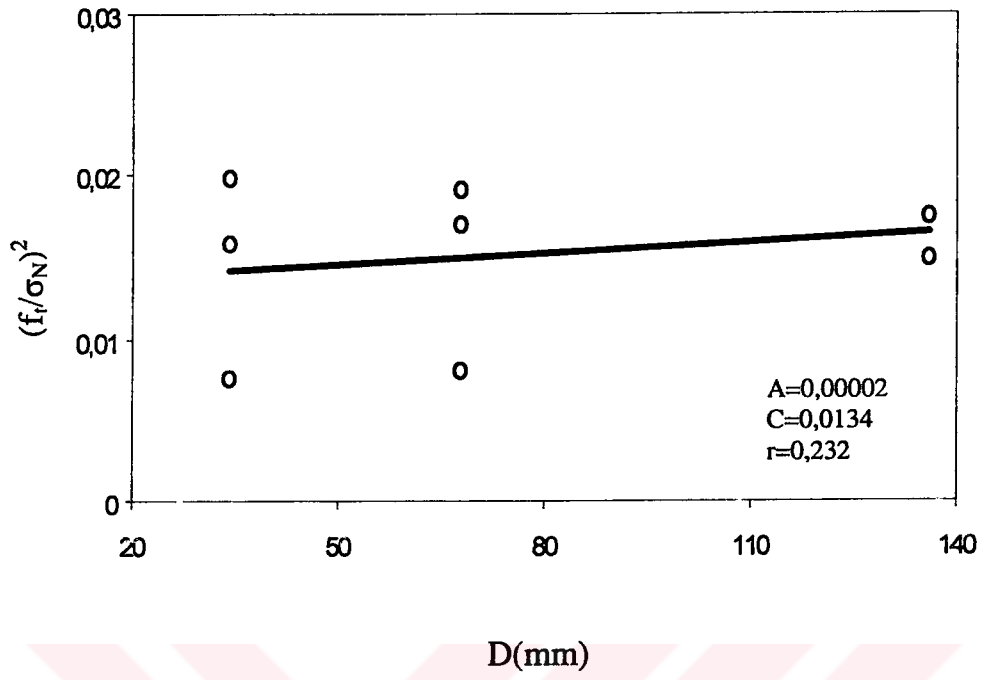
b)

Şekil 9.1. Normal betonun a) Doğrusal regresyon b) Doğrusal olmayan regresyon

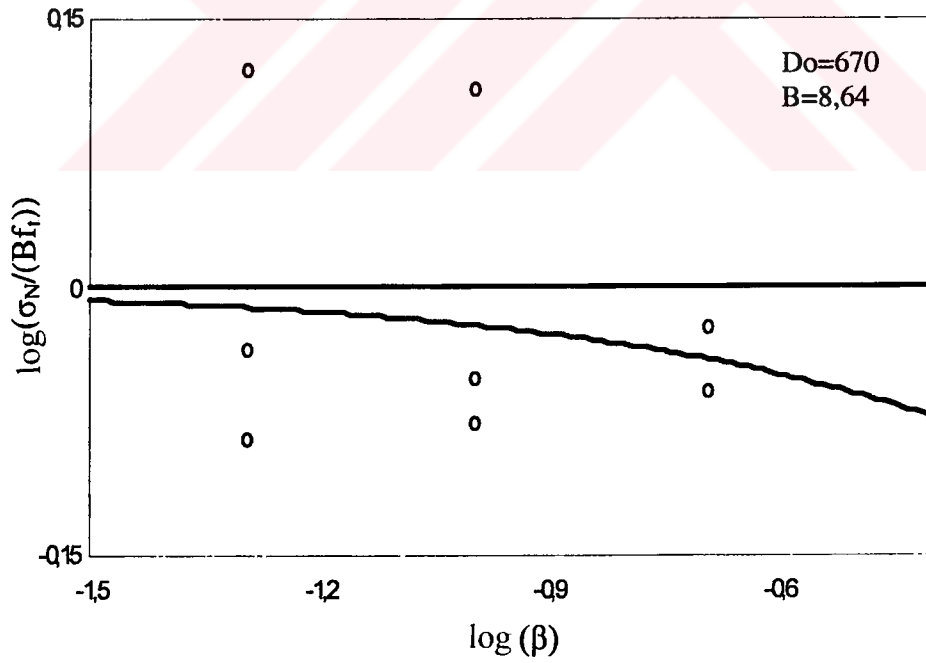
9.2.1.1. Mesnet genişliği değişken kerişler

Yinelenen Normal betonun deney sonrası oluşturulan çizelgelerden sonra, boyut etkisinin gösterimi olan Bazant'ın önerdiği Boyut Etkisi Yasasının deney sonuçlarıyla değişimi Şekil 9.2. deki grafiklerle gösterilmiştir. Şekil 9.2 a'da lineer regresyon sonuçları $Y=AX+C$ biçiminde bir doğru ile temsil edilmiştir.

Denklem (3.15)'e göre $Y = (f_t / \sigma_N)^2$, $X=D$ 'ye karşı gelmektedir. Bu verilerden Boyut Etkisi Yasasının ifadesindeki B ve D_0 sabitleri Şekil 9.2 a' dan bulunarak boyut etkisi ifadesi Şekil 9.2 b'de gösterilmiştir. Bu grafiklerde düşey eksen σ_N / Bf_t , yatay eksen olarak D/D_0 seçilerek boyut etkisinin geçiş bölgesi logaritmik ölçekle gösterilmeye çalışılmıştır. $B=8,64$ MPa, $D_0=670$ mm bulunmuştur.



a)



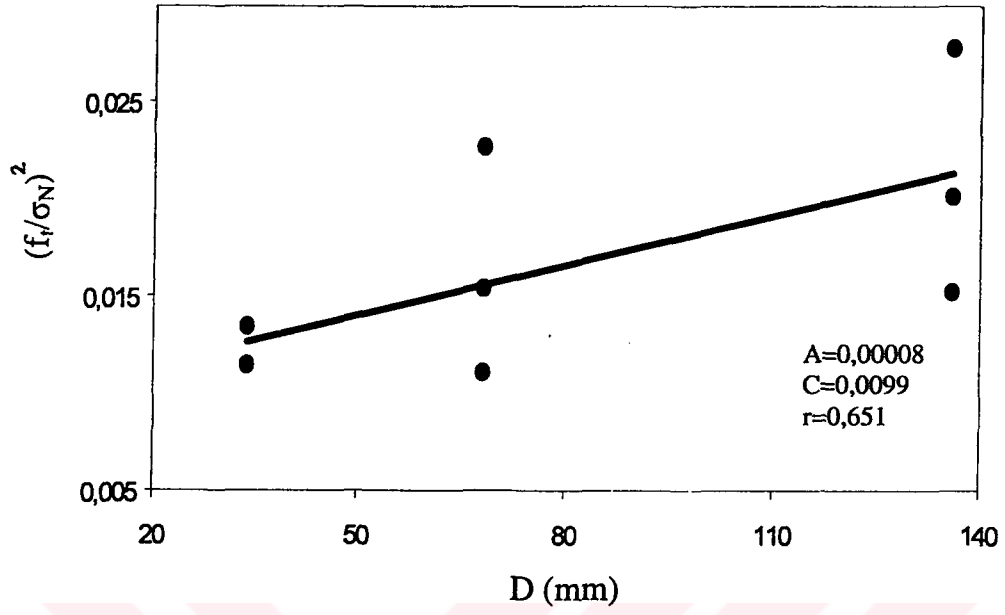
b)

Şekil 9.2. Yinelene normal betonun a) Doğrusal regresyon b) Doğrusal olmayan regresyon

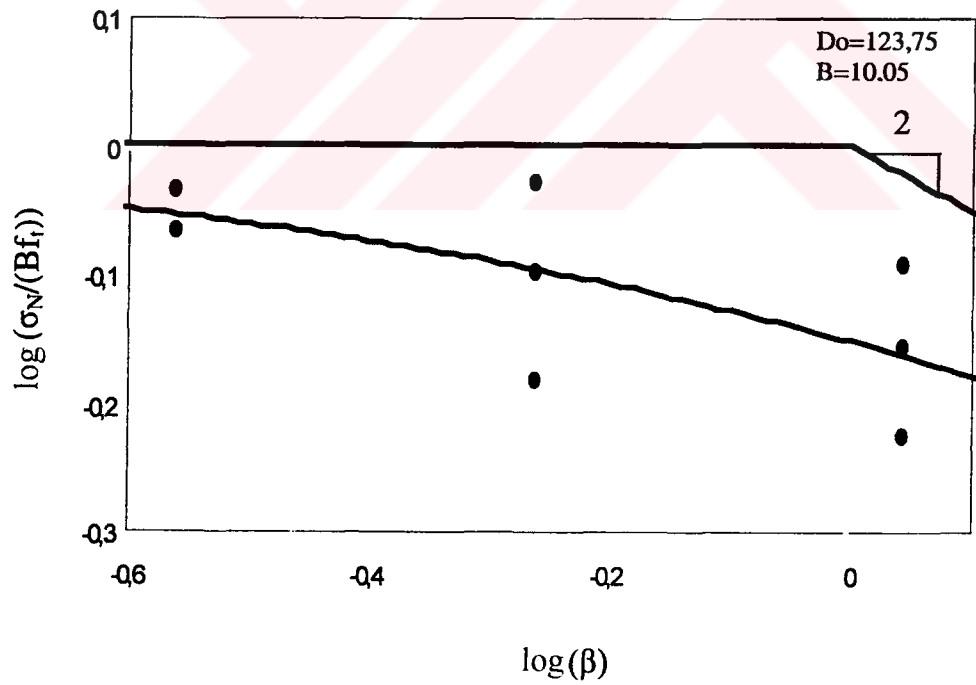
9.2.2. Yüksek dayanımlı betonun sonuçlarının değerlendirilmesi

Yüksek dayanımlı betonun deney sonrası oluşturulan çizelgelerden sonra, boyut etkisinin gösterimi olan Bazant'ın önerdiği Boyut Etkisi Yasasının deney sonuçlarıyla değişimi Şekil 9.3. deki grafiklerle gösterilmiştir. Bu grafiklerde düşey eksen σ_N / Bf_t , yatay eksen olarak D/D_0 seçilerek boyut etkisinin geçiş bölgesi logaritmik ölçekle gösterilmeye çalışılmıştır. $B=10,05$ MPa, $D_0=123,75$ mm bulunmuştur.





a)

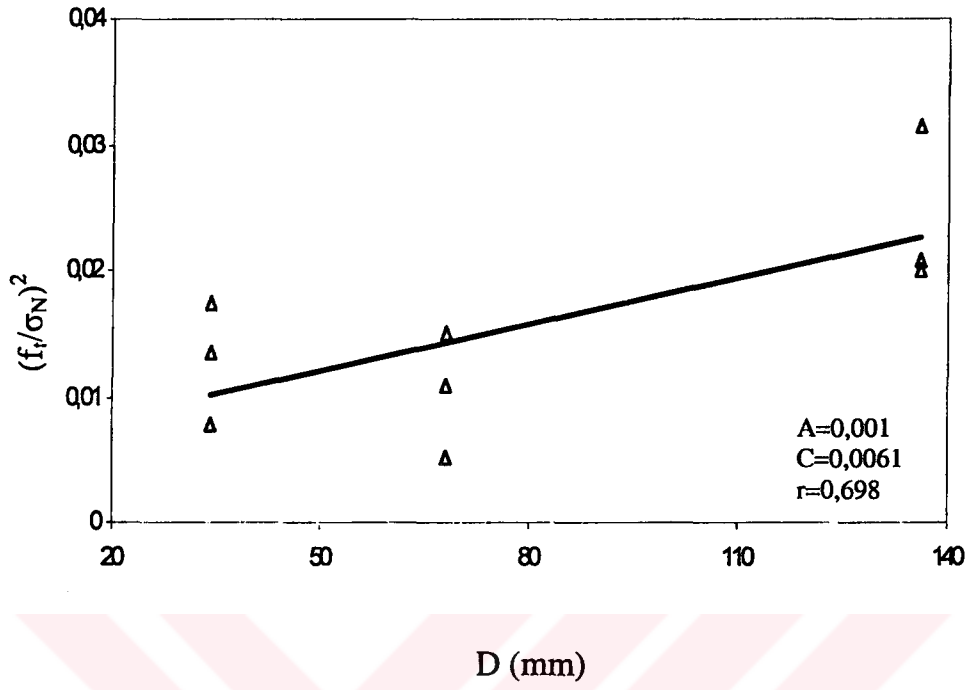


b)

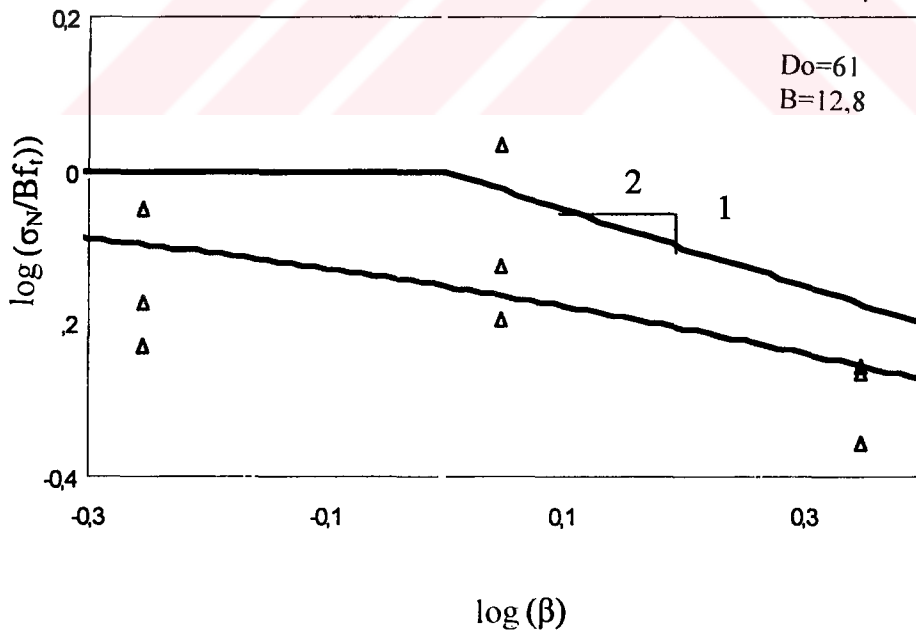
Şekil 9.3. Yüksek dayanımlı betonun a) Doğrusal regresyon b) Doğrusal olmayan regresyon

9.2.3. Hafif betonun deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Hafif betonun deney sonrası oluşturulan çizelgelerden sonra, boyut etkisinin gösterimi olan Bazant'ın önerdiği Boyut Etkisi Yasasının deney sonuçlarıyla değişimi Şekil 9.4. deki grafiklerle gösterilmiştir. Bu grafiklerde düşey eksen σ_N / Bf_b , yatay eksen olarak D/D_0 seçilerek boyut etkisinin geçiş bölgesi logaritmik ölçekle gösterilmeye çalışılmıştır. $B=12,80$ MPa, $D_0=61$ mm bulunmuştur.



a)



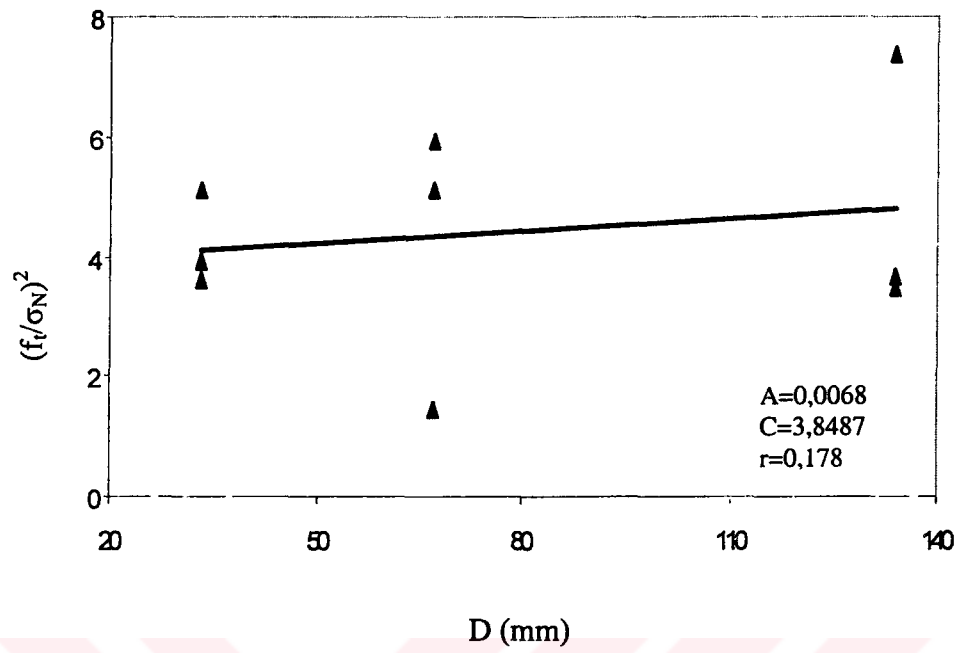
b)

Şekil 9.4. Hafif betonun a) Doğrusal regresyon b) Doğrusal olmayan regresyon

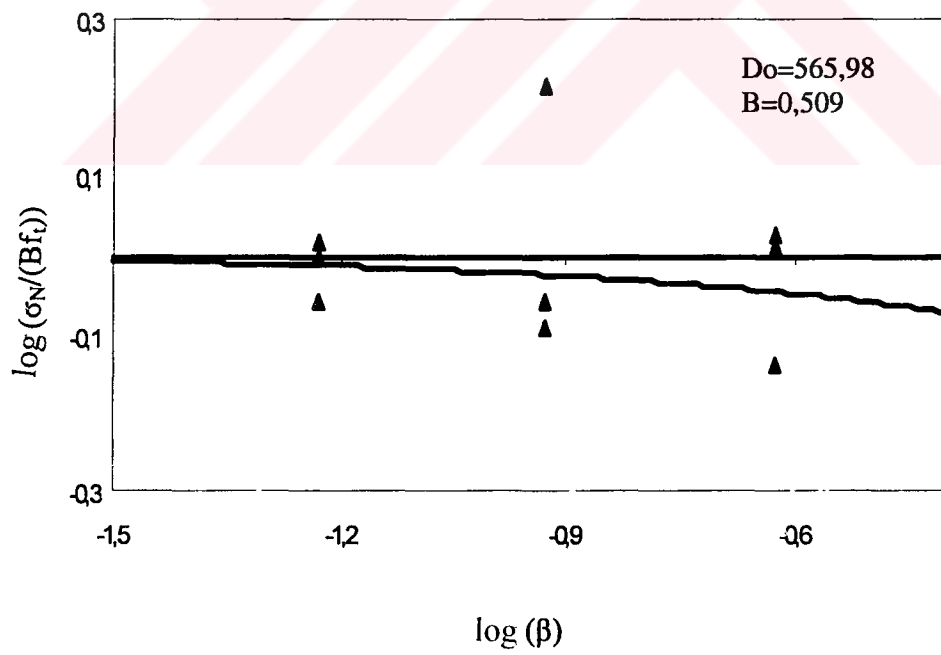
9.2.4. Çelik lifli betonun deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Çelik Lifli betonun deney sonrası oluşturulan çizelgelerden sonra, boyut etkisinin gösterimi olan Bazant'ın önerdiği Boyut Etkisi Yasasının deney sonuçlarıyla değişimi Şekil 9.5. deki grafiklerle gösterilmiştir. Bu grafiklerde düşey eksen σ_N / Bf_t , yatay eksen olarak D/D_0 seçilerek boyut etkisinin geçiş bölgesi logaritmik ölçekle gösterilmeye çalışılmıştır. $B=0,51$ MPa, $D_0=565,98$ mm bulunmuştur.

Normal betondan farklı olarak göçme ilk çatlak ile olmamış büyük numuneler de dahi plastik göçmüşlerdir. Elemanların betonarme kirişler gibi liflerin varlığı yüzünden iki parça olmayıp az da olsa yük taşır durumda göçmüşlerdir. Kirişlerde çatlak daima çatlak tepesinden başlayıp düşey olarak gelişmiştir. Bütün kirişlerde çatlağın düşey olması nedeni ile geometrik benzerlik göçme yüzeylerinde de görülmüş olup başka bir modda göçme söz konusu olmadığından sonuçlar boyut etkisi analizinde kullanılabilir



a)



b)

Şekil 9.5. Çelik lifli betonun a) Doğrusal regresyon b) Doğrusal olmayan regresyon

9.3. Regresyon Hesapları

Boyut etkisi analizi için 3 farklı yöntem kullanılmıştır.

- a) Yaddoğrusal analiz
- b) Doğrusal I analiz
- c) Doğrusal II analiz

Bu analizlerin ilki olan Yaddoğrusal analizde, $X=\ln D$, $Y=(f_t/\sigma_{NU})^2$ alınmıştır. Doğrusal I analizde, $X=D$, $Y=1/\sigma_{NU}^2$ alınmıştır. Doğrusal II analizde ise, $X=1/D$, $Y=1/\sigma_{NU}^2 D$ alınmıştır.

Üç nokta yüklemesi altında çentikli kirişlerinde eğilme altında Regresyon sonuçları aşağıda verilmiştir.

9.3.1. Normal betonda karşılaştırmalı boyut etkisi analizi

Çizelge 9.16. Normal betonun regresyon hesapları

Değişke n	Birim	Numune İsmi								
		NS1	NS2	NS3	NS4	NS5	NS6	NS7	NS8	NS9
D	mm	136	136	136	68	68	68	34	34	34
σ_{NU}	MPa	13,73	14,84	13,36	20,47	20,03	16,42	19,45	19,58	32,06
X	$\ln D$	4,91	4,91	4,91	4,22	4,22	4,22	3,52	3,52	3,52
f_t	MPa	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67
Y	$\ln(f_t/\sigma_{NU})^2$	-4,21	-4,37	-4,15	-5,58	-4,96	-4,57	-4,90	-4,92	-5,91
$10^3 X$	D, m	136	136	136	68	68	68	34	34	34
$10^3 Y$	$1/\sigma_{NU}^2$, MPa ⁻²	5,30	4,54	5,60	2,39	2,49	3,71	2,64	2,61	0,97
X'	$1/D, m^{-1}$	7,35	7,35	7,35	14,71	14,71	14,71	29,41	29,41	29,41
Y'	$1/\sigma_{NU}^2 D$ (MPa $\sqrt{m}$) ⁻²	0,039	0,033	0,041	0,035	0,037	0,055	0,078	0,077	0,029

9.3.2. Yinelenen normal betonda karşılaştırmalı boyut etkisi analizi

Çizelge 9.17. Yinelenen normal betonun regresyon hesapları

Değişken	Birim	Numune İsmi								
		NS01	NS02	NS03	NS04	NS05	NS96	NS07	NS08	NS09
D	Mm	136	136	136	68	68	68	34	34	34
σ_{NU}	MPa	12,56	12,56	13,65	12,06	18,57	12,79	11,81	13,26	19,03
X	$\ln D$	4,91	4,91	4,91	4,22	4,22	4,22	3,52	3,52	3,52
Y	$\ln(f_t/\sigma_{NU})^2$	-4,05	-4,05	-4,21	-3,96	-4,82	-4,08	-3,92	-4,15	-4,87
f_t	MPa	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66
$10^3 X$	D, m	136	136	136	68	68	68	34	34	34
$10^3 Y$	$1/\sigma_{NU}^2$, MPa ⁻²	6,34	6,34	5,37	6,88	2,90	6,11	7,17	5,69	2,76
X'	$1/D, m^{-1}$	7,35	7,35	7,35	14,71	14,71	14,71	29,41	29,41	29,41
Y'	$1/\sigma_{NU}^2 D$ (MPa $\sqrt{m}$) ⁻²	0,047	0,047	0,039	0,101	0,043	0,090	0,211	0,167	0,081

9.3.3. Yüksek dayanımlı betonda karşılaştırmalı boyut etkisi analizi

Çizelge 9.18. Yüksek dayanımlı betonun regresyon hesapları

Değişken	Birim	Numune İsmi								
		HS1	HS2	HS3	HS4	HS5	HS6	HS7	HS8	HS9
D	mm	136	136	136	68	68	68	34	34	34
σ_{NU}	MPa	12,23	16,57	14,40	19,30	13,52	16,42	19,04	19,04	17,62
X	$\ln D$	4,91	4,91	4,91	4,22	4,22	4,22	3,52	3,52	3,52
f_t	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04
Y	$\ln(f_t/\sigma_{NU})^2$	-3,58	-4,19	-3,91	-4,49	-3,78	-4,17	-4,47	-4,47	-4,33
$10^3 X$	D, m	136	136	136	68	68	68	34	34	34
$10^3 Y$	$1/\sigma_{NU}^2$ MPa ⁻²	6,69	3,64	4,82	2,68	5,49	3,71	2,76	2,76	3,26
X'	$1/D, m^{-1}$	7,35	7,35	7,35	14,71	14,71	14,71	29,41	29,41	29,41
Y'	$1/\sigma_{NU}^2 D$ (MPa $\sqrt{m}$) ⁻²	0,049	0,027	0,035	0,039	0,080	0,055	0,081	0,081	0,095

9.3.4. Hafif betonda karşılaştırmalı boyut etkisi analizi

Çizelge 9.19. Hafif betonun regresyon hesapları

Değişken	Birim	Numune İsmi								
		LW1	LW2	LW3	LW4	LW5	LW6	Lw7	Lw8	Lw9
D	mm	136	136	136	68	68	68	34	34	34
σ_{NU}	MPa	7,19	7,03	5,73	9,72	14,06	8,28	7,68	11,58	8,69
X	$\ln D$	4,91	4,91	4,91	4,22	4,22	4,22	3,52	3,52	3,52
f_t	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Y	$\ln(f_t/\sigma_{NU})^2$	-3,92	-3,87	-3,46	-4,52	-5,26	-4,20	-4,05	-4,87	-4,30
$10^3 X$	D, m	136	136	136	68	68	68	34	34	34
$10^3 Y$	$1/\sigma_{NU}^2$, MPa ⁻²	19,34	20,23	30,46	10,58	890	14,80	16,95	7,46	13,24
X'	$1/D, m^{-1}$	7,35	7,35	7,35	14,71	14,71	14,71	29,41	29,41	29,41
Y'	$1/\sigma_{NU}^2 D$ (MPa $\sqrt{m}$) ⁻²	0,142	0,149	0,224	0,156	0,07	0,215	0,499	0,219	0,389

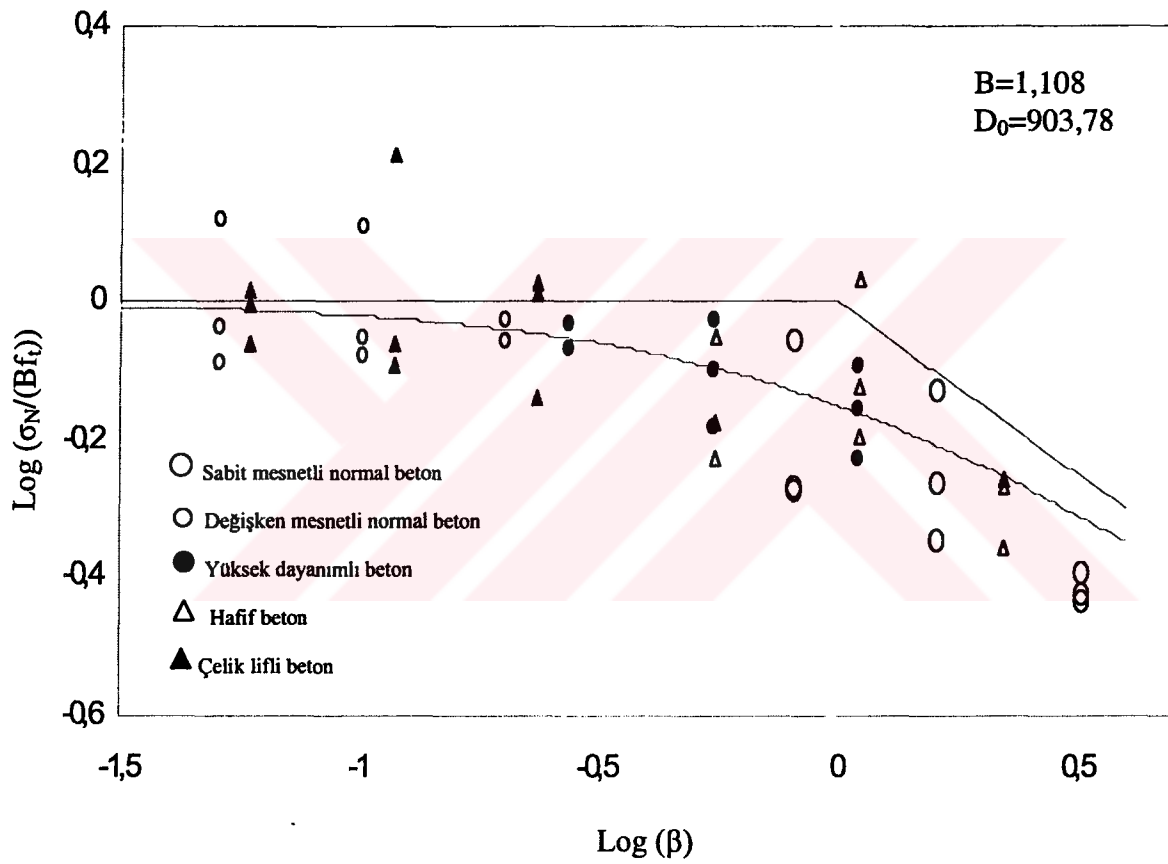
9.3.5. Çelik lifli betonda karşılaştırmalı boyut etkisi analizi

Çizelge 9.20. Çelik lifli betonun regresyon hesapları

Değişken	Birim	Numune İsmi								
		SF1	SF2	SF3	SF4	SF5	SF6	SF7	SF8	SF9
D	mm	134	134	134	68	68	68	33,5	33,5	33,5
σ_{NU}	MPa	0,938	0,966	0,660	0,738	0,792	1,493	0,795	0,907	0,947
X	$\ln D$	4,90	4,90	4,90	4,22	4,22	4,22	3,51	3,51	3,51
f_t	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79
Y	$\ln(f_t/\sigma_{NU})^2$	1,29	1,24	2,00	1,77	1,63	0,36	1,62	1,36	1,28
$10^3 X$	D, m	136	136	136	68	68	68	34	34	34
$10^3 Y$	$1/\sigma_{NU}^2$, MPa ⁻²	1137	1072	2296	1836	1594	449	1582	1216	1115
X'	$1/D, m^{-1}$	7,46	7,46	7,46	14,71	14,71	14,71	29,85	29,85	29,85
Y'	$1/\sigma_{NU}^2 D$ (MPa $\sqrt{m}$) ⁻²	8,482	7,997	17,13	27,00	23,44	6,597	46,30	35,75	32,80

9.4. Bütün Sonuçların Birlikte Değerlendirilmesi

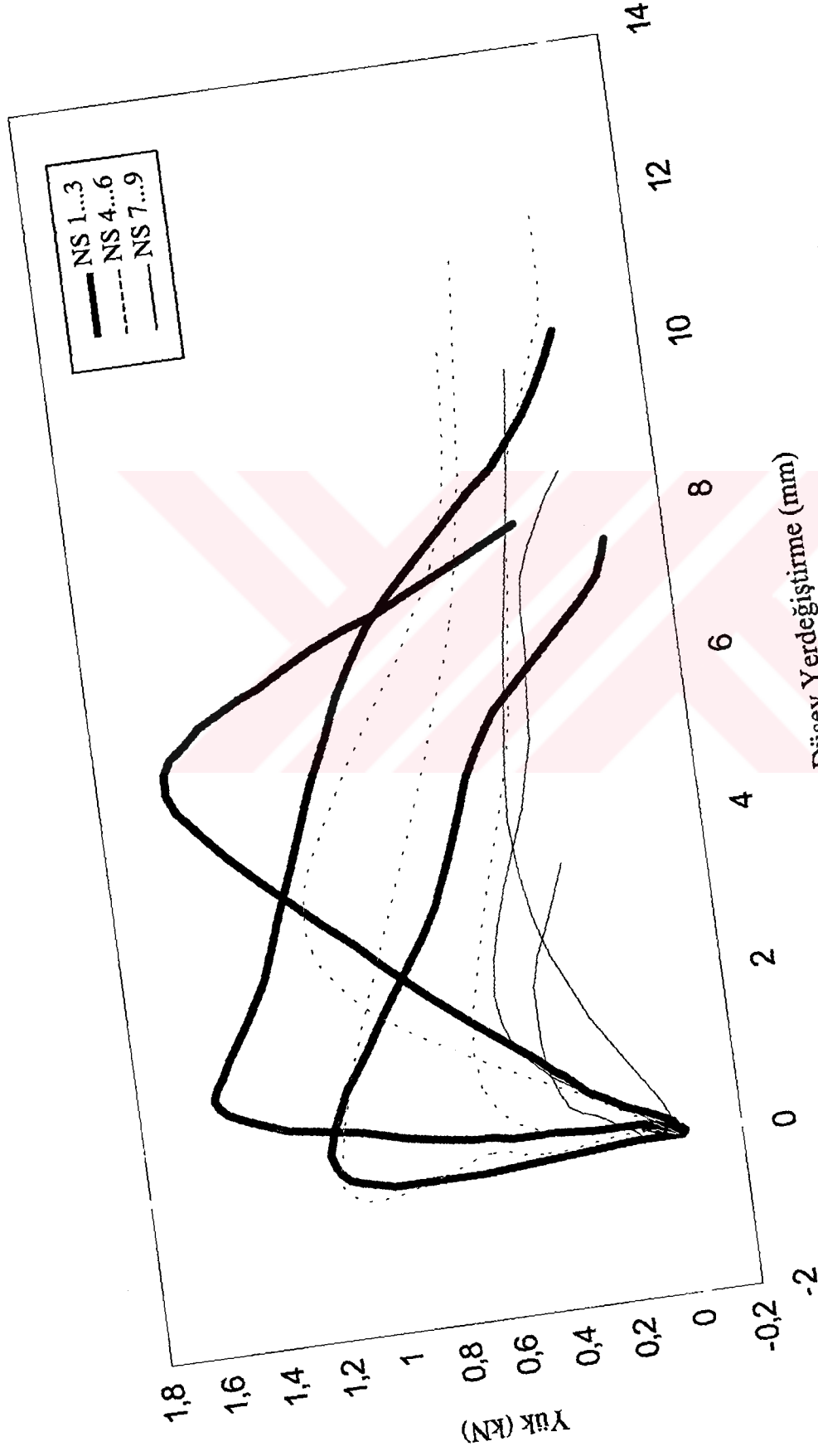
Çentikli beton kirişlerin eğilme altındaki deney sonuçları toplu olarak Şekil 9.6' da analiz edilmiştir.



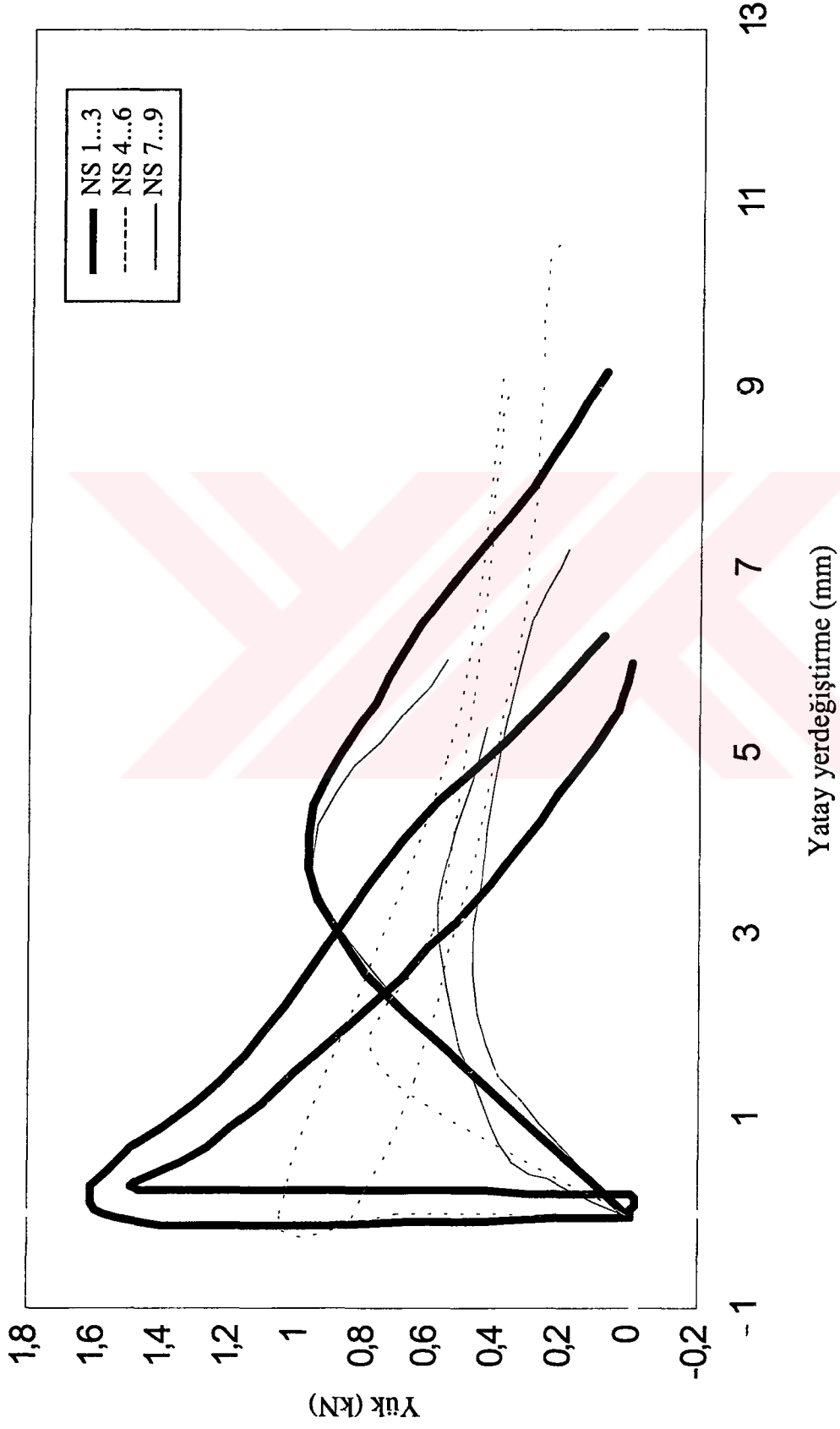
Şekil 9.6. Bütün kirişlerin deney sonuçları

9.5. Eksenel Yerdeşiftirmeler

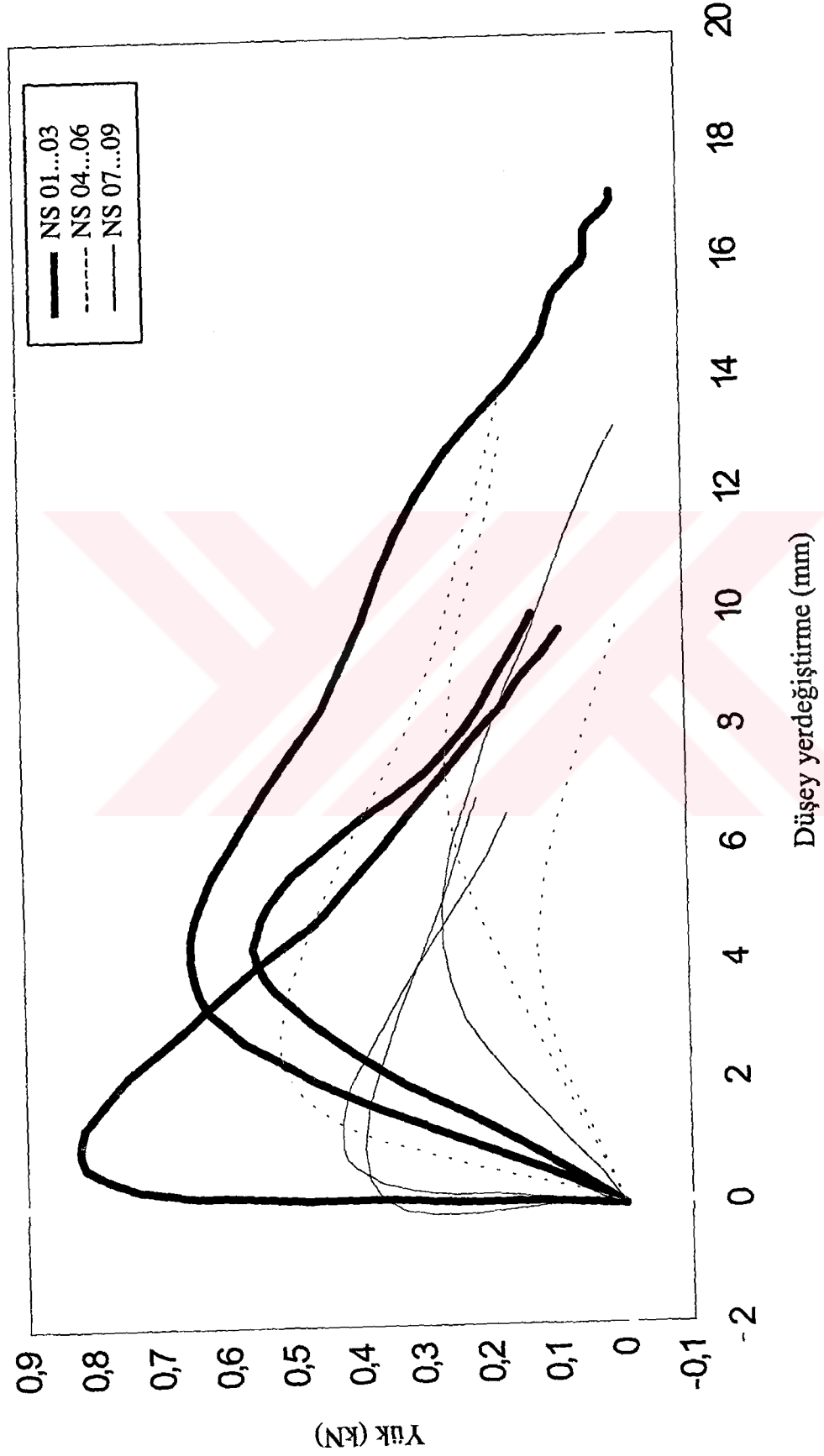
Kiriřlerin ortasında LVDT okumaları ile dűřey deplasman ve çentik ağızının tepesinde yatay deplasman numune űzerinde alınmıřtır ve sűrekli olarak bilgisayara kaydedilmiřtir. Bu veriler yardımıyla yűk-dűřey yerdeğıřtirme ve yűk-yatay yerdeğıřtirme diyagramlar çizilmiřtir. nce her numune için ayrı diyagramlar çizilmiřtir ve sonra her grup numune için diyagramlar çakıřtırılmıřtır. Diyagramlardan gűrűldűėő gibi yűk-yatay yerdeğıřtirme diyagramların bűyűk bir kısım anlamsız ıktı. Yűk-dűřey yerdeğıřtirme diyagramlarda da asnlařılmayan řekiller gűrűlműřtir. Bunu önlemek için yűkleme esnasında krikonun bořalmaması önem verilmelidir. Yűkleme sırasında krikonun bořalması ile artan deformasyon bir anda azalmıř olur ve grafiklerde istenmeyen řekiller ortaya çıkıyor. Grafiklerden de gűrűleceėő gibi kiriřlerin yumuřayan bűlgesi numuneler kűűldűke plastik davranıř gűstermiřlerdir. Dűřey ve yatay yerdeğıřtirmeler ekte verilmiřtir.



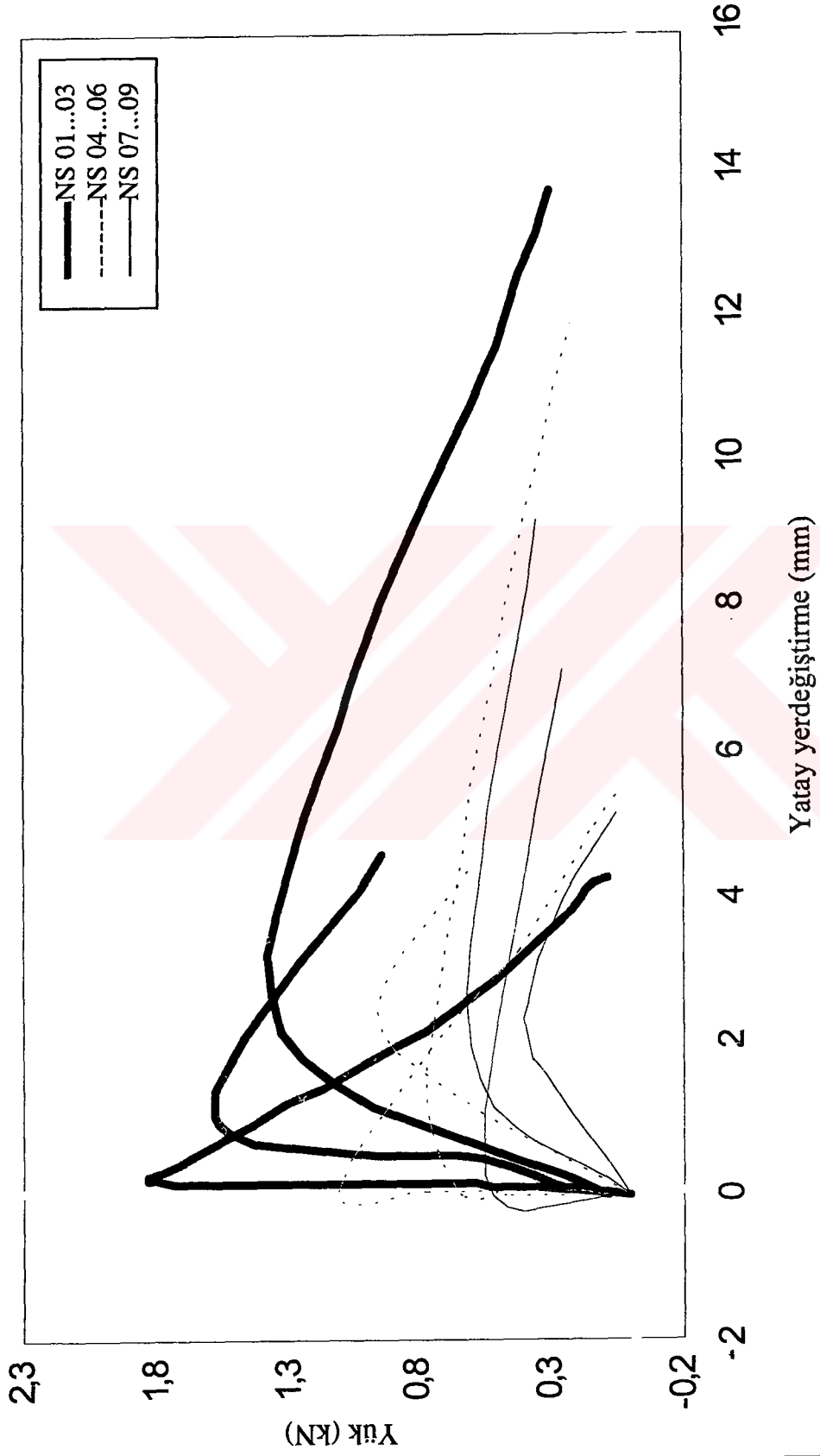
Şekil 9.7. Normal betonun yük-yatay yerdeğiştirme diyagramı



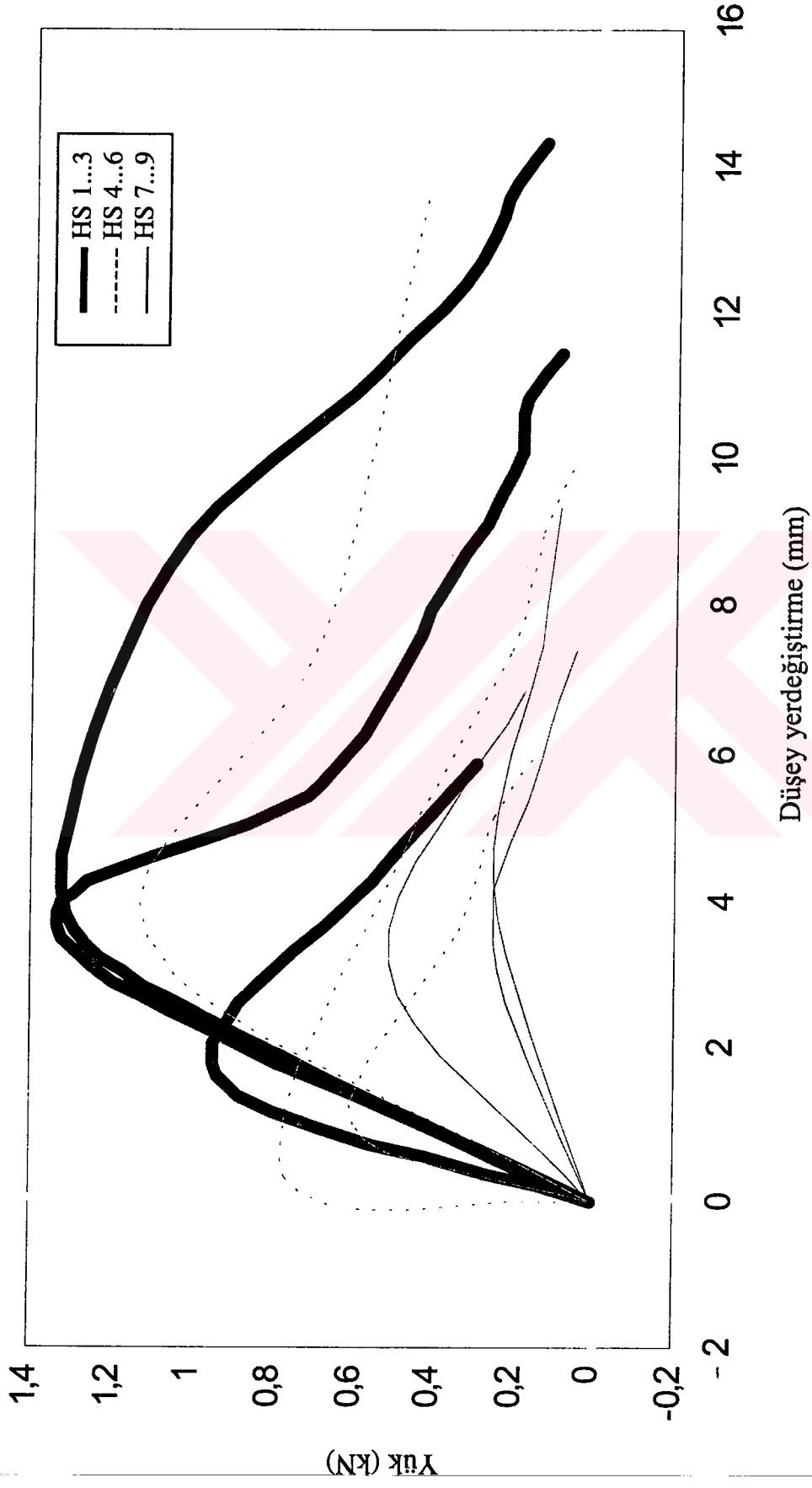
Şekil 9.8. Normal betonun yük yatay yerdeğiştirme



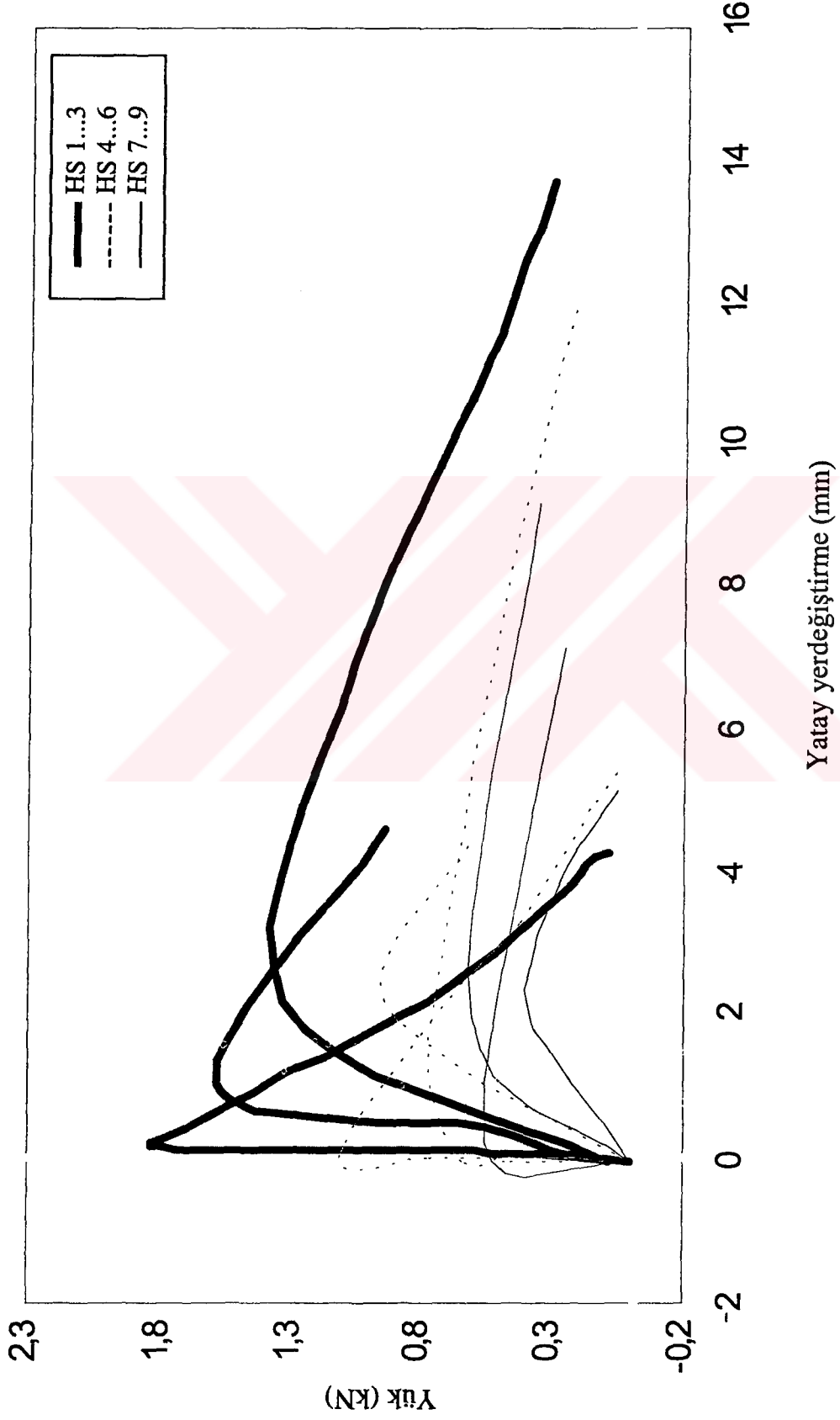
Şekil 9.9. Yinelenen normal betonun yük-düşey yerdeğiştirme diyagramı



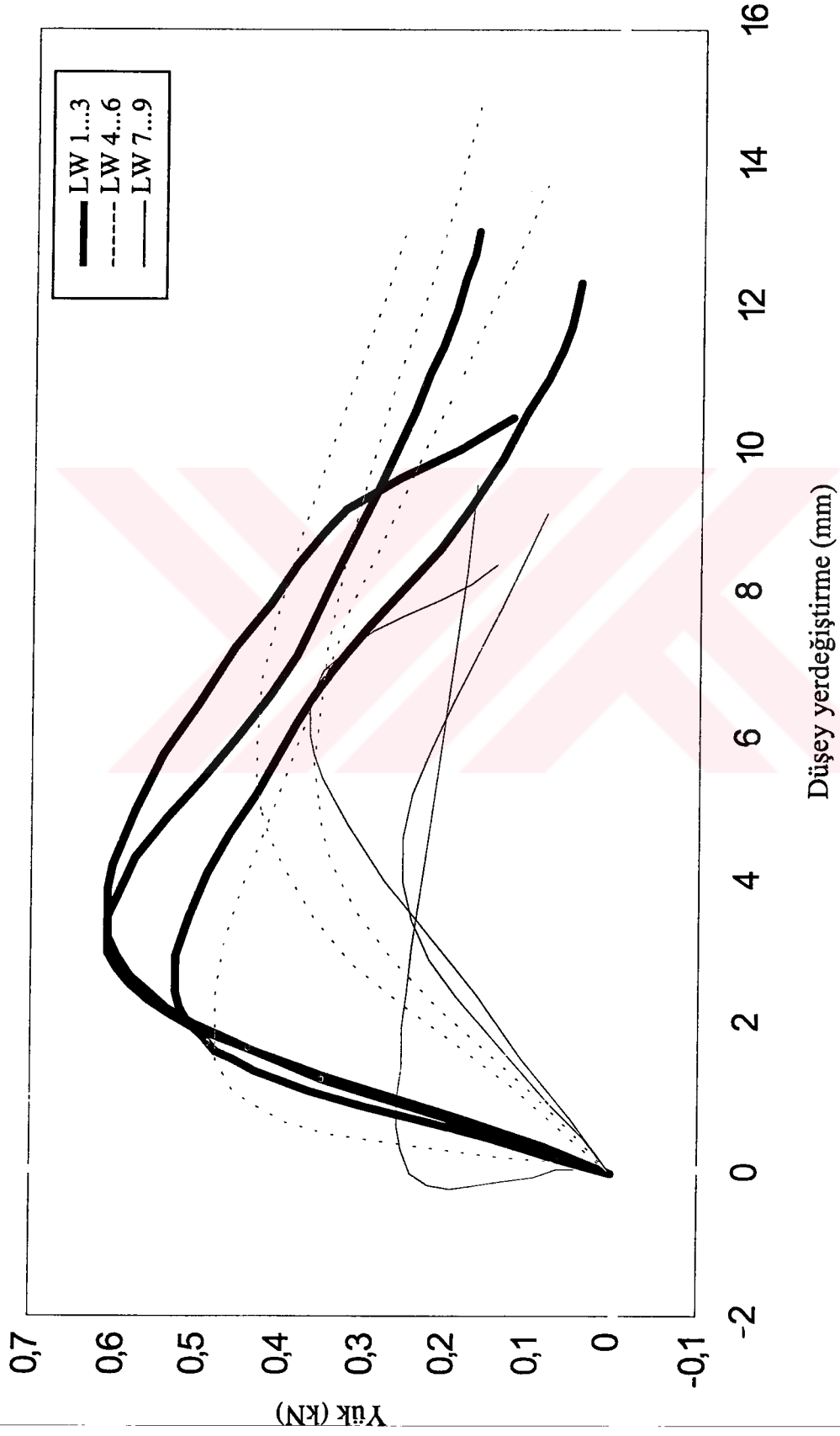
Şekil 9.10. Yinelenen normal betonun yük-yatay yerdeğiştirme



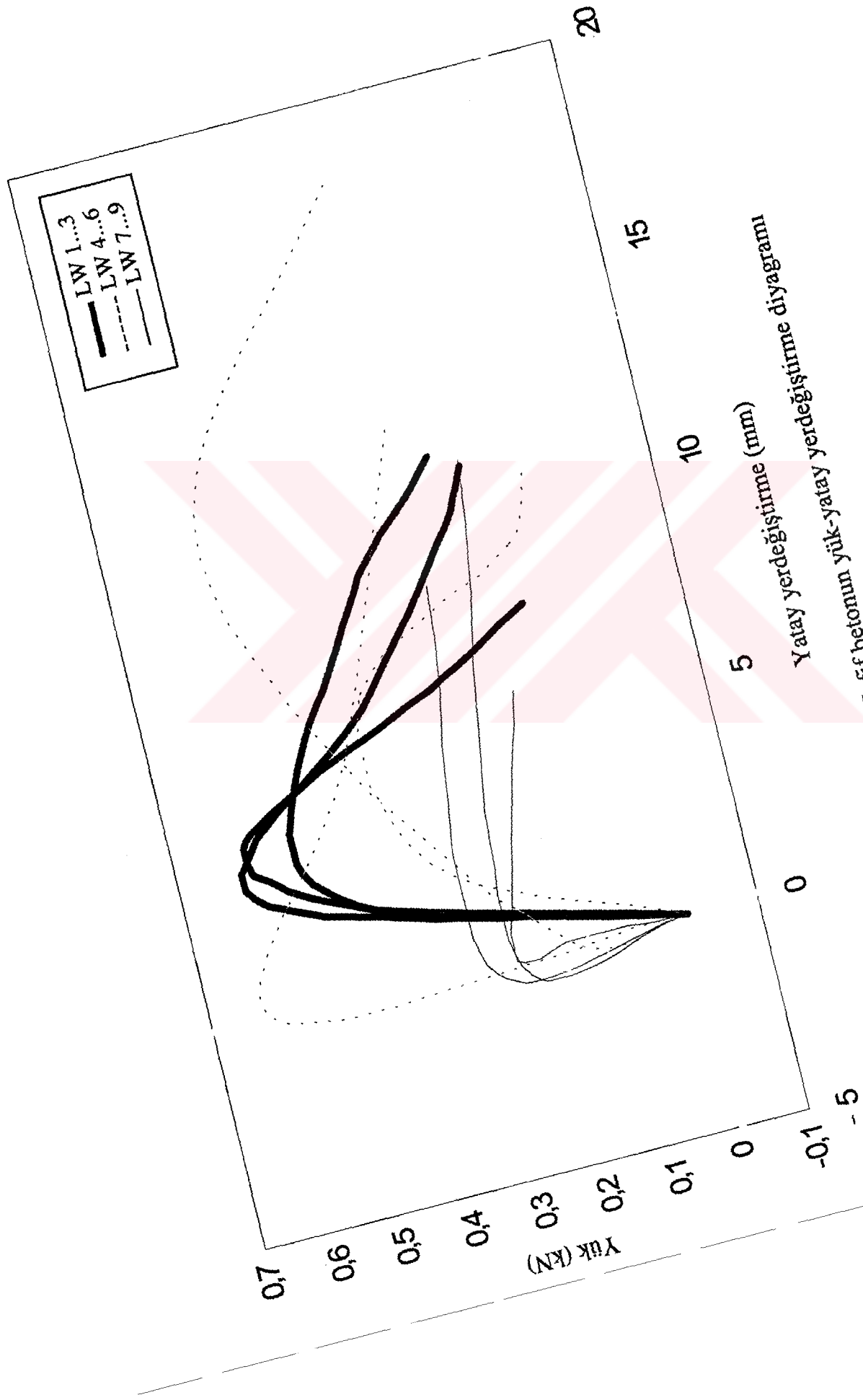
Şekil 9.1.1. Yüksek dayanımlı betonun yük-düşey yerdeğiştirme diyagramı



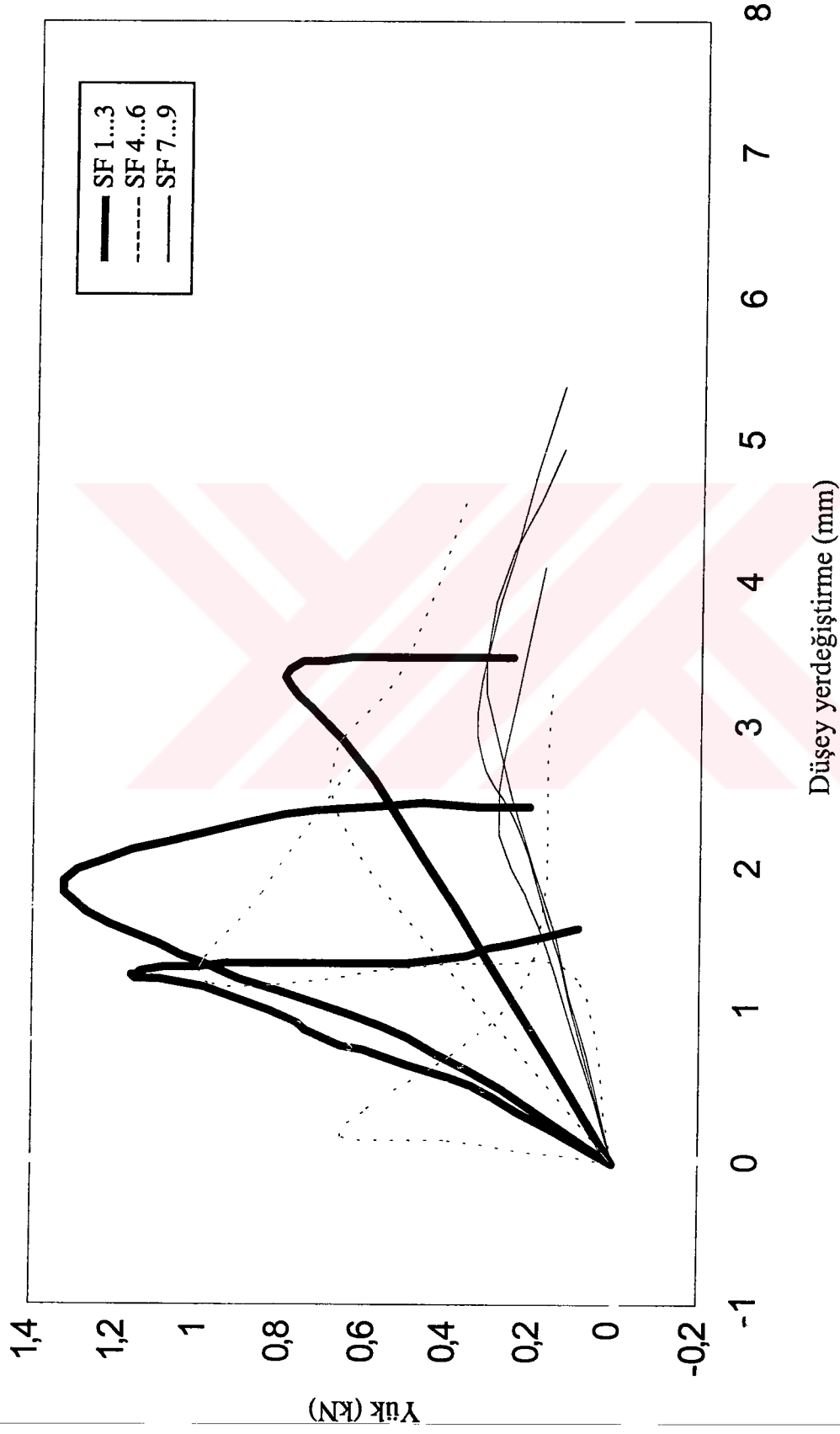
Şekil 9.12. Yüksek dayanımlı betonun yük-yatay yerdeğiştirme diyagramı



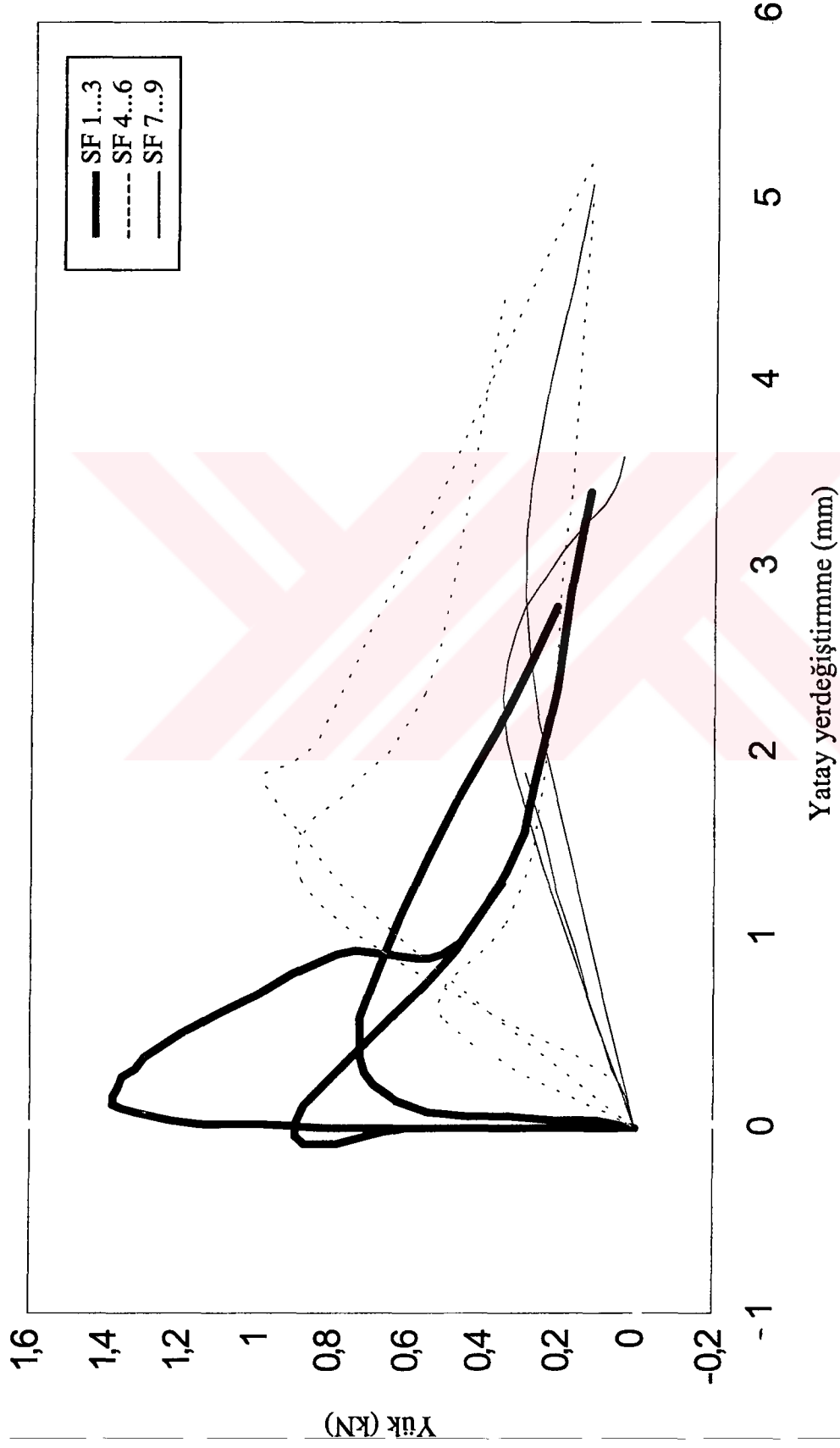
Şekil 9.13. Hafif betonun yük-düşey yerdeğiştirme diyagramı



Şekil 9.14. Hafif betonun yük-yatay yerdeğiştirme diyagramı



Şekil 9.15. Çelik lifli betonun yük-düşey yerdeğiştirme diyagramı



Şekil 9.16. Çelik lifli betonun yük-yatay yerdeğiştirme diyagramı

9.5. Kırılma Mekanizmaları

Deneylerdeki kare kesitli değişken boyutlu çentik içeren beton kirişlerin üç nokta yüklemesi altında ilk çatlakların oluşması en büyük yük değeri civarında olmuştur.

Şekil 9.17.'de Normal beton kirişlerinin kırılma sonrası resimleri verilmiştir.

Şekil 9.18.'de Yinelene normal beton kirişlerinin kırılma sonrası resimleri verilmiştir.

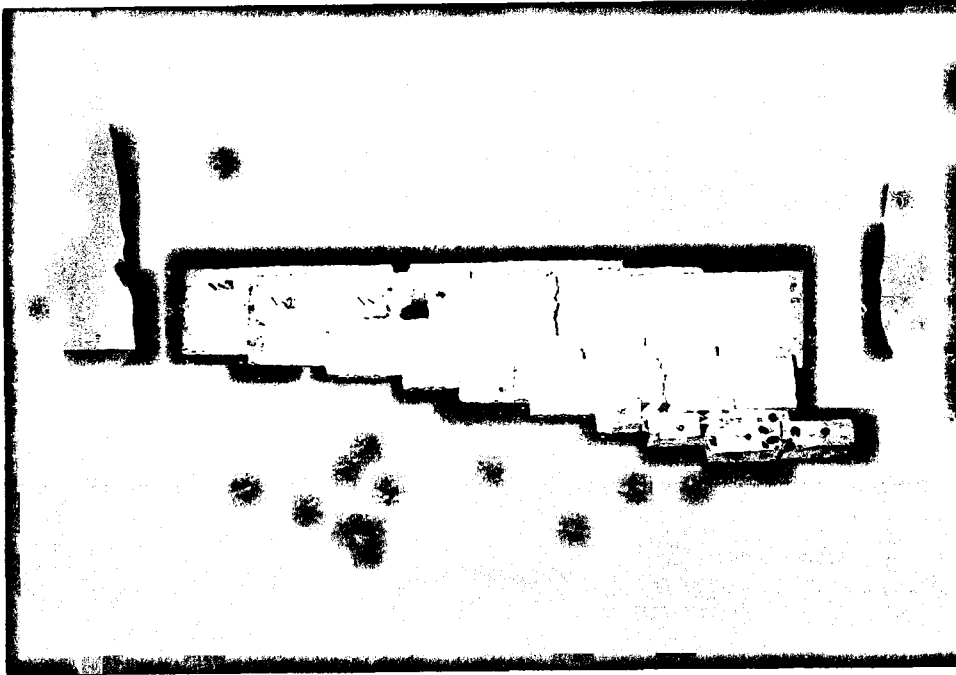
Şekil 9.19.'da Yüksek dayanımlı beton kirişlerinin kırılma sonrası resimleri verilmiştir.

Şekil 9.20.'de Hafif beton kirişlerinin kırılma sonrası resimleri verilmiştir.

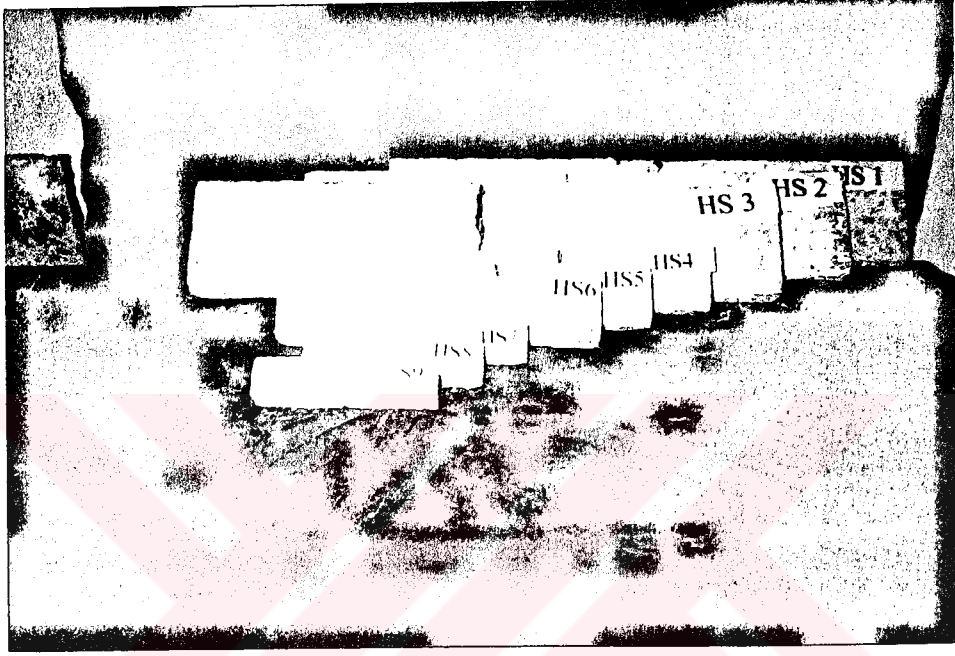
Şekil 9.21.'de Çelik Lifli beton kirişlerinin kırılma sonrası resimleri verilmiştir.



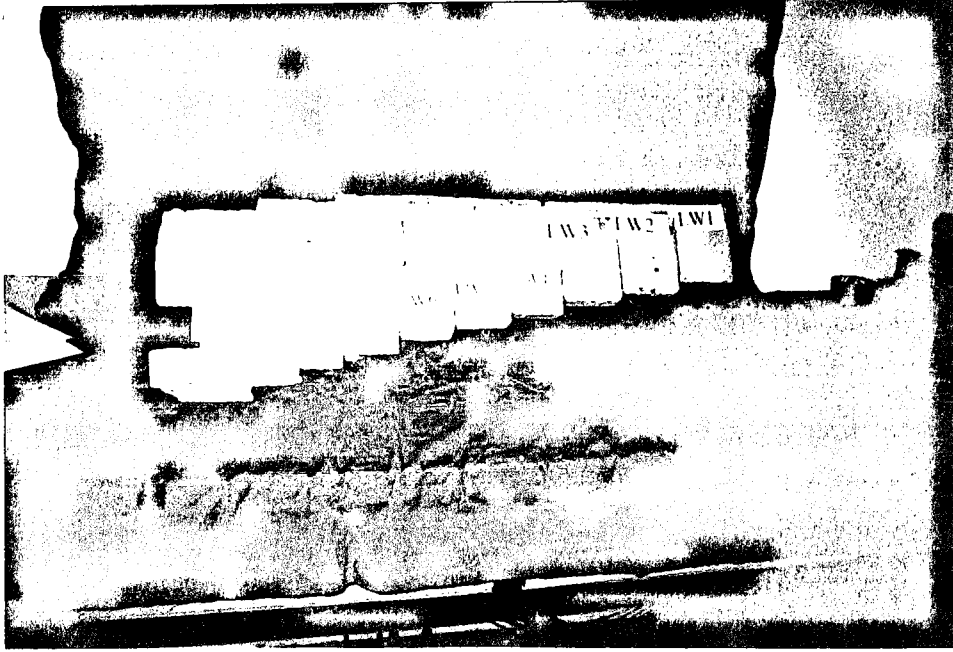
Şekil 9.17. Normal beton kirişlerinin kırılma sonrası resmi



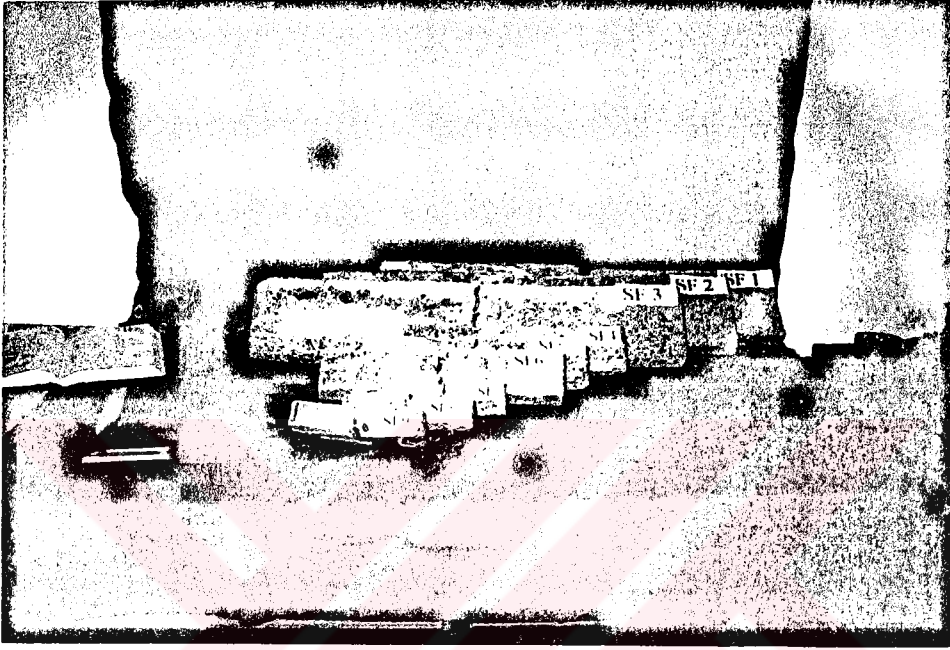
Şekil 9.18. Yinelenen normal beton kirişlerinin kırılma sonrası resmi



Şekil 9.19. Yüksek dayanımlı beton kirişlerinin kırılma sonrası resmi



Şekil 9.20. Hafif beton kirişlerin kırılma sonrası resmi



Şekil 9.21. Çelik lifli beton kirişlerinin kırılma sonrası resmi

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Toplam 45 adet üç değişik kesit ve 5 farklı beton kirişlerin üç nokta yüklemesi altında göçme yükleri ile yerdeğiştirmeler sonuçlarından aşağıdakiler çıkarılabilir.

1. Deney sonuçlarından beton kirişlerin göçme yüklerinde boyut etkisinin varlığı görölmüştür.
 2. Deney sonuçlarındaki dağılıma rağmen Bazant'ın önerdiği yaklaşık boyut etkisi formülü ile deney sonuçları temsil edilebilir.
 3. Deney numunelerinde, büyük kirişler büyük kırılma enerjisi depolayarak gevrek (elastik), küçük kirişler ise daha az kırılma enerjisi depolayarak sünek kırılma (plastik) göstermişlerdir.
 4. Beklendiğı gibi çelik lifli beton kirişler kırılmada sünek davranışı göstermişler diğer taraftan yüksek dayanımlı beton kirişler kırılmada gevrek davranışı göstermişler.
 5. Yatay yerdeğiştirme okumalardaki büyük değışiklik tarafsız eksenin çentik tepesine yakınlığı sonucuna varılmıştır.
-

10.1. Gelecek Araştırmalara Öneriler

Deneysel olarak yapılmış Çentikli Kirişlerde Boyut Etkisi çalışma sırasında bazı önemli hususlara dikkat edilmesi gerekir.

1. Elemanın geometrisi önemlidir. Eldeki formüller aynı agrega boyutuna sahip aynı beton karışımından elde edilen numuneler için geçerlidir.
 2. Kalıpları sökülürken kirişler kırılmaması için dikkat edilmesi gerekir, özellikle düşük mukavemetli betonlarda.
 3. Çelik lifli betonda kaba agreganın fazlalığından çelik liflerinin yerleştirilmelerine engel olmuş ve betonda fazla boşluk meydana gelmiştir. Bundan dolayı kaba agrega miktarını azaltmak yerine ince agrega miktarını arttırılmalıdır.
 4. Aynı boyuttaki kirişlerde göçme yüklerinde büyük farklılıklar görülmüştür. Bu farklılıklar engellemek için beton sıkıştırılmasına çok dikkat etmek gerekir.
 5. Kiriş çentikleri açarken büyük hassasiyet gösterilmelidir, aynı boyuttaki kirişlerde çentik uzunluğu aynı olmalıdır.
 6. Diyagramlardan görüldüğü gibi yük-yatay yerdeğiştirme diyagramlarının büyük bir kısmını yorumlamak güçtür. Çentik tepesinde numune üzerinde okunan yatay yerdeğiştirmelerdeki büyük değişikliğin bir nedeni tarafsız eksene yakınlık olabilir. Çatlak ağzında alınacak yatay okuma değerleri daha sağlıklı sonuçlar verebilir. Yük-düşey yerdeğiştirme diyagramlarda da anlaşılmayan şekiller görülmüştür. Bunu önlemek için yükleme
-

esnasında krikonun boşalmaması önem verilmelidir. Yükleme sırasında krikonun boşalması ile artan deformasyon bir anda azalmış olur ve grafiklerde istenmeyen şekiller ortaya çıkıyor.



KAYNAKLAR

1. TS 500, "Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları", **Türk Standartları Enstitüsü**, 2000, Ankara.
 2. Bazant, Z.P., Kwon, Y.W., "Failure of Slender and Stocky Reinforced Concrete Columns: Tests of Size Effect", **Materials and Structures, RILEM**, 1994, 27, 79-90.
 3. Şener, S., Barr, B. I. G. and Abusiaf, H. F. "Size Effect Tests in Unreinforced Concrete Columns", **Magazine of Concrete Research**, Feb.1999, Vol. 51, No.1, pp.3-11.
 4. Barr, B., I. G., Abusiaf, H., F., Şener, S. "Size Effect and Fracture Energy Studies Using Compact Compression Specimens", **RILEM & Materials and Structures**, Vol. 31, January-February 1998, pp. 36-41.
 5. Bazant, Z., P., and Kim, J.K., "Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Beams" **ACI Journal**, Proceedings, Vol. 81, No. 5, Sept-Oct. 1984, pp. 456-468, and Discussion, Vol. 82, No. 4, July-Aug. 1985, pp. 579-583.
 6. Şener, S., Belgin, Ç., Aydın, I., Selçuk, E., "Burulma Altında Boyuna Donatılı ve Donatısız Betonarme Kirişlerde Boyut Etkisi", **I. Sistem Müh. ve Savunma Uygulamaları Sempozyumu**, 1995 Ankara, s. 56-64.
 7. Bazant, Z.,P., Şener, S., "Size Effect in Torsional Failure of Concrete Beam", **Journal of Structural Engineering, ASCE**, Vol. 113, No.10, 1987, pp. 2125-2136.
 8. Bazant, Z. P., Şener, S., and Prat, P. "Size Effect Tests of Torsional Failure of Plain and Reinforced Concrete Beams", **RILEM & Materials and Structures**, Vol. 21, 1988, pp. 425-430.
 9. Bazant, Z. P. and Şener, S. "Size Effect in Pullout Tests" , **ACI Materials Journal**, Vol. 85, No. 5, Sept.-Oct. 1998, pp. 347-351.
-

10. Şener, S., “Beton Küplerde Demir Çubukların Çekip Çıkarılma yüklerinde Boyut Etkisi”, **V. Ulusal Mekanik Kongresi**, Bursa, Eylül 1987, TUMTMK 1992, s. 866-867.
 11. Bazant, Z.P., Kazemi, M.T., Hasegawa, T., and Mazars, J., “Size Effect in Brazilian Split-Cylinder Tests; Measurements and Fracture Analysis”, **ACI Materials Journal**, Vol. 88, May-June 1991, pp. 325-332.
 12. Bazant, Z. P., and Scheil, W. F., “Fatigue Fracture of High-Strength Concrete and Size Effect”, **ACI Materials Journal**, Vol. 90. No.5 Sept-Oct. 1992, pp. 472-478.
 13. Şener, S., “Betonda Dağılı Çatlakların Doğurduğu Boyut Etkisi”, **VI. Ulusal Mekanik Kongresi**, Kirazlıyayla, Bursa, Eylül 1989, İTÜ 1990, s. 642-650.
 14. Şener, S., “Gevrek Malzeme Göçmesinde Boyut etkisi” , **VII. Ulusal Mekanik Kongresi**, Antalya, Eylül, 1991, s. 567-576.
 15. Şener, S., “Beton Küplerden Demir Çubukların Çekip Çıkarılma Yüklerinde Boyut Etkisi”, **VI. Ulusal Mekanik Kongresi**, Kirazlıyayla, Bursa, Eylül, 1987, s. 866-867.
 16. Shah, S., P., “Size-Effect Method for Determining Fracture Energy and Process Zone Size of Concrete”, **Materials and Structures**, Vol. 23, July 1991, pp.461-465.
 17. T., Tianxi, Y., Songchul, and Zollinger, D., G., “Determination of Fracture Energy and Process Zone Length Using Variable-Notch One- Size Specimens”, **ACI Journal**, Vol. 96, No. 1, January-February, 1999, pp., 3-10.
 18. Şener, S., “Betonarme Donatıların Aderans Ekinde Boyut etkisi” , **İMO XI. Teknik Kongre**, İstanbul, Ekim, 1991, s. 117-128.
-

- 19.Şener, S., "Size Effect in the Direct Loading Tests", **Advances in Civil Engineering, First Technical Congress Gazimagusa**. North Cyprus, October 25-27, 1993. pp. 720-727.
- 20.Şener, S., "Size Effect in Bond Splices Tests", **FIP'92 Symposium**, Budapest, Hungary, May 1992, pp. 357-362.
- 21.Şener, S., "Sargılı Donatıların Aderans Ekinde Boyut Etkisi", **İMO XII. Teknik Kongresi**, Antalya, Eylül 1991, s. 567-576.
- 22.Şener, S., Bazant, Z.P., and Becq-Giraudon,E., "Size Effect in Fracture of Bond Splices of Steel Bars in concrete Beams", **ASCE Journal of Structural Engineering**, Vol.125, No.6,1999, pp.653-660.
- 23.Şener, S., Begimgil, M., Belgin, Ç., "Çelik Lifli ve Lifsiz Çentikli Beton Kirişlerde Boyut Etkisi" , **Hazır Beton**, İstanbul 7, 37-38, 2000, s. 89-90, 66-68.
- 24.Aydın, İ. "Beton kirişlerin Burulma Tasarımında Boyut Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 1995, Ankara.
- 25.Z. P. Bazant, and J. Planas, **Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials**, 1998, CRC press, Boca Raton, New York, Boston, London and Washington.
- 26.B.L. Karihaloo, **Fracture Mechanics and Stractural Concrete**, Longman Scientific Technical, Essex CM 202 JE, UK, 1995,
- 27.Arslan, A. "Özel Betonlar" , Yüksek Lisans Ders Notları, Gazi Üniversitesi, 1998, Ankara.
- 28.TS 2511, " Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları", **Türk Standardları Enstitüsü**, 1977, Ankara.
- 29.TS 1114, "Hafif Agregalar - Beton İçin", **Türk Standardları Enstitüsü**, 1986, Ankara.
- 30.Rilem Draft Recommentations, "Size Effect Method for Determining Fracture Energy and Process Zone Size of Concrete"**_Materials and Structuries**, Vol.23, pp. 461-465. 1990.

31. Şener, S. "Betonun Kırılma Mekanîği", Yüksek Lisans Ders Notları, Gazi Üniversitesi, 1998, Ankara.



ÖZGEÇMİŞ

13.02 1972 Sancak (Yugoslavya)'da doğdu. İlk okulunu 1979 yılında doğum yerinde tamamladı. Yeni Pazar şehrinde Fen Lisesinden 1991 yılında mezun oldu. Aynı yıl Saray Bosna Üniversitesi (Sarajevski Univerzitet) 'ne İnşaat Mühendisliği Fakültesinde Ulaşım Bölümüne (Yol İnşaat Müh.) lisans eğitimine kayıt olmuştur. Savaştan dolayı okulunu bırakmak zorunda kalarak iki sene sonra 1993'te Türkiye'ye geldi. Aynı sene'de Akhisar (Manisa)'da TÖMER'i bitirdi. 1993 yılında Frciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümüne girdi ve 1998'de mezun oldu. 1998'de Gazi Üniversitesine Yüksek Lisans Eğitimine başladı.