

**T. C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MİNERAL KATKI DOZAJININ VE TÜRÜNÜN KENDİLİĞİNDEN
SIKIŞAN BETONDAKİ DONATI ADERANSINA ETKİSİ**

Mehmet KARATAŞ

Tez Yöneticisi

Doç.Dr. Zülfü Çınar ULUCAN

DOKTORA TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2007

T. C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİNERAL KATKI DOZAJININ VE TÜRÜNÜN KENDİLİĞİNDEN
SIKIŞAN BETONDAKİ DONATI ADERANSINA ETKİSİ

Mehmet KARATAŞ

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez, 05 / 07 / 2007 tarihinde, aşağıda belirtilen jüri üyeleri tarafından oybirliği ile başarılı olarak değerlendirilmiştir.

Danışman : Doç.Dr. Zülfü Çınar ULUCAN

Üye : Prof.Dr. Rüstem GÜL

Üye : Prof. Ali Sayıl ERDOĞAN

Üye : Prof.Dr. Yusuf CALAYIR

Üye : Doç.Dr. Ragıp İNCE

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun / / tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tezin önerilmesi ve yönlendirilmesinde gerekli yardım ve ilgisini esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç.Dr. Zülfü Çınar ULUCAN'a,

Tezle birlikte yürüttüğümüz FÜBAP (Proje No:1248) Projesinde ve deneylerin yürütülmesinde birlikte çalıştığımız, tez konusunun belirlenmesinde ve tezin her aşamasında bilgilerinden istifade ettiğim Tunceli Meslek Yüksekokulu Öğretim Görevlisi Sayın Dr. Kazım TÜRK'e,

Bu çalışmayı finanse eden Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) Birimine (Proje No:1248),

Çalışmam esnasında büyük yardımlarını gördüğüm laboratuvar teknisyeni Sayın Seyfettin ÇİÇEK'e, arkadaşım Ahmet BENLİ'ye ve bitirme ödevi öğrencilerimiz Adem ÜNVERMEZ, Fatih BAYDEMİR, Selahattin ÖZEREN, Mehmet ANNAK, Altan BÖYÜK ve M. Mutlu BİRCAN'a,

Bu çalışma süresince bilgilerini esirgemeyen Sayın Doç.Dr. Ragıp İNCE'ye,

Her zaman maddi ve manevi destek olan sevgili arkadaşım Doç.Dr. Ahmet BAYLAR'a,

Çalışmamda kullandığım uçucu külü herhagi bir bedel talep etmeden tedarik eden AKÇİM Madencilik ve Çimento Sanayi A.Ş.' ne ve çok değerli çalışanı Sayın Selahattin YAZGAN'a, silis dumanını gönderen Eti Elektro Metalurji A.Ş' ne,

Kullanılan donatıların çoğunu hibe yoluyla veren Dilek İnşaat ve Hayma İnşaat'a, donatıların hazırlanmasında yardımcı olan Nizamettin Usta'ya ve yine donatı tedarik eden ve etriyeleri hazırlatan sevgili arkadaşım Kenan METİN'e,

Temin edilen donatıların tasarıma uygun şekilde teşkilini sağlayan Tunceli Meslek Yüksek Okulu İnşaat Programı öğrencisi Metin DEMİRCİ' ye

Agregaların temininde yardımlarını esirgemeyen Dilek İnşaat'tan Ekrem GÜN'e, Mustafa DOĞAN' a, Agregası ve donatı tedariki sırasında bize gerekenden fazlasını yapan Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığından Sayın Erhan YALÇIN'a,

FÜBAP Projesi kapsamamında deney aparatlarını hassasiyetle ve büyük özenle hazırlayan, süperakışkanlaştırıcı ve pas payları aparatlarının temininde yardımcı olan ve her başımız sıkıştığında mesleki tecrübelerinden yararlandığımız İnşaat mühendisi Zülfü ER'e,

Çalışmalarım boyunca bana göstermiş oldukları sabır ve destekten dolayı eşim Nurcan ve çocuklarım Oğuzhan ve Ömer'e,

Ayrıca, tezim hakkındaki değerli tavsiye ve katkılarından dolayı Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Prof.Dr. Rüstem GÜL' e, F.Ü. Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyeleri Sayın Prof. Ali Sayıl ERDOĞAN ve Sayın Prof.Dr. Yusuf CALAYIR' a

Sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	III
TABLOLAR LİSTESİ.....	V
SİMGELER LİSTESİ.....	VI
KISALTMALAR LİSTESİ.....	VII
ÖZET.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1. GİRİŞ.....	1
2. KENDİLİĞİNDEN SIKIŞAN BETON.....	4
2.1 Giriş.....	4
2.2 Tasarım ve Üretim Teknikleri.....	6
2.3 Kendiliğinden Sıkışan Betonun Karışım Bileşenlerinin Seçimi.....	8
2.3.1 Çimento Seçimi.....	10
2.3.2 Agrega Seçimi.....	10
2.3.3 Mineral Katkı Seçimi.....	11
2.3.3.1 Mineral Filler.....	12
2.3.3.2 Uçucu Kül.....	13
2.3.3.3 Silis Dumanı.....	14
2.3.3.4 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu.....	16
2.3.4 Süper Akışkanlaştırıcı Seçimi.....	17
2.4 Kendiliğinden Sıkışan Betonun Reolojisi.....	19
2.5 EFNARC' a göre Kendiliğinden Sıkışan Beton için İşlenebilirlik Deney Yöntemleri.....	20
2.5.1 Çökme-Yayılma ve T_{500} Zamanı Deneyi.....	24
2.5.2 V-Hunisi Deneyi.....	25
2.5.3 L-Kutusu Deneyi.....	26
2.5.4 Elek Ayırma Direnci Deneyi.....	28
3. BETONARMEDE ADERANS VE KENETLENME.....	30
3.1 Giriş.....	30
3.2 Aderans Mekanizması.....	32
3.3 Aderans Dayanımını Etkileyen Faktörler.....	32
3.3.1 Donatının Özelliği İle İlgili Etkenler.....	33
3.3.2 Betonla İlgili Etkenler.....	37
3.3.3. Betonarme Kesit ile İlgili Etkenler.....	38

3.3.4 Diğer Etkenler.....	40
3.4 Aderans Çeşitleri.....	40
3.4.1 Kenetlenme Aderansı.....	41
3.4.2 Eğilme Aderansı.....	43
3.5. Aderans Deneyleri.....	44
3.5.1 Çekip-Çıkarma Deneyi.....	45
3.5.2 Kiriş Deneyleri.....	47
3.5.2.1 Bureau of Standards Deneyi.....	47
3.5.2.2 Teksas Deneyi.....	47
3.5.2.3 Standard Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi.....	48
3.5.2.4 Kiriş Çatlama Deneyi.....	49
3.6. Çatlama Olayı.....	50
3.7 Aderansta Göçme Mekanizmaları (Sıyrılma ve Yarılma).....	51
3.8 Aderans Kırılmasının (Yarılma) Mekanizması.....	53
3.9 Bindirmeli Eklemeler.....	55
3.10 Bindirmeli Ekli Çubuklar için TS 500'ün Şartları.....	58
3.10.1 Çekme Donatısının Eklenmesi.....	59
3.10.2 Basınç Donatısının Eklenmesi.....	60
4. KULLANIM YÜKLERİ ALTINDA ADERANS HESABI.....	61
4.1 Giriş.....	61
4.2 Bindirmeli Ekli Kirişlerde Aderans Dayanımının Bulunması.....	61
4.3 Elastik Hesap Yöntemi.....	62
4.4 Eğilme Etkisi Altındaki Çift Donatılı Betonarme Elemanların Çözümlemesi.....	63
5. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	65
5.1 Malzemeler.....	65
5.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	68
5.3 Deney Düzeneği ve Test İşlemi.....	71
5.4 Deney Bulguları.....	72
6. SONUÇLAR.....	80
KAYNAKLAR.....	82
ÖZGEÇMİŞ.....	90
EK-1. DENEY KİRİŞ NUMUNELERİNE AİT ÇATLAK MODELLERİ	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Kimyasal katkı tipinin akışkanlık artırıcı etkisi.....	19
Şekil 2.2 Çökme-yayılma tablası.....	24
Şekil 2.3 V-hunisi deney seti.....	26
Şekil 2.4 L-kutusu deney seti, a) Perspektif, b) Yandan görünüş, d) Üstten görünüş.....	28
Şekil 3.1 Betona gömülü donatı çubuğu parçasının serbest cisim diyagramı ve aderans dayanımı bileşenleri.....	31
Şekil 3.2 Donatı Çubuğu Boyunca Gerilme Değişimi.....	32
Şekil 3.3 Kenetlenme Aderans Deneyi.....	35
Şekil 3.4 Beton örtü kalınlığının aderans dayanımına etkisi.....	38
Şekil 3.5 Kenetlenme aderansı.....	42
Şekil 3.6 Eğilme Aderansı.....	44
Şekil 3.7 Çekip-Çıkarma (Pull-out) Deneyleri.....	46
Şekil 3.8 Bureau of Standards deneyi.....	47
Şekil 3.9 Teksas deneyi.....	48
Şekil 3.10 Standart Mafsallı Belçika Deneyi.....	48
Şekil 3.11 Çekme donatısı sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli olarak yerleştirilmiş kiriş deneyi.....	50
Şekil 3.12 Etriye, montaj donatılı ve çekme donatısı ekli olarak yerleştirilmiş kiriş deneyi	50
Şekil 3.13 Aderans nedeni ile oluşabilecek çatlaklar.....	51
Şekil 3.14 Nervürlü çubuğun iki çıkıntısı arasındaki bölgesel davranış.....	52
Şekil 3.15 Yarıлма kırılmasının modellenmesinde “iç basınçlı boru analogisi”.....	53
Şekil 3.16 Yarıлма çatlakları.....	55
Şekil 3.17 Bindirmeli eklemelerde çubuklardaki gerilmelerin birinden diğerine aktarılması.....	56
Şekil 3.18 Eğilmeye maruz bir elemanda çubuk rijitliği sebebiyle beton örtünün göçmesi...	56
Şekil 3.19 Eklenmiş çubukların yarıлма çatlak modelleri.....	57
Şekil 3.20 Bindirmeli ekleme türleri.....	59
Şekil 4.1 Çift donatılı dikdörtgen kesitte şekil değiştirme ve gerilmeler.....	63
Şekil 5.1. Kendiliğinden sıkışan beton için a) çökme-yayılma ve T_{50} b) L-kutusu c) elek segregasyon d) V-hunisi deneyleri.....	67
Şekil 5.2 Kontrol betonu için çökme deneyi.....	68
Şekil 5.3 Kirişlerde kullanılan donatının teşkili.....	69
Şekil 5.4 Deney numunelerine ait geometrik özellikler.....	69

Şekil 5.5 250L hacimli mikser.....	70
Şekil 5.6 Kiriş ve küp numunelerinin kür edilmesi.....	70
Şekil 5.7 Deney düzeneği.....	72
Şekil 5.8 K-KSB-30UK kirişine ait çatlak modelleri.....	74
Şekil 5.9 K-Kontrol kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri.....	75
Şekil 5.10 K-KSB-25UK kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri.....	75
Şekil 5.11 K-KSB-30UK kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri.....	76
Şekil 5.12 K-KSB-35UK kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri.....	76
Şekil 5.13 K-KSB-40UK kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri.....	77
Şekil 5.14 K-KSB-5SD kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri.....	77
Şekil 5.15 K-KSB-10SD kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri.....	78
Şekil 5.16 K-KSB-15SD kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri.....	78
Şekil 5.17 K-KSB-20SD kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri.....	79
Şekil Ek-1.1 K-KSB-25UK Kirişine ait çatlak modelleri.	
Şekil Ek-1.2 K-KSB-30UK kirişine ait çatlak modelleri	
Şekil Ek-1.3 K-KSB-35UK kirişine ait çatlak modelleri	
Şekil Ek-1.4 K-KSB-40UK kirişine ait çatlak modelleri	
Şekil Ek-1.5 K-KSB-5SD kirişine ait çatlak modelleri	
Şekil Ek-1.6 K-KSB-10SD kirişine ait çatlak modelleri	
Şekil Ek-1.7 K-KSB-15SD kirişine ait çatlak modelleri	
Şekil Ek-1.8 K-KSB-20SD kirişine ait çatlak modelleri	
Şekil Ek-1. Kontrol betonu kirişine ait çatlak modelleri	

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1 KSB tasarımı için alınabilecek önlemler.....	7
Tablo 2.2 EFNARC' a göre KSB karışım oranları.....	9
Tablo 2.3 EFNARC' a göre mineral katkı sınıflandırılması.....	12
Tablo 2.4 Silis dumanlarının kimyasal bileşenleri, %.....	14
Tablo 2.5 Betonda katkı malzemesi olarak kullanılan silis dumanının beton özelliklerine etkisi..	15
Tablo 2.6 Betonda katkı malzemesi olarak kullanılan öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufunun beton özelliklerine etkisi.....	17
Tablo 2.7 KSB tasarımında kullanılan deney yöntemleri.....	21
Tablo 2.8 Taze beton deney yöntemlerine göre yapılan sınıflandırma.....	22
Tablo 2.9 KSB' lar için uygunluk ölçütü.....	23
Tablo 5.1 Portland çimentosu, uçucu kül ve silis dumanının kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri.....	65
Tablo 5.2 Kullanılan betonlara ait karışım oranları (kg/m ³).....	66
Tablo 5.3 KSB' ların taze beton özellikleri.....	66
Tablo 5.4 Donatı çubuklarına ait mekaniksel özellikler.....	68
Tablo 5.5 Kiriş numunelerine ait özellikler.....	71
Tablo 5. 7 Deney sonuçlarının istatistiksel olarak değeriendirilmesi.....	73

SİMGELER LİSTESİ

PA	: Kendiliğinden sıkışan betonun dar aralıklardan geçme yeteneği (%)
SR	: Elek ayrışma direnci (%)
σ_s	: Çekme donatısındaki gerilme (MPa)
σ'_s	: Basınç donatısındaki gerilme (MPa)
A_s	: Çekme donatısı alanı (mm ²)
A'_s	: Basınç donatısı alanı (mm ²)
d_b	: Çekme donatısının çapı (mm)
l_s	: Bindirme uzunluğu (mm)
u	: Aderans dayanımı (MPa)
ρ	: Donatı oranı
f_{cd}	: Hesapta kullanılan beton basınç dayanımı (MPa)
a	: Eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu derinliği (mm)
b	: Kiriş genişliği (mm)
h	: Kiriş yüksekliği (mm)
M	: Kesitin taşıyabileceği moment (Nmm)
c	: Tarafsız eksen derinliği (mm)
f'_c	: 28 günlük beton basınç dayanımı (MPa)
ϕ	: Donatı çapı (mm)
P_{max}	: Göçme yükü (kN)
M_{max}	: Kesitin taşıyabileceği maksimum moment (Nmm)
δ	: Kiriş kesitinin orta noktasındaki sehim (mm)

KISALTMALAR LİSTESİ

KSB : Kendiliğinden sıkışan beton

UK : Uçucu kül

SD : Silis dumanı

ACI : American Concrete Institute

RILEM: Reunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Resherches sur les Materiaux el
les Constructions

T.E. : Tarafsız eksen

TSE : Türk Standartları Enstitüsü

ELAZIĞ, 2007

ÖZET

DOKTORA TEZİ

MİNERAL KATKI DOZAJININ VE TÜRÜNÜN KENDİLİĞİNDEN SIKIŞAN BETONDAKİ DONATI ADERANSINA ETKİSİ

Mehmet KARATAŞ

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2007, Sayfa: 90

Çalışmanın asıl amacı, mineral katkı türü ve dozajının kendiliğinden sıkışan betondaki (KSB) donatı aderansına etkisini araştırmaktır.

Bu çalışmada, normal ve KSB' dan üretilmiş ve 200×300×2000 boyutlarında 27 adet kiriş numunesi test edilmiştir. Her bir kiriş, açıklık ortasında bindirmeli ekli iki çekme donatısı yerleştirilerek ve kayma donatılı olarak tasarlanmıştır. Ekleme uzunluğu, donatı akma noktasına ulaşmadan önce, ekleme bölgesindeki beton örtünün yarılması ile aderans göçmesi olabilecek şekilde seçilmiştir. Deneyler esnasında, kiriş boyutları, donatı çapı ve su/(çimento ve çimento+mineral katkı (toz)) sabit tutulurken mineral katkı türü (uçucu kül (UK) ve silis dumanı (SD)) ve dozajı (%25, 30, 35, 40 UK ve %5, 10, 15, 20 SD) değişken parametre olarak alınmıştır. KSB' larda mineral katkıların her bir dozajı ve kontrol betonu için üçer adet kiriş numunesi, sabit moment bölgesindeki ekleme uzunluğu kenarlarından pozitif eğilme ile yüklenmiştir.

Sonuç olarak, genelde KSB numunelerine ait aderans dayanımlarının kontrol betonu numunelerinin aderans dayanımından daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte SD içeren KSB kiriş numunelerine ait aderans dayanımlarının hem UK içeren KSB kiriş numunelerinin hem de kontrol betonuna ait numunelerin aderans dayanımlarından yüksek olduğu deney sonuçlarından anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden sıkışan beton, kirişler, donatı-beton aderansı, nervürlü donatı, basit eğilme, ekleme uzunluğu.

ABSTRACT

Phd Thesis

EFFECT OF DOSAGE AND TYPE OF MINERAL ADMIXTURES ON BOND OF REINFORCING BARS IN SELF-COMPACTING CONCRETE

Mehmet KARATAŞ

Fırat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

2007, Page: 90

The primary aim of this study was to investigate the effect of dosage and type of mineral admixtures on bond of reinforcing bars in self-compacting concrete (SCC).

In this study, twenty seven beams, which were produced from normal concrete and SCC and had 200×300×2000 dimensions were tested. Each beam was designed to include two bars in tension, spliced at the center of the span. The splice length was selected so that bars would fail in bond, splitting the concrete cover in the splice region, before reaching the yield point. During experiments, the class of mineral admixtures (fly ash (FA), silica fume (SF) and dosage (25, 30, 35, 40 %FA and 5, 10, 15, 20 %SF) were the variables as dimensions of beam, diameter of bar and ratio of water to cement and the ratio of water to cement and mineral admixtures (powder) were constant. Three beams for each dosage of mineral admixtures in SCC and control concrete were subjected to positive bending with the splice in a constant moment region.

As results, beam specimens with SCC generally showed higher bond strength than beam specimens with control concrete. However, the experimental results showed that the bond strengths of beam specimens with SCC having SF were higher than that of beam specimens with SCC haing FA and beam specimens with control concrete.

Key Words: Self-compacting concrete, beams, bond of reinforcing bar-concrete, deformed bar, positive bending, splice length.

1. GİRİŞ

Betonarme yapıların tasarımında temel şart, beton ve donatı arasındaki yeterli aderansın sağlanmasıdır. Donatı ve onu çevreleyen beton arasındaki aderans, betonarme yapılarda esas teşkil eden bir konudur. Aderans gerilmeleri, donatı çubuklarındaki kuvvetleri birinden diğerine aktarmada önemli bir rol oynar. Bu kuvvet veya gerilme aktarımı, beton ve betona gömülü donatı çubuğunun yüzeyi arasındaki rölatif harekete veya kaymaya karşı direnç ile mümkün olur. Bu donatı çubuklarında oluşan aderans gerilmesi kimyasal adezyon, sürtünme direnci ve mekanik kenetlenme ile kontrol edilir. Kimyasal adezyon göçtüktan sonra, davranış donatı tipine göre önemli derecede değişir. Düz demirlerde, kaçınılmaz olarak donatı ve beton ara yüzeyinde oluşan kesme etkisi sonucu, yapısal açıdan tehlike arz eden sıyrılma ile birlikte göçme oluşur. Nervürlü donatı durumunda ise, yükün artması, donatıyı saran betonda radyal ve boylamasına kuvvetleri doğuran mekanik kenetlenmeye sebep olur. Böylece, nervür önündeki gözenekli beton tabakasının bölgesel mikro ezilmesine bağlı olarak donatının maksimum kaymaya ulaşmasıyla eğilme çatlakları oluşur [1]. Göçme öncesi, nervürün kamalama etkisinden dolayı, yarıma çatlakları meydana gelir [2].

Hamad ve Itani [3], açıklık ortasında üst üste bindirilmiş iki çekme donatısına sahip ve çimento yerine mineral katkı olarak silis dumanı içeren tam ölçekli kiriş numunelerinden %5 ile 20 oranında silis dumanı içeren karışımların aderans dayanımının, betonlama durumuna veya süper akışkanlaştırıcı dozajına bakılmaksızın, ortalama %10 oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Azizinamini ve diğ., [4], yüksek mukavemetli betona gömülü ve beton örtü kalınlığı az olan donatı çubuklarından, daha yüksek aderans mukavemeti elde etmek için bindirme bölgesi üzerinde minimum enine donatı miktarı sağlanarak bütün çıkıntıların taşımaya katılabileceği bir mekanizma geliştirmişlerdir. Bunun yanında, yüksek mukavemetli beton ve küçük beton örtü kalınlığı durumunda üst döküm pozisyonundaki çubukların, aderans açısından daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, Esfahani ve Rangan, [5] ise, çalışmalarında nervürlerin önündeki betonun ezilme yayılmasının, beton mukavemetine bağlı olarak değiştiğini ve yüksek mukavemetli beton durumunda, nervür önündeki betonun daha az ezildiğini tespit etmişlerdir.

Yapılan birçok çalışmada, aderans dayanımının donatı çapının artmasıyla azaldığı ve yükleme durumuna bağlı olarak değiştiği görülmüştür [6, 7]. Bunun yanında, Zhu ve diğ., [8] tarafından yapılan çalışmada, donatı çapının değişmesine karşılık, kendiliğinden sıkışan beton (KSB) karışımlarına ait aderans dayanımlarının normal beton karışımlarından %10 ile 40 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Bütün bunlara ilaveten, betonarme yapıların inşasında, beton yerleşme kalitesini temin etmek için beton karışımına sıkıştırma işleminin uygulanması kaçınılmazdır. Yetersiz sıkıştırma, betonarme elemanlarda peteğimsi ve boşluklu yapı gibi kusurlara sebep olabilir. Bu eksiklikler durabilite ve yapısal performansta azalmalara yol açacaktır. Bununla birlikte, sık donatılı ve büyük boyutlu elemanlarda sıkıştırma işlemi daima kolay olmayabilir. Uygun işlenebilirliğe sahip bir beton seçimi, genellikle betonun yerleştirilmesindeki zorlukları çözmek için yapılır. Betonun yerleştirilmesiyle ilgili problemleri çözmek için, KSB olarak isimlendirilen ve hiçbir şekilde sıkıştırılmaya ihtiyaç duyulmayan özel bir beton tipi geliştirilmiştir. Deprem bölgelerindeki çok sık donatılı yapılarda kullanmak amacıyla 1980'li yılların sonunda Japonya'da [9] geliştirilen KSB, mükemmel şekil değiştirebilen, segregasyona karşı yüksek dirence sahip olan ve herhangi bir sıkıştırma işlemi olmaksızın kolaylıkla yerleşebilen bir beton olarak tanımlanır [10].

KSB' da segregasyon direncini sağlamak için $500\text{--}600 \text{ kg/m}^3$ 0.125 mm göz açıklıklı eleğin altında kalan ince toz malzeme kullanılması gerektiği EFNARC [11] tarafından önerilmektedir. Çimento miktarını artırmak hem beton maliyetini artırdığından hem de betona artan termal gerilmeler ve rötre gibi olumsuz etkiler kattığından, genelde beton karışımlarına puzzolanik ya da daha az reaktif mineral katkıları (uçucu kül, silis dumanı, kireçtaşı tozu ve serbest fırın cürufu gibi) ilave edilerek ince toz malzeme oranını artırma yoluna gidilmiştir [12]. Betonda mineral katkıların kullanımı, maliyeti arttırmadan beton akıcılığını arttırmak için faydalı olmaktadır. Çünkü KSB' da uçucu kül kullanımının, maliyet ve hidratasyona olumlu etkisi gibi avantajları bakımından %30 ve/veya %40 oranlarında kullanılmasının 28 günlük basınç mukavemetine ve hem erken hem de daha sonraki kür yaşları için çekme mukavemetine önemli katkı sağladığı görülmüştür [13]. Ayrıca, hem KSB hem de normal betondan üretilen numunelerin basınç ve çekme dayanımlarının 20 °C su içindeki kür şartları altında, kapalı naylon içinde ve havada kür edilen numunelere göre daha yüksek değerlere ulaştığı gözlenmiştir [14]. Yine yapılan bir çalışmada, 28 ve 130 günlük kür sonunda silis dumanının artmasıyla KB'lara ait basınç ve çekme mukavemetlerinin de arttığı görülürken, %15 SD ikameli kendiliğinden sıkışan betonun en yüksek basınç ve çekme mukavemetine sahip olduğu ve özellikle 15 ve %20 oranlarında silis dumanı içeren numunelere ait ultrases hızı değerlerinin düştüğü görülmüştür [15].

Önceki araştırmalar göstermiştir ki, KSB' da uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanımı sadece Portland çimentosu kullanarak üretilen beton ile karşılaştırıldığında aynı çökme-yayılma değerini elde etmek için ihtiyaç duyulan süper akışkanlaştırıcı dozajı azalmaktadır [16]. Aynı zamanda, uçucu kül kullanımı betonun kıvam ve işlenebilirlik özelliklerini iyileştirir ve çimentonun hidratasyon ısısından dolayı betonda oluşacak çatlamayı azaltır [17]. Kim ve diğ. [18], uçucu külün beton karışımında çimentonun yerine % 30 (sadece bir karışım için % 40)

oranında kullanıldığında karışımın mükemmel bir işlenebilirliğe ve akıcılığa sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Muira ve diğ. ise [19], ilave mineral malzemelerin işlenebilirlik üzerine etkisini değerlendirdiklerinde, uçucu külün çimento türü malzemelerin toplamının % 30 oranında bunların yerine kullanılmasının betonun reolojik özelliklerini önemli derecede iyileştirebildiğini bulmuşlardır. KSB’da Su/Toz oranının işlenebilirlik üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve KSB’ların üretiminde en iyi işlenebilirliği sağlayan su/toz oranı hacimce 0.95 ile 1.10 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu oranların KSB karışımlarında topaklaşma veya ayrışma olmamasını sağlayan en iyi oranlar olduğu bulunmuştur [20].

Aderans dayanımının incelenmesi ile ilgili yapılan deneylerde, genellikle sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli çekme donatısına sahip kirişler yaygın olarak kullanılmaktadır. Birçok araştırmacı, dört noktalı eğilmeye maruz bindirmeli ekli kirişlerin davranışını, aderans dayanımını etkileyen farklı değişken parametreler kullanarak incelemektedir. Dolayısıyla literatürde, basit eğilme etkisi altında yüklenen betonarme elemanlara ait ekleme dayanımı hakkında çok sayıda deney sonuçları ve teorik bağıntılar yer almaktadır [21]. Yapılan deneylerde, bindirmeli ekli kirişlerin davranışının, donatı çubukları boyunca oluşan yarıma ve donatı ekleme uçlarında gelişen eğilme çatlaklarından önemli bir şekilde etkilendiğini görmüşlerdir [22]. Bu sebeple, betonarme yapı elemanlarını aderans açısından en iyi karakterize edecek numune şeklinin, basit eğilme etkisine maruz büyük boyutlu ve bindirmeli ekli çekme donatısına sahip kirişler olduğu açıktır.

Yapılan tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde, kendiliğinden sıkışan beton ve EFNARC’ın [11] önerdiği işlenebilirlik deney yöntemlerinden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, aderans ve kenetlenme hakkında temel bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde, basit eğilmeye maruz dikdörtgen kesitli çift donatılı kirişlerdeki bindirmeli ekli çekme donatılarında oluşan gerilmelerin hesabı için, elastik hesap yönteminin takdimi yapılmıştır. Beşinci bölümde ise, sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli çekme donatısı yerleştirilerek eğilme yüklemesine maruz etriyeli tam ölçekli betonarme kirişlere ait deneysel çalışmaya yer verilmiştir. Altıncı bölümde ise, tez çalışmasının genel bir değerlendirilmesi yapılmıştır.

Bu çalışmada, mineral katkı türü ve dozajının kendiliğinden sıkışan betondaki donatı aderansına etkisi incelenmiştir. Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (FÜBAP) tarafından finanse edilmiştir (Proje No: 1248).

2. KENDİLİĞİNDEN SIKIŞAN BETON

2.1 Giriş

Japonya’da, 1980’li yılların başında betonarme yapılarda kalıcılık sorunları incelenmiş ve bu sorunların en önemli sebeplerinden birinin, yerleştirilen taze betona yeterli sıkıştırma işleminin uygulanamamasının olduğu tespit edilmiştir. Özellikle taze betonun sıkıştırılması için gerekli kalifiye eleman yetersizliği, yerleştirilen betonun kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bununla birlikte kalifiye eleman ne kadar eğitilmiş olursa olsun, taze betonun işlenebilirliğinin düşük olması halinde, homojen olarak sıkıştırılabilmesi pratikte mümkün değildir. Bu problemi çözmek amacıyla, sıkıştırma işlemini gerektirmeden kendi ağırlığı ile sıkışarak yerleşebilecek özel bir tip beton üretilmesi tasarlanmıştır [23].

Kimya alanındaki gelişmeler ve polimer teknolojisinin ilerlemesi, 1980’li yılların ortalarından itibaren çok etkili akışkanlaştırıcıların keşfine sebep olmuştur. Yüksek oranda su azaltma yeteneğine sahip bu akışkanlaştırıcılar aynı zamanda taze betonun işlenebilirliğini de arttırmaktadır. Yeni nesil akışkanlaştırıcıların sağladığı bu etki bilim adamlarını taze betonun yerleştirilmesi sırasında gereken sıkıştırma işlemini ortadan kaldırmak için araştırma yapmaya yöneltmiştir. Böylece KSB kavramı ortaya çıkmıştır.

KSB, kendi ağırlığı altında akıp sağlamlaşabilen, deprem bölgelerindeki sık donatılama durumunda bile kalıbı tamamen doldurabilen, dayanım kazanıncaya kadar ayrışma ve terleme gibi problemler olmadan homojen kalabilen ve herhangi bir ek sıkıştırma işlemi gerektirmeden kendiliğinden sıkışabilen bir yapı malzemesidir.

Klasik beton tasarımından farklı olarak KSB karışımında, çok miktarda mineral katkı ve işlenebilirliği artırmak için bir miktar da kimyasal katkı bulunmaktadır. Bu malzemelerin seçimi ve beton tasarımında uygun oranlarda kullanılmasına yönelik yeni deney yöntemleri ve standartlar geliştirilmektedir.

KSB günümüz beton teknolojisinde uygulamaya geçiş dönemini yaşamaktadır. Gelişmiş ülkelerde KSB teknolojisine geçiş daha kolay ve hızlı; gelişmekte olan ülkelerde ise yavaş ve problemli olacaktır [24]. Bu dönemin uzunluğu, yapılacak teorik ve pratik çalışmaların uygulanabilirliğinin sektör tarafından değerlendirilmesine bağlıdır.

Betonda kendiliğinden sıkışabilirlik kavramı ilk olarak Tokyo Üniversitesinde, 1986 yılında Prof. Dr. Hajime Okamura tarafından ortaya atılmıştır. Su altında beton dökümü uygulamalarında,

vibrasyonsuz beton dökümlerinden edinilen tecrübe ile KSB üretilmesi amaçlanmıştır. Okamura'nın başlattığı çalışmaları Ozawa, Ouchi ve Maekawa devam ettirmiştir. 1988 yılında aynı üniversitede yüksek performanslı KSB prototipi üretilmiş ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu özel tip betonun geliştirilmesindeki esas amaç, dayanımın yanı sıra dayanıklılık açısından da yüksek performansı sağlamaktır. Yüksek performanslı betonun aşağıda sıralanan 3 aşamada belirli şartları yerine getirmesi öngörülmüştür;

- 1- Taze halde iken kendiliğinden sıkışabilme.
- 2- İlk olumsuz etkilere direnebilecek derecede yüksek erken dayanım.
- 3- Sertleşmiş halde tüm dış etkilere karşı bozulmadan kalabilme.

KSB konusunda ilk makale, 1989 yılında Ozawa tarafından Doğu Asya ve Pasifik Yapı Mühendisliği Konferansı'nda (EASEC) sunulmuştur. KSB konusunda ilk kitap Okamura tarafından yazılmış olup, 1993 yılında Japonca olarak yayınlanmıştır. KSB' un dünyaya tanıtılmasında, Ozawa'nın 1992 yılında İstanbul'daki Uluslararası CANMET-ACI konferansında yaptığı sunum hızlandırıcı bir etki yapmıştır.

Her ne kadar KSB' un ilk uygulamalarının Japonya'da su altı beton dökümleriyle başladığı Japon araştırmacılar tarafından savunulsa da bu konuda farklı görüşler mevcuttur. 1974'de o dönemin en gelişmiş akışkanlaştırıcıları kullanılarak Reoplastik Beton (çökme değeri 20 cm'nin üzerinde) adı verilen kohezif kıvamlı beton üretilmiştir [26]. Collepardi [27], Reoplastik Beton'un KSB ile benzer özellikler gösterdiğini savunmaktadır. Amerikan Beton Enstitüsünün (ACI) o yıllar için verdiği 175 mm çökme değeri sınırlaması nedeniyle bu betonun yaygınlaşması mümkün olamamıştır. Akışkanlaştırıcıların performansının yetersizliği ve kullanımının düşük seviyelerde olması bu betonun gelişmesini engellemiştir. ACI'n çökme değerini sınırlamasının nedeni de kimyasal katkısız betonlarda bu çökme değeri aşıldığı takdirde, yüksek oranda su kuma meydana geleceğinin deneysel çalışmalarla belirlenmiş olmasıdır. 16 cm'den daha çok çöken kimyasal katkısız klasik betonda taze halde aşırı su kuma gözlenmektedir [28]. Gelişen kimyasal katkıların yaygınlaşmasıyla bu sınırlama ortadan kalkmıştır.

KSB literatürde üç farklı isimde anılmaktadır. Literatürde en yaygın kullanılanı Kendiliğinden Sıkışan Beton (Self-Compacting Concrete - **SCC**)'dur. Ayrıca bazı çalışmalarda kendiliğinden yerleşen beton olarak da kullanılmaktadır [29]. Özellikle döşeme tipi, geniş boyutlu yüzey alanlarda kullanılması halinde, Kendiliğinden Seviyelenen Beton (Self-Levelling Concrete - **SLC**) adı kullanılmaktadır. Kendiliğinden Seviyelenen Beton'dan kendi ağırlığı ile her 4 metrede 1 mm'den fazla kot farkı oluşturmaksızın, akarak yatay konum alması beklenmektedir [30, 31]. Kuzey Amerika'da Khayat vd. [32], Kendiliğinden Yerleşen Beton (Self-Consolidating Concrete -

SCC) adını kullanmaktadır. Kullanım alanı ve bölgeye göre değişen bu isimler birbiri yerine de kullanılmaktadır. Bu çalışmada **KSB** (Kendiliğinden Sıkışan Beton) kısaltması kullanılmıştır.

2.2 Tasarım ve Üretim Teknikleri

KSB olarak kabul edilecek bir karışımın aşağıdaki gereksinimleri sağlaması beklenir:

- Kendiliğinden sıkışabilme yeteneği,
- Şekil değiştirme yeteneği ve akıcılığının olması,
- Topaklaşmaya dirençli olması,
- İşlenebilirlik özelliklerini taşıması ve yerleştirme süresince koruması,
- Taşıma ve yerleştirme sırasında dinamik stabilitesini koruması.
- Yerleştirme sonrasında statik stabilitesini koruması (Mikro yapıyı olumsuz etkileyen ve çatlak oluşumuna sebep olan terleme ve ayrışmayı engelleme).
- Homojen yüzey görünümü ve yerinde homojen mekanik özellik gösterme.
- Servis ömrü boyunca dayanım ve dayanıklılığını koruma.

Bu kadar çok beklentinin tam anlamıyla sağlandığı bir betonu üretmek pratikte oldukça zahmetlidir. Beklentiler her durum için değişkenlik gösterdiğinden, pek çok inşaatta bu beklentilerin hepsinin yerine getirilmesi gerekmebilir veya bazı faktörlerin önem derecesi azalabilir. KSB tasarımında ancak amaca göre tasarım yöntemi belirlemek optimum çözümü getirebilir [33]. KSB için taze halde en önemli üç temel özelliğin sağlanması için tasarımda alınacak önlemler Tablo 2.1’ de verilmiştir.

Amaca uygun KSB tasarımının yapılabilmesi için; amacın tam olarak tanımlanması, amaca uygunluk derecesinin sınıflandırılması ve mevcut deney yöntemleriyle uygun olduğu varsayılan tasarım ile deneme karışımının hazırlanması ve kontrolü yapılmalıdır [34]. KSB, geleneksel betona kıyasla gerek malzeme seçimi gerekse tasarım yöntemi ve üretim teknikleri bakımından farklılıklar gösterir. KSB’ daki en önemli değişiklik yüksek akışkanlık özelliğidir. Akışkanlığın artırılması yüksek dozajda kimyasal katkı kullanımıyla sağlanmaktadır. Akışkanlaştırıcı dozajının yüksek olması taze betonun viskozitesini düşürür. Dolayısıyla taze betonun karışım suyundaki ve agrega gradasyonundaki değişkenliklere hassasiyeti artmaktadır.

Tablo 2.1 KSB tasarımı için alınabilecek önlemler

Şekil değiştirme yeteneği	İyi stabilite	Düşük topaklaşma riski
1. Hamurun şekil değiştirme yeteneği artırılmalı a) Akışkanlaştırıcı kullan b) Su/Toz oranını artır 2. İç sürtünme azaltılmalı a) İri agrega hacmini azalt (hamur hacmini artır) b) Sürekli gradasyonlu toz kullan	1. Katılanların ayrışması engellenmeli a) İri agrega miktarını sınırla. b) D_{max} ' ı azalt c) Kohezyonu artır - Su/Toz oranını azalt - VAK kullan 2. Terleme azaltılmalı a) Karışım suyunu azalt b) Su/Toz oranını azalt c) Yüzey alanı fazla toz kullan d) VAK kullan	1. Akış sırasındaki ayrışma engellenmeli a) Su/Toz oranını azalt b) VAK kullan 2. Donatılar arası serbest açıklığa göre a) İri agrega hacmini azalt b) D_{max} ' ı azalt.

Üretim sırasında agrega gradasyonu ve nem içeriği, taşıma sırasında yüksek hava sıcaklığı ve aşırı karıştırmadan meydana gelen su kaybı tasarım özelliklerini değiştirebilir [35]. Örneğin agrega nemindeki küçük bir oynama, taze betonun stabilitesinin bozulmasına sebep olabilmektedir. Bu nedenle karışım tasarımında yukarıda sözü edilen değişkenlikleri ayarlayıcı ilave malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır.

KSB için pek çok araştırmacı ve kuruluş farklı tasarım yöntemleri geliştirmiştir. Bu yöntemler genellikle klasik tasarım yöntemlerinden daha karmaşıktır ve özellikle malzeme kalite kontrolü açısından daha çok deneysel çalışma gerektirmektedir. Japon İnşaat Mühendisleri Birliği (JIS) tasarım yöntemlerini üç ana grupta toplamıştır:

- 1- Toz Tipi Metodu:** Bu yöntem viskoziteyi cüruf veya puzolanik filler ile arttırma ilkesine dayanır. Temel kural olarak toz hacmi, toplam hacmin % 36'sından az olmamalıdır. Çimento hamurunun hacmi, eklenen toz malzemeler ile arttırılarak taze betonun stabilitesinin korunması amaçlanmıştır. Toz tipi metodunun en önemli dezavantajı, kullanılacak filler tipinin ve gradasyonunun değişkenliği ile bu durumun oluşturacağı kalite dalgalanmalarıdır. Toz maddenin çimento ile homojen karışması için iyi bir karıştırıcı ve uzun süreli karıştırma gerekebilir.
- 2- Stabilizatör Tipi Metodu:** KSB üretiminde viskozite arttırmak amacıyla toz madde dışında kimyasal katkıları da kullanılabilir. Bu katılara viskozite düzenleyici veya stabilizatör denilmektedir.
- 3- Kombinasyon Metodu:** Toz ve stabilizatör tipi yöntemlerin olumsuz yönlerinin düzeltilmesine yönelik olarak, her iki yöntemin bir arada kullanıldığı metoda Kombinasyon Metodu adı verilir.

Tasarımda kendiliğinden sıkışabilme şartı olarak optimum viskozite ve düşük eşik kayma gerilmesi aranır.

Bu sınıflandırma KSB' un viskozitesini ayarlamak amacıyla kullanılacak malzeme cinsine göre yapılmıştır.

2.3 Kendiliğinden Sıkışan Betonun Karışım Bileşenlerinin Seçimi

KSB' un bileşenlerinin belirlenmesi, geleneksel betona göre daha fazla deneyim ve bilgi birikimi gerektirmektedir. Çünkü KSB' dan sertleşinceye kadar beklenen performans, geleneksel betona göre daha farklıdır. Örneğin, akıcı özelliğe sahip KSB, göreceli olarak düşük eşik kayma değerine sahip olmalı, fakat aynı zamanda sertleşme başlayınca kadar terlemeye ve ayrılmaya yeterince dirençli olmalıdır. Su/toz oranını arttırmak, yüksek şekil değiştirmeyi sağlayabilir, ancak kohezyonu azaltarak betonun akışının tıkanması ile sonuçlanabilecek agrega ayrışmasına neden olabilir. Kaba agrega, kum ve ince malzeme tanecikleri arasındaki iç sürtünme, akışa karşı iç direnci artırır, bundan dolayı taze betonun akış hızı ve şekil değiştirme yeteneği azalır. Bu sürtünme, katı tanecikleri arasında etkileşimin daha büyük olduğu dar alanlarda betonun akması sırasında oldukça etkilidir. Viskozite açısından zayıf sistemlerde agrega yoğunluğunda bölgesel artışlar kümelenmeye yol açarak, betonun dar alanlarda hareket etmesini engelleyebilmektedir.

KSB' larda akıcılık, betonun su miktarını attırmaksızın akışkanlaştırıcı katkıları kullanılarak sağlanır. Betonun yeterli ayrışma direncine sahip olması ise viskozite arttırıcı katkı kullanılması veya karışımında kullanılan çimento veya mineral katkı miktarının arttırılması, böylece su/toz oranının azaltılması yolu ile sağlanabilir. Ayrışma direncinin arttırılması için bazen, her iki yöntem de kullanılabilir [36]. Görüldüğü gibi, betondaki her bileşenin kendiliğinden sıkışabilirliğe farklı etkisi vardır. Etki, bileşenin cinsine, teknik özelliklerine, kullanım oranı ve yöntemine bağlıdır. Bu sebeple bileşenlerin seçiminde gerek teknik gerekse ekonomik açıdan doğru seçim yapmanın yolu, malzemeleri iyi tanımaktan geçer. Aşağıda beton bileşenleri hakkında temel bilgiler verilerek, bu malzemelerin KSB üretimindeki etkinlikleri açıklanmaktadır.

Uygun bir KSB karışım oranı ayarlamak için aşağıdaki hususlara dikkat etmek gerekir:

- Çimento ve mineral katkı oranı iyi ayarlanmalı, su/toz oranı sınırlanmalı, uygun tip bir süper akışkanlaştırıcı ve gerekiyorsa viskozite ayarlayan bir katkı kullanılmalıdır. Böylece çimento ve mineral katkı hamurunun akıcılığı ve viskozitesi ayarlanmış ve dengelenmiş olur ki, bu da KSB'

da aranan doldurma yeteneği, engellerin arasından geçme yeteneği ve ayrışmaya karşı direnç gibi şartları sağlamaktadır.

- Dayanım gibi sıcaklık artışını ve termal büzölme çatlaklarını kontrol etmek için toz muhtevası, çimentoyla birlikte kabul edilebilir bir düzeyde ve büyük bir oranda Tip I ve Tip II mineral katkılarından (Tablo 2.3) oluşabilir.
- Çimento ve mineral katkı hamuru agregaları destekleyen önemli bir araçtır; bu yüzden tüm agrega yüzeylerini yeterince kaplamaları için, hacmi agregadaki boşluk hacminden çok daha fazla olmalıdır. Bu da KSB’ un akma yeteneğini artırır ve agregaların birbirine sürtünmesini azaltır.
- Kaba agregaların tüm yüzeylerinin harç tarafından tamamen sarılması amacıyla, karışımındaki kaba agrega/ince agrega oranı azaltılmalıdır. Bu, betonun dar açıklıklar veya sık donatılar boyunca akması sırasında agregaların birbirine kenetlenmesini ve topaklaşmasını azaltır ve böylece KSB’ un, engellerin arasından geçme yeteneğini artırır.

KSB’ ların karışım oranları geleneksel vibrasyonla sıkıştırılan betonla karşılaştırıldığında řu hususlar öne çıkmaktadır:

- Karışımındaki kaba agrega miktarı daha azdır
- toz hamuru muhtevası çok fazladır
- Su/toz oranı düşüktür
- Süper akışkanlaştırıcı miktarı fazladır
- Bazen viskozite ayarlayan bir katkı kullanılır

KSB’ lar için karışım oranlarını veren bir standart metot henüz yoktur, ancak birçok akademik kuruluş ve hazır beton firmaları kendi karışım oranlarını geliştirmiştir. Karışım tasarımları, agregalar arasındaki boşlukların tamamen doldurulma gereksiniminin öneminden dolayı genellikle hacim parametresini kullanır.

EFNARC tarafından önerilen KSB karışım oranları Tablo 2.2’ de özetlenmiştir:

Tablo 2.2 EFNARC’a göre KSB karışım oranları

Muhteva	Kütle olarak oran (kg/m ³)	Hacim olarak oran (litre/m ³)
toz	380 - 600	–
toz hamuru	–	300 - 380
Su	150 - 210	150 - 210
Kaba agrega	750 - 1000	270 - 360
İnce agrega (kum)	Toplam agrega ağırlığının 48 – 55%’i	
Su/toz oranı (hacim olarak)	0.85 – 1.10	

2.3.1 Çimento Seçimi

Çimento tipi açısından dayanım ve dayanıklılık kriterleri dikkate alınarak seçim yapılmalıdır. Özellikle çimentonun C_3A oranı % 10'un üzerindeyse, kullanılmaması EFNARC Komitesi [11], tarafından tavsiye edilmektedir. Yüksek C_3A oranı, hızlı etrenjit oluşumu ve hidrasyon ısı artışından kaynaklanan su buharlaşması nedenleriyle işlenebilirlik kaybına sebep olacağından, taşıma ve yerleştirme sırasında betonun kendiliğinden sıkışabilirlik özelliklerini hızla kaybetmesine sebep olur. Kimyasal etkiler, özellikle sülfat saldırısı açısından da C_3A 'sı fazla çimento kullanmak sakıncalıdır.

KSB' da çimento dozajının belirlenmesinde temel kriter dayanım sınıfıdır. Puzolanik filler kullanılması halinde, göreceli olarak daha düşük çimento dozajları yeterli olacaktır. Dayanım ve dayanıklılık açısından çimento dozajının $350 - 450 \text{ kg/m}^3$ arasında seçilmesi tavsiye edilmektedir. 500 kg/m^3 'ün üstünde kullanımı rötreyi arttıracığından tavsiye edilmez. 350 kg/m^3 'ün altında kullanımı ise, ilave fillerle veya viskozite arttırıcı kimyasal katkılarla birlikte kullanılması halinde uygundur. Eğer viskozite ayarlayıcı kimyasal katkı kullanılmıyorsa, KSB' da toplam toz madde miktarı hiçbir zaman 500 kg/m^3 'ün altına inmemelidir. Çimento dozajının bu miktarın altında olması durumunda, ilave toz katkıları kullanılabilir [11].

Hem ekosistemi korumak hem de endüstri atıklarını değerlendirmek için teknik açıdan mümkün olan en düşük çimento dozajı ile en fazla miktarda kireç taşı tozu, uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb., toz malzemeyi birlikte kullanmak gerekir [37].

2.3.2 Agrega Seçimi

Agrega mineralojik köken açısından normal betonda kullanılabilecek özellikte olmalıdır. Kırma kireçtaşı iri agregası olarak kullanılabilir. Doğal kum, kırma kuma göre işlenebilirlik açısından avantajlıdır. Aynı şekilde iri agregası olarak dere çakılı kullanılması iç sürtünmeyi azalttığı için akışkanlığı artırır [11].

Agrega açısından taze betonun kendiliğinden sıkışabilirliğini etkileyen en önemli parametre iri agregası/kum oranıdır. İçsel sürtünme katsayısını azaltmak için bu oran mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır [38]. Geleneksel betona göre daha çok kum ve daha az iri agregası kullanımı donatılar arasından geçiş yeteneğini de artırır [39]. Ancak iri agregası oranının azalması basınç dayanımını da bir miktar azaltır. Bu konuda Fang vd.'nin [40] yaptığı çalışmaya göre karışımdaki kum oranı arttıkça yayılma çapı da artmaktadır. Basınç dayanımı belli bir orandan sonra düşüş göstermektedir.

Dolayısıyla, kum oranının toplam hacmin % 45 - 48'i arasında tutulması halinde kendiliğinden sıkışabilirliğin en yüksek dayanımda sağlanacağı sonucuna varılmıştır.

KSB' da kullanılacak agrega gradasyonu mümkün olduğunca ince seçilmelidir. EFNARC Komitesi'ne göre [11], kesikli gradasyon iç sürtünmeyi azaltıp, akışı kolaylaştırdığından sürekli gradasyona tercih edilmelidir.

Prefabrike KSB uygulamalarında kum miktarını arttırmak, yüksek yayılma değerine sahip karışımların stabilitesini korumasında ve kalıp yüzeyi kalitesi artışı açısından yararlı olmaktadır [41].

Genel olarak kübik veya küre şekilli agregalar tercih edilmelidir. Uzun silindir ve yassı disk şekilli taneler KSB' un işlenebilirlik özelliklerini olumsuz etkileyeceğinden bunların miktarının sınırlandırılmasında yarar vardır [26].

KSB' da en büyük agrega çapı için farklı görüşler mevcut olup, genel görüş, taze betonun donatılar arasından geçiş yeteneği de dikkate alınarak agrega en büyük tane çapının azaltılmasından yanadır. Üst sınır 16 - 20 mm arasındadır. Ancak kütle betonu gibi özel durumlarda viskozite arttırıcı katkı kullanımıyla ek tedbirler alınarak en büyük agrega çapı 40 mm'ye kadar çıkan KSB tasarımları kullanılmıştır (Akashi Koikyo Köprüsü) [25].

KSB' un özellikleri, agrega nem içeriği değişiminden etkileneceğinden agreganın nem içeriği mutlaka belirlenmeli ve tasarıma yansıtılmalıdır. Agrega yüzey neminden kaynaklanan su fazlalığının olumsuz etkisi geleneksel betonda emniyet paylarıyla engellenebilir. Örneğin, çimento dozajını bir miktar yükseltmek tasarımda güvenlik sağlamak için yeterli olacaktır. Fakat KSB' da su fazlalığı karışımın reolojik özelliklerini kaybetmesine sebep olmaktadır. KSB bu açıdan bakıldığında agrega nemine çok hassastır. Özellikle su emmesi yüksek olan; uçucu kül agregası, pomza kumu, vb. malzemeler kullanılması halinde tasarımda ek önlemler alınmalıdır. Agrega nemi laboratuvar ortamında tespit edilerek deneysel çalışmalarda kolaylıkla dikkate alınabilmektedir. KSB üreten santrallerde de bu işlem hassas bir şekilde yapılmalıdır.

2.3.3 Mineral Katkı Seçimi

KSB' larda toz maddeler, 0.125 mm' den daha küçük her türlü inorganik madde olarak tanımlanabilir. Toz maddeler KSB' da viskozite arttırmak amacıyla kullanılırlar. Parçacık boyutunun küçülmesi parçacıklar arası etkileşimin artmasına sebep olur ve bu etkileşim viskoziteyi artırır.

Toz madde kullanımı, karışımın katı iskeletini zenginleştirir ve malzemeyi daha kompakt hale getirir. Harcın agregaları daha iyi sarmasını sağlar. Toz malzeme oranının 400 ila 650 kg/m³ arasında olması, kum ve agrega tanecikleri arasındaki boşlukların doldurulması ve daha iyi sıkışma sağlanması için önerilmektedir. Toz malzemenin doldurma kapasitesini arttırmak için eş boyutlu, çok küçük çaplı öğütülmüş halde kullanılması mümkündür [38].

Toz malzemeler için gerek mineralojik ve kimyasal köken, gerekse reaktivlik açısından bir sınıflandırma EFNARC Komitesi [11] tarafından yapılmıştır (Tablo 2.3).

Tablo 2.3 EFNARC' a göre mineral katkı sınıflandırılması

Tip I	Etkisiz ya da yarı etkisiz	– Mineral filler (kireçtaşı tozu, dolomit, vb.) – Pigmentler
Tip II	Puzzolanik	– TS EN 450'ye uygun uçucu kül – TS EN 13263'e uygun silis dumanı
	Hidrolik	– Standartlara uygun Yüksek fırın cürufu

2.3.3.1 Mineral Filler

KSB tasarımında ince öğütülmüş (Blaine değeri > 2500 cm²/g) kireçtaşı tozu, granit, kuvarz kumu kullanılabilir. Bu tozların etkinliği incelidikçe artar. Dolomit kökenli kireçtaşı tozu ince öğütülmesi halinde, reaktivliği arttığından alkali karbonat reaksiyonuna yol açabilir. Bu nedenle kullanımı riskli olabilir.

Kireç taşı tozunun beton karışımında homojen dağılması sağlanmazsa, dayanım ve dayanıklılık açısından olumsuz etkiler oluşturabilir. Kireç taşı tozu elektrostatik olarak negatif, kum ve iri agrega pozitif yüklü olduğundan agrega yüzeyine yapışır. Bu yapışmayı engellemek için, malzemelerin karıştırma sırasına ve yöntemine dikkat etmek gerekir. Mikro yapı incelemesi ile yapılan çalışmalarda en iyi ince kesit görüntüsü, önce çimento ve taş tozunun karıştırılıp, sonra agreganın ilave edildiği durumda elde edilmiştir [42].

Öğütücü tipine de bağlı olmakla beraber genel olarak granit tozu, mikro yapısı incelendiğinde kireçtaşı tozuna kıyasla daha çok kusurlu mikro tane içerir. Bu açıdan kireçtaşı tozu tercih edilmelidir.

Kireç taşı tozu ile üretilen KSB, diğer puzzolanik maddelerin kullanıldığı KSB' lara kıyasla, kür işlemine daha az hassastır. Pürüzlü mikro yüzeyi nedeniyle, yüksek oranda karışım suyu

absorbe etmesi ve erken dayanımı hızlandırıcı etkisi sebepleriyle küre hassasiyetinin azaldığı, kabul edilebilir [43].

Kireç taşı tozunun, betonun dayanım kazanma hızına etkisi üç mekanizma [42] ile açıklanmaktadır:

- 1- CSH oluşumuna uygun çekirdek oluşturarak hidratasyon reaksiyonlarını hızlandırır.
- 2- Özellikle C_3A sını yüksek çimentolarla reaksiyona girip bağlayıcı özelliği olan karboalüminat oluşturur.
- 3- İnceliği arttıkça hidratasyonu hızlandırır ve erken dayanımı artırır, fakat nihai dayanımda değişiklik meydana gelmez

2.3.3.2 Uçucu Kül

Elektrik enerjisi üretimi için, termik santrallerde yakıt olarak kullanılan pulverize kömür, çok ince olarak öğütülüp havayla birlikte buhar üretici kazanları ısıtmak amacıyla yakıt olarak püskürtülür. Pulverize kömürün yanmasıyla büyük miktarı çok ince olan kül tanecikleri ortaya çıkmaktadır. Çok ince olan bu kül tanecikleri yakıt gazlarıyla birlikte bacadan uçarak hareket etmektedir. Atık malzeme olarak gazlarla birlikte uçarak bacadan dışarı çıkan bu çok ince taneli küllere uçucu kül denilmektedir.

Gazlarla birlikte dışarı çıkan ve çevreye büyük miktarda zarar vermesi kaçınılmaz olan bu uçucu küller, elektrostatik veya elektromekanik yöntemlerle tutularak silolarda depolanmaktadır.

Uçucu küller çok yüksek oranlarda SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içermektedir. Bunlardan başka bir miktar CaO , MgO , C (çok ince taneli yanmamış kömür) ve Na_2O da içermektedir. Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları ve çok ince taneli oldukları için uçucu küller, puzolanik özellik göstermektedirler ve sulu ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek hidrolik bağlayıcı gibi davranmaktadırlar [44].

Uçucu kül, taş tozuna kıyasla düşük eşik kayma gerilmesi değeriyle daha yüksek viskozite elde edilmesini sağlar [45]. KSB viskozitesini arttırmada etkili bir fillerdir. Atık bir malzeme olması özellikle termik santrallere yakın bölgelerde kullanımını avantajlı hale getirmektedir.

Uçucu külün KSB’ da kullanımının yararları şunlardır:

- 1- Hidratasyon ürünlerini artırır ve betonun porozitesini azaltır. Mikro agrega etkisi yaparak gradasyonu düzenler ve optimum sıkışmayı sağlar. Böylece betonun dış etkilere karşı dayanıklılığı artar.

- 2- Hidratasyon hızını ve ısını ve ısısını düşürür. Sıcaklık yükselmesinden doğan su kaybını ve çatlakları azaltır. Fakat priz alma süresini geciktirmesi erken dayanımı olumsuz etkiler [46].
- 3- KSB' un viskozitesini arttırarak ayrışmaya karşı direnç sağlar.
- 4- Normal betona kıyasla aynı dayanımı elde etmek için, gerekli çimento miktarını azaltarak ekonomik fayda sağlar. Aynı zamanda atık bir ürün değerlendirildiği için ilave ekonomik ve çevresel yararları hesaba katılmalıdır [47].

2.3.3.3 Silis Dumanı

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretiminde, yüksek saflıktaki kuvars, elektrik fırınlarında yaklaşık 2000°C sıcaklıkta kömür yardımıyla indirgenmeye tabi tutulmaktadır. Üretim işleminde çok büyük miktarı SiO' dan oluşan gazlar çıkmaktadır. Gaz halindeki SiO' nun, fırının soğuk bölgelerinde havayla temas etmesiyle ve çok çabuk yoğunlaştırılmasıyla, gazın içerisindeki SiO, amorf yapıya sahip SiO₂ durumuna dönüşmektedir.

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutulmasıyla yoğunlaştırılması sonucu elde edilen %85-%98 kadar silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye silis dumanı adı verilmektedir.

Silis dumanındaki %85' in üzerindeki SiO₂' nin yanı sıra başka maddeler de bulunabilmektedir. Tablo 2.4 ABD, Norveç ve Türkiye' de üretilen silis dumanlarının kimyasal bileşenlerini vermektedir [44].

Tablo 2.4 Silis dumanlarının kimyasal bileşenleri, %

İçerik	ABD	Norveç	Türkiye
SiO ₂	90.0–93.0	90.0–96.0	93.0–95.0
C	1.3–2.6	0.5–1.4	0.8–1.0
Fe ₂ O ₃	0.4–0.7	0.2–0.8	0.4–1.0
Al ₂ O ₃	0.5–1.6	0.5–3.0	0.4–1.4
MgO	0.3–0.5	0.5–1.5	1.0–1.5
CaO	0.5–0.8	0.1–0.5	0.6–1.0
Na ₂ O	0.1–0.3	0.2–0.7	0.1–0.4
K ₂ O	1.0–1.2	0.4–1.0	0.5–1.0
S	0.1–0.2	0.1–0.4	0.1–0.3
(kızdırma kaybı)	1.4–2.8	0.7–2.5	0.5–1.0

Silis dumanı, amorf yapıya sahip çok ince taneli ve yüksek oranda SiO₂ içeren bir malzeme olduğundan, mükemmel derecede puzolanik özellik gösterir ve sulu ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek mükemmel bir hidrolik bağlayıcılık sergiler. Diğer puzolanik toz maddeler gibi,

amorf yapısı nedeniyle kalsiyum silika hidrat (CSH) oluşturuucu çekirdekler meydana getirir. Çekirdeklerde ilave kristal yapısı oluşumuna katkıda bulunarak prizi hızlandırır ve erken dayanımı dolaylı yoldan artırır [38]. Puzolanik reaksiyon hızı da diğer puzolanlara göre yüksektir [48]. Aynı uçucu kül ve diğer puzolanlar gibi C_3S ve C_2S hidratasyonundan gelen serbest kireci bağlar ve ilave CSH oluşumuna neden olur. Buradaki CSH yapısı normal çimento hidratasyonundan oluşan CSH yapısından farklıdır.

Silis dumanı genellikle beton katkı malzemesi olarak kullanılır. Çok ince taneli olduğundan ve yüksek oranda SiO_2 içerdiğinden, ilk ve nihai dayanımı yüksek betonların üretiminde kullanılmaktadır. Silis dumanının ne kadar ince taneli olduğunu açıklayabilmek için aşağıda silis dumanının ve bazı malzemelerin özgül yüzeylerine ait değerler verilmektedir [49]:

Silis dumanı	: ~ 200,000 cm ² /gr
Sigara dumanı	: ~ 100,000 cm ² /gr
Uçucu kül	: ~ 4,000–7,000 cm ² /gr
Portland çimentosu	: ~ 3,000 cm ² /gr

Tablo 2.5’ de, silis dumanının beton özelliklerine etkileri özetlenmektedir [44].

Tablo 2.5 Betonda katkı malzemesi olarak kullanılan silis dumanının beton özelliklerine etkisi

Olumlu Etkileri	Olumsuz Etkileri
– Betonda yüksek basınç dayanımının elde edilmesini sağlar. – Taze betondaki terlemeyi ve ayrışmayı azaltır. – Betonun hidratasyon ısını azaltır. – Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltır. – Sertleşmiş betondaki alkali silika reaksiyonunu azaltır. – Sertleşmiş betonun sülfatlara karşı dayanıklılığını artırır.	– Silis dumanı kullanılarak üretilen betonların yüksek miktarda karışım suyu ihtiyacı vardır. Bunu telafi edebilmek için su azaltıcı katkılarla birlikte kullanılmaları gerekmektedir. – Çok ince taneli olduğundan ve terlemeyi azalttığından, betonun yüzeyinin düzeltilmesi işlemi daha zor olabilmektedir. – Silis dumanı kullanılması durumunda, daha çok miktarda plastik büzülme çatlağına yol açabilmektedir. – Silis dumanı, nispeten daha koyu renkli beton elde edilmesine neden olmaktadır.

2.3.3.4 Ögütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Hematit (Fe_2O_3) ve magnetit (Fe_3O_4) gibi demir cevherleri doğada demir oksit olarak bulunmaktadır. Demir cevherlerinde çok az miktarda silis, alümin, kükürt, fosfor ve mangan gibi bazı yabancı maddeler de bulunabilmektedir.

Demir elde edebilmek için demir cevherlerinin, yüksek fırınlarda 1600°C ' ye kadar olan yüksek sıcaklıklarda ısıtılmaları, böylece oksijenden ve yabancı maddelerden arındırılmaları gerekir. Kok kömürünün (Karbon) yakıt olarak kullanıldığı bu fırınlarda, arıtma işlemine yardımcı olabilmesi amacıyla kalker taşı da demir cevheriyle birlikte ısıtılmaktadır. Yüksek sıcaklığın etkisiyle kok kömüründeki karbon ile demir oksitteki oksijen birleşerek karbon monoksit ve karbon dioksit gazlarını oluşturmakta ve bu gazlar da fırını terk etmektedir. Fırının içinde eriyik durumda kalan demir, yoğunluğu diğerlerinden fazla olduğu için fırının en alt bölümünde; eriyik durumda olan CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , MnO , S gibi yabancı maddeler de demirin hemen üzerinde yer almaktadır. Demir ve diğer yabancı maddeler ayrı ayrı çıkışlardan dışarı alınmaktadır. Bu yabancı maddeler topluluğu, yüksek fırın cürufu olarak isimlendirilmektedir.

Yüksek fırınlardan atık malzeme olarak elde edilen ve eriyik durumda bulunan cüruf, su içerisine dökülerek veya basınçlı su püskürtülerek hızlı olarak soğutulursa irili ufaklı kum taneleri boyutunda granüle bir hal alarak büyük oranda amorf bir yapı kazanmaktadır. Bu amorf yapıya sahip olan ve yüksek miktarda SiO_2 ve Al_2O_3 içeren granüle yüksek fırın cürufu, çok ince öğütülerek doğal puzolan olarak kullanılmaktadır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu uçucu küllerin puzolanik özelliklerine benzer bir özellik gösterirler. Ayrıca yüksek oranda CaO içermesi sebebiyle, kendiliğinden de bir miktar bağlayıcı özelliğe sahiptir.

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu, KSB' da viskozite arttırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Cüruf kullanımı demir-çelik fabrikasına yakın bölgelerde ekonomik olmaktadır.

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun beton özelliklerine olumlu ve potansiyel zararlı etkileri Tablo 2.6' de verilmektedir [44].

Tablo 2.6 Betonda katkı malzemesi olarak kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun beton özelliklerine etkisi

Olumlu Etkileri	Olumsuz Etkileri
– Taze betondaki işlenebilirliği artırır. – Taze betonun priz süresini uzatır. – Betondaki terlemeyi azaltır. – Betonun hidrasyon ısısını azaltır. – Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltır. – Sertleşmiş betonun sülfatlara karşı dayanıklılığını artırır.	– Betonun özellikle soğuk havalarda daha geç priz almasına yol açar. – Betonda belirli miktarda sürüklenmiş hava elde edebilmek için daha çok miktarda hava sürükleyici katkı malzemesinin kullanılmasını gerektirir. – Betonun ilk günlerdeki dayanım kazanma hızını azaltır.

2.3.4 Süper Akışkanlaştırıcı Seçimi

KSB üretiminde yüksek işlenebilirlik ve ayrışmaya karşı yüksek direnç sağlamak gibi birbirinin tersi iki koşul bir arada sağlanmalıdır. Bu da ancak etkili bir kimyasal akışkanlaştırıcı kullanımıyla mümkün olabilir [50].

Kimyasal katkılar; akışkanlaştırıcı, hava sürükleyici, hava uzaklaştırıcı, priz kontrol edici ve viskozite arttırıcı olmak üzere beş ana grupta toplanabilir.

KSB tasarımında akışkanlaştırıcılardan beklenenler, üç grupta toplanabilir [51]:

- 1- Su azaltmada ve akışkanlık sağlamada etkinlik.
- 2- Diğer kimyasal katkılarla uyumluluk, priz ayarlayıcı özellikleri sağlama.
- 3- İşlenebilirlik ihtiyacını sağlama (istenen sürede akışkanlığını koruma).

Kimyasal katkılar ile çimento arasındaki etkileşim fizikseldir. Katkısız çimento hamuru, karma oksitlerinin elektro-potansiyellikleri gereği, birbirlerini elektrostatik etkiyle çekerek kümelenir. Çimentodaki karma oksitlerin oranı bu etkiyi arttırır veya azaltır. C_3S ve C_2S negatif zeta potansiyeline sahipken, C_3A ve C_4AF pozitif zeta potansiyeline sahiptir. Bu da çimento taneciklerinin su veya nem ile temas ettiğinde topaklaşmasına sebep olur. Katkı ilavesi ile tüm çimento karma oksitlerinin negatif zeta potansiyeline sahip olduğu deneysel olarak ortaya konulmuştur [52, 53]. Tüm bileşenlerin negatif yüklenmesi topaklaşmayı önler.

Akışkanlaştırıcı katkılar eşik kayma gerilmesini ve plastik viskoziteyi azaltırlar. Plastik viskoziteyi azaltıcı etkileri yüksek S/Ç oranlarında daha belirgindir. Yüksek S/Ç oranında çok küçük miktarda katkı ilavesi dahi viskoziteyi hızla düşürerek ayrışmaya sebep olabilir. Düşük su/çimento oranlarında katkı ilavesinin akışkanlığı arttırıcı etkisi daha yavaştır. Örneğin, S/Ç oranı 0.65 olan bir karışıma çimento ağırlığının % 1'i kadar polimer bazlı bir kimyasal katkı ilavesi

yapıldığında, karışımın viskozitesi yarı yarıya azalırken, S/Ç oranı 0.45 olan bir karışıma aynı katkı ilavesi viskoziteyi % 10 - 15 oranında azaltır. Bu açıdan bakıldığında akışkanlaştırıcılar düşük S/Ç oranlarında viskoziteyi çok azaltmadan eşik kayma gerilmesini azaltmakta etkilidir [54].

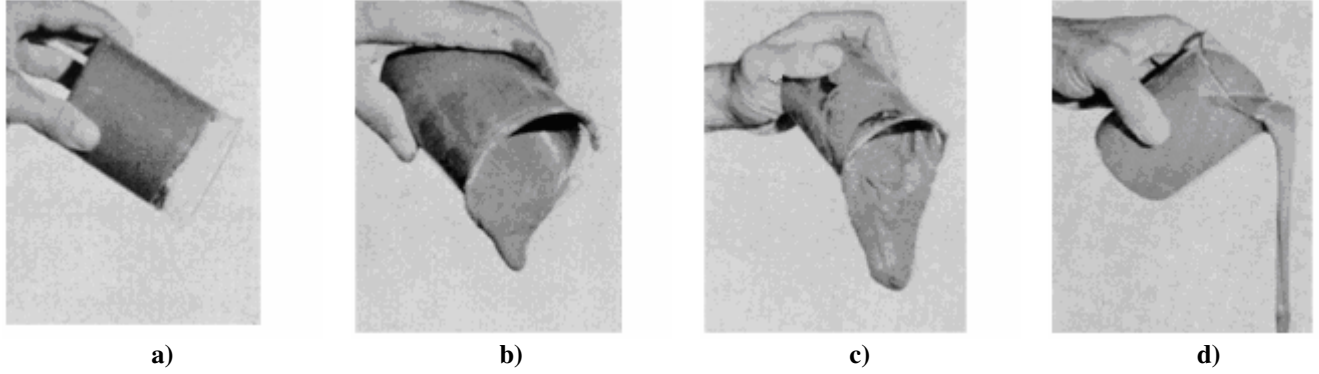
Son 30 yılda akışkanlık sağlama ve su azaltma amaçlı en yaygın kullanılan kimyasal katkıları; melamin, naftalin formaldehit kondensatları, modifiye lignosulfonatlar ve suda çözülebilen sentetik polimerlerdir.

KSB üretiminde, naftalin sülfonat formaldehit (SNF), melamin sülfonat formaldehit (SMF) polikondanseleri, vinil kopolimerler ve polikarboksilik asit bazlı katkıları kullanılabilir [36]. Ancak polikarboksilik asit bazlı katılara göre, diğer katkıların kullanıldığı betonların su ihtiyaçlarının göreceli olarak fazla olması, bu tip betonlar için istenilen akıcılıkta beton üretilmemesine yol açabilmektedir. Bu nedenle daha çok polikarboksilik asit bazlı katkıları tercih edilmektedir.

Yeni nesil süperakışkanlaştırıcılar olarak da isimlendirilen polikarboksilik asit bazlı katkıları kullanıldığında, çimento taneciklerinin beton içerisindeki dispersiyonu (dağıtılması) yalnızca elektiriksel itki ile değil, aynı zamanda uzun yan dallar içeren polimer zincirlerinin çimento tanecikleri çevresinde birbirini iten fiziksel bir itki oluşturması ile de sağlanır [36].

Gürol [55], polikarboksilat bazlı katkıların çimentoya etkisini şöyle açıklamaktadır: Katkı, dispersiyon etkisi ile topaklaşmayı önler, hidrasyona giren çimento miktarı artar, topaklar arasına hapsolme potansiyeli olan su molekülleri serbest kalarak işlenebilirliği artırır ve hidrasyona katılır.

KSB tasarımında kullanılan polikarboksilat bazlı katkıların, modifiye lignosulfonatlar, melamin ve naftalin formaldehit kondensatlarına göre akışkanlığı artırma açısından önemli üstünlükleri vardır. Şekil 2.1 a), b), c) ve d)' de görülen çimento hamuru karışımlarının tümünün S/Ç oranları eşittir [a): Sadece su ve çimento, b): Hamura % 0.4 Lignosülfonat ilavesi yapıldığında görülen akışkanlık, c): % 0.8 Melamin formaldehit bazlı katkı ilavesiyle görülen akışkanlık, d): % 0.8 Polikarboksilat bazlı katkı ilavesiyle görülen akışkanlık].



Şekil 2.1 Kimyasal katkı tipinin akışkanlık artırıcı etkisi.

Şekil 2.1-c) ve d)’de görüldüğü gibi, aynı dozajda katkı kullanımında polikarboksilat bazlı katkılar akışkanlığı arttırmada daha etkilidirler. Şekil 2.1-b)’de görülen lignosülfonat bazlı katkının dozajının % 0.4’de tutulmasının sebebi daha yüksek dozajlarda bu katkının priz geciktirici özelliğinin bulunmasıdır [29].

3.4 Kendiliğinden Sıkışan Betonun Reolojisi

KSB’ da taze durumdaki en önemli özellik olan işlenebilirlikle ilgili farklı tanımlar yapılmaktadır. İşlenebilirliği en iyi ifade eden Tattersal’ın işlenebilirlik tanımı, “Betonun kalıp içinde akarak, sık donatılar arasından geçme yoluyla, mümkün olan en küçük hacmi dolduracak şekilde sıkışması veya taşıma sırasında özelliklerini koruması” şeklindedir [56].

Kosmatka ve arkadaşları işlenebilirlik, kıvam ve plastik hal gibi beton reolojisi ile ilgili kavramları aşağıdaki gibi tanımlamışlardır:

- 1- İşlenebilirlik, betonun ne kadar kolay veya güçlükle yerleşebildiği ve perdahlanabildiğinin bir ölçüsüdür.
- 2- Kıvam, taze betonun akma kabiliyetinin bir ölçüsüdür.
- 3- Plastisite, betonun kalıba kolay yerleşebilirliğinin bir göstergesidir.

Bir taze beton karışımının kendiliğinden sıkışan özellikte olabilmesi için düşük eşik kayma değerine ve optimum viskoziteye sahip olması gereklidir. Newtonyen sıvılarda eşik kayma gerilmesi sıfırdır. Kendiliğinden sıkışabilirlik için eşik kayma gerilmesinin mümkün olduğunca sıfıra yakın olması amaçlanmalıdır. Optimum viskozitenin belirlenmesi, malzeme parametreleri ve karışım oranlarıyla yakından ilişkilidir. Optimum viskozitenin altına inilirse betonun stabilitesi bozulacak ve ayrışma başlayacağından beton homojenliğini yitirecektir. Bu durumda iri agreg

hamurdan ayrılarak kümelenir ve pompalama sırasında tıkanma meydana gelir. Optimum viskozitenin üstüne çıkılırsa betonun kıvamı aşırı artacağından yerleştirmede sıkıntılar yaşanır. Sıkışık hava boşluğu riski artar. Pompa betonlarında kohezif yapıdan dolayı aşırı zorlanma ve tıkanma oluşabilir. Her iki durum da tehlikeli sonuçlar oluşturmaktadır. Çözüm eşik kayma gerilmesini, karışım suyunu fazla arttırmadan akışkanlaştırıcı kullanarak azaltmaktır. Aynı zamanda ister istemez viskozitede de düşüş meydana gelir. Viskoziteyi optimum değere çekebilmek için viskozite arttırıcı malzemelerin kullanılması gerekir.

KSB' un reolojisi; malzeme parametreleri dışında, karıştırıcı tipi (ne kadar hava sürükleneceğiyle ilgili), malzemelerin karışıma ilave edilme sırası (karışım prosedürü), karıştırma süresi ve sıcaklık gibi değişkenliklerden de etkilenir [11].

KSB' un karıştırma süresi normal betona kıyasla iki - üç kat arttırılmalıdır. Bunun sebebi akışkanlaştırıcının performansına ve KSB' un reolojisine bağlanmaktadır. Kimyasal katkının ilave zamanlaması da önem taşımaktadır. Katkı ve karışım suyu ilavesi geciktirildikçe işlenebilirlik kaybı azalmaktadır. Katkı ilavesinin geciktirilmesi, hidrasyonla çimento taneleri üzerinde oluşan yeni yüzeylerin katkı ihtiyacının karşılanması açısından olumlu bir yöntemdir. Bu amaçla, yürütülen çalışmamızda da kimyasal katkı (akışkanlaştırıcı) karışım suyunun 1/3' ü ile birlikte karışıma en son katılarak geciktirme işlemi gerçekleştirilmiştir.

2.5 EFNARC' a göre Kendiliğinden Sıkışan Beton için İşlenebilirlik Deney Yöntemleri

KSB' un taze özelliklerini ölçmek ve belirlemek için çok sayıda deney metodu geliştirilmiştir. Tablo 2.7' de özellik tesbit etmeye göre gruplandırılmış en yaygın olan deney yöntemleri listelenmektedir. Avrupa'da en yaygın kullanılan yöntemler çökme-yayılma, T_{500} , V-hunisi, L-kutusu ve Elek ayrışma deneyleridir [11].

Hiçbir deney yalnız başına tüm anahtar parametreleri belirleyemez, bu yüzden bir KSB karışımı tasarlayabilmek için bu deneylerin birleşimi gerekmektedir. EFNARC Komitesi de, KSB tasarımı için bu beş deney yöntemini önermektedir.

Tablo 2.7 KSB tasarımında kullanılan deney yöntemleri

Özellik	Deney Metodu	Ölçülen değer
Akıcılık/doldurma yeteneği	Çökme-yayılma	Toplam yayılma
	Kajima kutusu	Görsel doldurma
Viskozite/akıcılık	T ₅₀₀	Akma zamanı
	V-hunisi	Akma zamanı
	O-hunisi	Akma zamanı
	Orimet	Akma zamanı
Engeller Arasından Geçme yeteneği	L-kutusu	Geçme oranı
	U-kutusu	Yükseklik farkı
	J-halkası	Adım yüksekliği, toplam akma
	Kajima kutusu	Görsel geçme yeteneği
Ayrışma direnci	Penetrasyon	Derinlik
	Elek ayrışma	Laitance yüzdesi
	Oturan kolon	
Laitance: Karışım suyunun çok kullanılması durumunda suyun yukarı doğru hareketi nedeniyle taze beton yüzeyi üzerinde ince malzemenin birikmesi		

KSB' ların kendiliğinden sıkışabilirlik sınır değerleri, önerilen taze beton deney yöntemlerinden faydalanarak elde edilen sınıflandırmalara göre EFNARC Komitesi tarafından tespit edilmiştir. Bu sınıflandırmalar aşağıdaki gibi özetlenmektedir:

Çökme-yayılma değeri, taze betonun akıcılığını tanımlayabilir. Deney boyunca yapılan gözlemler ve T₅₀₀ ölçümü, ayrışma direnciyle ilgili bilgi de verebilir. Viskozite sınıfı, çökme-yayılma deneyinden T₅₀₀ zamanı veya V-hunisi deneyinden akma zamanı ile belirlenebilir. Elde edilen zaman değeri KSB' un viskozitesini ölçmez, fakat onun akma oranını tanımlamaya yardımcı olur. Düşük viskoziteli beton akmaya hızlı başlar ve durur. Düşük ya da yüksek olsun beton viskozitesi, sadece özel durumlarda belirlenmelidir Ancak çökme-yayılma deneyinden T₅₀₀ zamanını kaydetmek, üniform betonlar elde etmek için yararlı olabilir. Engeller arasında geçme, taze beton karışımının herhangi bir ayrışmaya, üniform yapısında herhangi bir bozulmaya ve topaklaşmaya uğramadan yoğun donatıların olduğu dar alanlar boyunca akabilme yeteneğidir. Engeller arasında geçme yeteneğini tanımlarken; donatının geometrisi ve yoğunluğunu, betonun akma ve doldurma yeteneğini ve maksimum agrega dane çapını göz önünde bulundurmak gerekir. Bu sınıflandırma yapılırken betonun akacağı alandaki en küçük açıklık dikkate alınmaktadır. Ayrışma direnci ise, homojen ve kaliteli bir beton elde etmek için temel bir ölçüttür. KSB, yerleştirme sırasında, hatta yerleştirmeden sonra da ayrışmaya uğrayabilir. Özellikle uzun ve ince döşeme türü elemanlarda yerleştirmeden sonra ayrışma meydana gelebilir; bu da çatlama veya zayıf yüzey gibi kusurlar meydana getirebilmektedir. KSB uygulamaları için Tablo 2.8' de taze beton deney yöntemlerine göre yapılan sınıflandırmalar verilmiştir.

Tablo 2.8 Taze beton deney yöntemlerine göre yapılan sınıflandırma

Sınıf	Çökme-yayılma (mm)	T ₅₀₀ (sn)	V-hunisi zamanı (sn)	Geçme yeteneği	Ayrışma direnci (%)
Çökme-yayılma sınıfı					
SF1	550 ~ 650				
SF2	660 ~ 750				
SF3	760 ~ 850				
Viskozite sınıfı					
VS1/ VF1		≤ 2	≤ 8		
VS2/ VF2		> 2	9 ~ 25		
Dar engeller arasından geçme sınıfı					
PA1				≥ 0,80 2 çubuklu	
PA2				≥ 0,80 3 çubuklu	
Ayrışma direnci sınıfı					
SR1					≤ 20
SR2					≤ 15

Çökme-Yayılma Sınıfları:

- SF1 (550-650 mm) sınıfı aşağıdaki şekilde dökülen betonlar için uygundur: Üstten serbest olarak dökülen donatısız veya çok az donatılı beton yapılar, bir pompa püskürtme sistemi yardımıyla dökülen betonlar (tünel kaplamaları gibi) ve yatay doğrultudaki akışı önleyecek kadar küçük kesitli betonlar (kazıklar ve bazı derin temeller gibi) için uygundur.
- SF2 (660-750 mm) sınıfı birçok normal KSB uygulamaları için (duvarlar ve kolonlar gibi) uygundur.
- SF3 (760-850 mm) sınıfı, betondaki maksimum agrega dane çapı 16 mm'den daha az olan çok komplike yapılar için uygundur. SF3 sınıfı, yüzeyi çok düzgün olan betonlar elde edilmesini sağlar; ancak bu betonun ayrışma direncini kontrol etmek çok zordur. Eğer çok düzgün yüzeyler elde etmek için çökme-yayılma değeri olarak 850 mm ve üstü hedeflenmişse, ayrışma direnci kontrol altına alınmalıdır ve betonda kullanılan maksimum agrega dane çapı 12 mm alınmalıdır.

Viskozite Sınıfları:

- VS1/VF1 sınıfı dar kesitlerde bile iyi doldurma yeteneğine sahiptir. Kendi kendine seviyelenme çok iyi olduğu için pürüzsüz yüzeyler elde etmek için de iyidir. Ancak ince malzemeyi kuma ve ayrışma ihtimali daha yüksektir.
- VS2/VF2 sınıfının üst limiti yoktur, ancak akma zamanının artmasıyla tiksotropik (viskozitedeki zamana bağlı değişim) etkilerin sergilenme olasılığı da artar. Bunu önlemek için kalıp basıncını ya da ayrışma direncini sınırlandırmak gerekir.

Dar Engeller Arasından Geçme Sınıfları:

- _ PA1 sınıfı 80~100 mm donatı aralıklı yapılar (konut ve düşey yapılar gibi) için uygundur.
- _ PA2 sınıfı 60~80 mm donatı aralıklı yapılar (inşaat mühendisliği yapıları) için uygundur.
- 60 mm’ den küçük aralıklı kompleks yapılar için tekrar bir sınıflandırma yapmak gerekebilir.

Ayrışma Direnci Sınıfları:

- SR1 sınıfı genellikle ince döşemeler için ve 5 m’ den daha az bir akma mesafesi ve 80 mm’ den daha büyük sınırlı aralığı olan düşey uygulamalar için uygundur.
- SR2 sınıfı akma sırasında ayrışmayı kontrol altına almak için 5 m’ den daha az bir akma mesafesi ve 80 mm’ den daha büyük sınırlı aralığı olan düşey uygulamalar için uygundur.

Hazır KSB’ lar için uygunluk ölçütü Tablo 2.9’ da verilmiştir [11]:

Tablo 2.9 Hazır KSB’ lar için uygunluk ölçütü

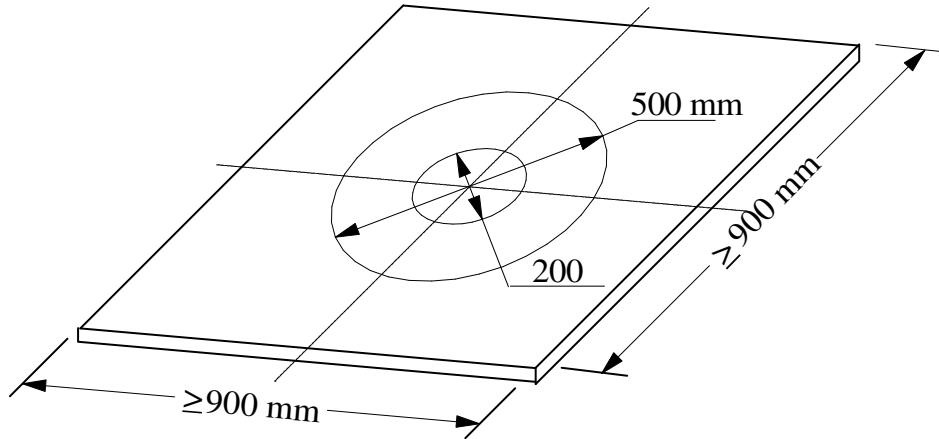
Özellik	Ölçüt
Çökme-yayılma sınıfı SF1	$\geq 520 \text{ mm}, \leq 700 \text{ mm}$
Çökme-yayılma sınıfı SF2	$\geq 640 \text{ mm}, \leq 800 \text{ mm}$
Çökme-yayılma sınıfı SF3	$\geq 740 \text{ mm}, \leq 900 \text{ mm}$
Hedef değer olarak belirlenen Çökme-yayılma sınıfı	hedef değerden $\pm 80 \text{ mm}$
V-hunisi sınıfı VF1	$\leq 10 \text{ s}$
V-hunisi sınıfı VF2	$\geq 7 \text{ s}, \leq 27 \text{ s}$
Hedef değer olarak belirlenen V-hunisi	$\pm 3 \text{ s}$
L-kutusu sınıfı PA1	$\geq 0,75$
L-kutusu sınıfı PA2	$\geq 0,75$
Hedef değer olarak belirlenen L-kutusu	Hedef değer 0,05 aşağısından fazla değil
Elek ayrışma direnci sınıfı SR1	≤ 23
Elek ayrışma direnci sınıfı SR2	≤ 18

2.5.1 Çökme-Yayılma ve T_{500} Zamanı Deneyi

Çökme-yayılma ve T_{500} zamanı, KSB' un, bir engel olmadığında akma oranını ve akabilirliğini belirleyen bir deneydir. Çökme deneyi TS EN 12350-2' ye göre yapılır. Sonuç, KSB' un dolma yeteneğinin bir belirtisidir. T_{500} zamanı da akma hızının ve bu yüzden KSB' un viskozitesinin bir ölçümüdür.

Taze beton, TS EN 12350-2 çökme deneyindeki gibi bir koniye boşaltılır. Koni yukarı çekildiğinde, koninin yukarı çekilmesinden itibaren betonun 500 mm' lik bir çapa yayılma zamanı ölçülür. Bu zaman T_{500} zamanıdır. Betonun en büyük akma yayılma çapı ve ona dik açıdaki yayılma çapı ölçülür. Bu iki ölçümün aritmetik ortalaması çökme-yayılma değerini vermektedir.

Çökme-yayılma deneyi, üzerinde betonun yerleşebileceği, en az 900 mm×900 mm' lik düzlem bir alana sahip yatay bir plaktan oluşan tabla üzerinde yapılır. Plaka düzgün ve pürüzsüz, emici olmayan, minimum kalınlığı 2 mm olan bir yüzeye sahip olmalıdır. Yüzey çimento hamurundan kolayca etkilenmemelidir ve paslanmaya eğilimli olmamalıdır. Plakanın yapısı çarpılmayı, yamulmayı önleyecek tarzda olmalıdır. Zıt kenarların merkezleri arasına düz bir kenar yerleştirildiğinde herhangi bir noktadaki düzlük sapması 3 mm'yi geçmemelidir. Şekil 2.2' deki gibi tabakanın merkezi bir çaprazlamayla işaretlenmeli ve tabakanın merkezinden 200 mm ve 500 mm çapları çizilmelidir (Şekil 2.2).



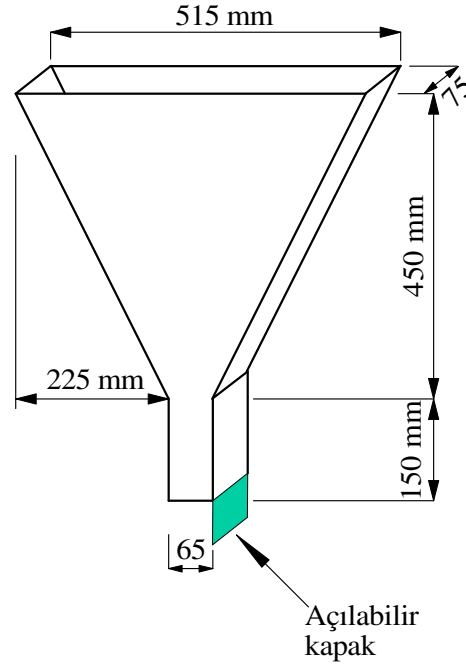
Şekil 2.2 Çökme-yayılma tablası

Deney modeli TS EN 12350-2'ye uygun olmalıdır. Deney şu şekilde yapılır:

- Koni ve tabla TS EN 12350–2' deki tanıma göre hazırlanır.
- Kullanılmışsa, koniye ağırlıklı halka yerleştirilir.
- Koni tabla üzerindeki 200 mm' lik daireyle çakışacak şekilde yerleştirilir ve betonun koni altından sızmasını engelleyecek şekilde koniye bastırılır (veya ağırlıklı halka kullanılır).
- Koni sallanmadan ve şişlenmeden doldurulur; beton, koninin üstünden taşmayacak şekilde düz bir cisimle silinip düzeltilir. Koninin dolu bir şekilde 30 sn' den fazla olmayan bir süre kalması sağlanır; bu zaman esnasında tabladan taşan beton varsa temizlenir ve tablanın fazla sulu olmadan, nemli olması sağlanır.
- Akan betona müdahale olmadan, bir hareketle düşey olarak koni kaldırılır. T_{500} istenmişse, tabla ile temasın son bulduğu anda süreölçer çalıştırılır ve betonun 500 mm' ye varması için geçen zaman 0,1 sn hassasiyetle kaydedilir. Tablayı veya betonu sarsmadan yayılan en büyük çap ölçülür ve 10 mm hassasiyetle d_m olarak kaydedilir. Sonra da d_m ' ye dik doğrultuda yayılma çapı 10 mm hassasiyetle ölçülür ve bu da d_r olarak kaydedilir. Çökme-yayılma değeri $\frac{d_m + d_r}{2}$ den hesaplanır.
- Ayırışma için betonun yayılması kontrol edilir. Çimento harcı kaba agregadan ayrışabilir. Ayırışan kaba agrega merkezi bölgede gözlemlenebilir. Ayırışmanın meydana gelip gelmediği ve bu yüzden deneyin yeterli olup olmadığı rapor edilir.

2.5.2 V-Hunisi Deneyi

V-hunisi deneyi KSB' un viskozitesini (yapışkanlığını) ve dolma yeteneğini tayin etmek için yapılır. Kullanılan agreganın maksimum dane çapı 20 mm' yi geçmemelidir. Bir V şekilli huni taze betonla doldurulur ve betonun huninin dışına çıkması için geçen zaman ölçülerek V-hunisi akma zamanı olarak kaydedilir. V-hunisi, şekil 2.3' deki boyutlarda (tolerans ± 1 mm), altında aniden açılmasını sağlayan su geçirmez bir kapağa sahip ve huni üstte yatay duracak şekilde teşkil edilir. V-hunisi metalden yapılmalıdır. Yüzeyler pürüzsüz olmalıdır, çimento hamurundan kolayca etkilenmemeli ve paslanmaya karşı korunmalıdır. V-hunisinin altında 12 lt' den az olmayan ve huni hacminden daha büyük bir hacme sahip olan deney numunesini destekleyen bir hazne teşkil edilir.



Şekil 2.3 V-hunisi deney seti

Huni ve alt kapağı temizlenerek, kapağı da kapsayacak şekilde tüm iç yüzey nemlendirilir. Kapak kapatılır ve beton numunesi huninin içine çalkalanmadan, şişlenmeden doldurulur; sonra beton huninin dışına taşmasını diye, bir silme tahtasıyla beton yüzeyi düzeltilir. Kapak açıldığında geçen betonun dolması için huninin altına bir hazne yerleştirilir. Huninin dolması üzerinden (10 ± 2) sn geçtikten sonra kapak aniden açılır; kapağın açılmasından ve düşey olarak dolmanın gözlemlendiği ilk andan itibaren 0,1 sn hassasiyetle t_v zamanı ölçülür. t_v , V-hunisi akma zamanıdır.

2.5.3 L-Kutusu Deneyi

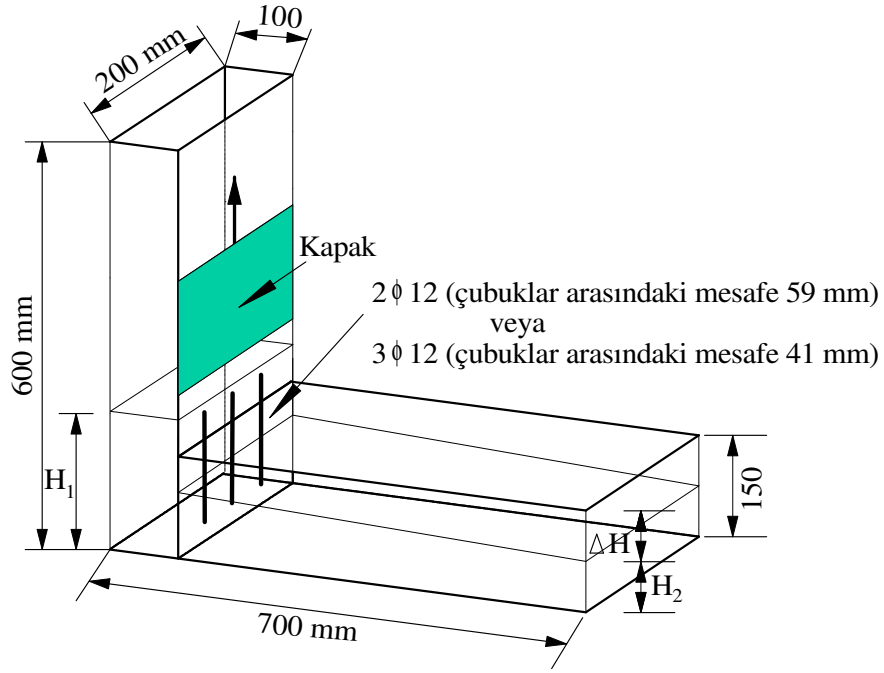
L-kutusu deneyi, KSB' un, donatı çubukları ve diğer engeller arasındaki yüzeyleri içeren dar açıklıklar boyunca ayrışmadan ve topaklanmadan akarak geçme yeteneğini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu deney, iki veya üç donatı çubuğuyla yapılan deneyleri içermektedir. Üç çubukla yapılan deney, daha yoğun donatılamayı tasvir etmektedir.

L-kutusu, Şekil 2.4' teki genel düzenlemeye ve boyutlara (tolerans ± 1 mm) sahip olan bir deney aparatıdır. L-kutusu, pürüzsüz, düz ve çimento hamurundan kolayca etkilenmeyecek veya pasa maruz kalmayacak bir yüzeye sahip ve rijit yapılı olmalıdır. Temizlenmenin kolay olması için

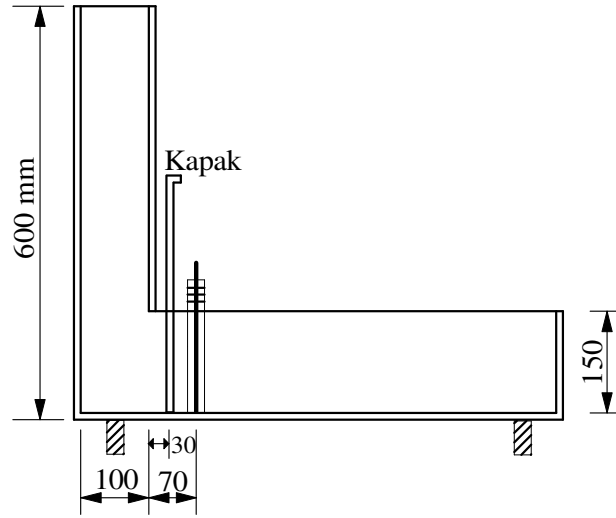
düşey kısmının çıkarılabilir olması gerekir. Kapağın kapatılması ile üst seviyeye kadar tam doldurulduğunda, düşey huninin hacmi (12,6~12,8) litre olmalıdır.

Donatı çubuklarını tutan takım, 2 çubuklu deney için 12 mm çapında 59 mm aralıklı 2 pürüzsüz çubuğa sahip olmalı; 3 çubuklu deney için yine 12 mm çapında ve 41 mm aralıklı 3 pürüzsüz çubuğa sahip olmalıdır. L-kutusunda ki çubukların kutu genişliğı boyunca düşey ve eşit mesafede kalmalarını sağlamak için bu takım, çıkarılıp yerleştirilebilir olmalıdır.

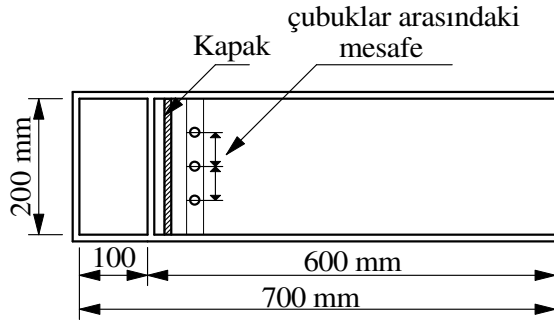
L-kutusu deney seti için çelik kalıp önerilir, fakat son tabakası kurşunla kaplanmış 12 mm kalınlığında kontrplak da uygun bulunmuştur.



a)



b)



c)

Şekil 2.4 L-kutusu deney seti, **a)** Perspektif, **b)** Yandan görünüş, **d)** Üstten görünüş

Yaklaşık olarak 17 litrelik KSB karışımı hazırlanır. L-kutusu yatay bir düzlemde sabitlenir ve yatay ile düşey kesitler arasındaki kapak kapatılır. Karışım hazneden L-kutusunun doldurma hunisine dökülür ve karışımın (60 ± 10) sn orada kalması sağlanır. Herhangi bir ayrışma olup olmadığı gözlemlenir ve sonra kapak aniden açılarak betonun, kutunun yatay bölümüne akması sağlanır. Hareket bittiğinde; kutunun yatay kesitinin ucundaki betonun üstü ile kutunun yatay kesitinin üstü arasındaki düşey mesafe, baş taraflar ve orta olmak üzere üç noktadan ölçülür. Yatay bölümün yüksekliğindeki fark ile bu üç ölçüm, H_2 (mm) ile ifade edilen beton yüksekliğini

hesaplamak için yapılır. Aynı yöntemle H_1 (mm) olarak verilen hemen kapağın arkasındaki beton derinliği de hesaplanır. Geçme yeteneği (PA) denklem 2.6' dan hesaplanır.

$$PA = \frac{H_2}{H_1} \quad (2.6)$$

2.5.4 Elek Ayırışma Direnci Deneyi

Elek ayırışma direnci deneyi, KSB' un ayırışmaya karşı direncini belirlemek için yapılır. Numune haznesine ($10 \pm 0,5$) litre beton yerleştirilir ve kapağı kapatılır. Düz bir pozisyonda ($15 \pm 0,5$) dakika sarsılmadan kalması sağlanır. Terazı sıfırlanır ve ibrenin hareket etmediği görülür. Eleğin üzerine yerleştirileceği kova teraziye yerleştirilir ve kütlesi (W_p) gram olarak kaydedilir. Sonra elek bu kova üzerine yerleştirilir ve tekrar kütle kaydedilir. Elek 5 mm kare delikli, 300 mm çapında ve 40 mm yüksekliğinde standarda uygun bir elek olmalıdır. 15 dakikalık periyodun sonunda numune haznesinin kapağı açılır ve betonun yüzeyi üzerinde su sızıntısı olup olmadığı kontrol edilir. Elek ve yerleştirildiği kova terazinin üstünde olduğu halde, elekle numune haznesinin arasında (500 ± 50) mm mesafe kalacak şekilde ($4,8 \pm 0,2$) kg lık beton -herhangi sızan su da içerecek şekilde- aniden eleğin ortasına dökülür. Betonun elekte (120 ± 5) s kalması sağlanır ve bu sürenin sonunda elek sarsılmadan kaldırılır. Eleğin üzerinde kalan mevcut beton kütlesi (W_c) gram olarak kaydedilir. Eleğin altındaki kova, içindeki betonla birlikte tartılır ve (W_{ps}) gram olarak kaydedilir. Terazı, elek ve üstüne oturduğu kovayı alabilen, düz bir platforma sahip ve 20 gram hassasiyetli, en az 10 kg kapasiteli bir terazı olmalıdır. Bundan sonra ayırışma oranı (SR), elekten geçen numune oranı olarak denklem 2.7' den hesaplanır ve %1 hassasiyetle kaydedilir:

$$SR = \frac{W_{ps} - W_p}{W_c} 100 \% \quad (2.7)$$

3. BETONARMEDE ADERANS VE KENETLENME

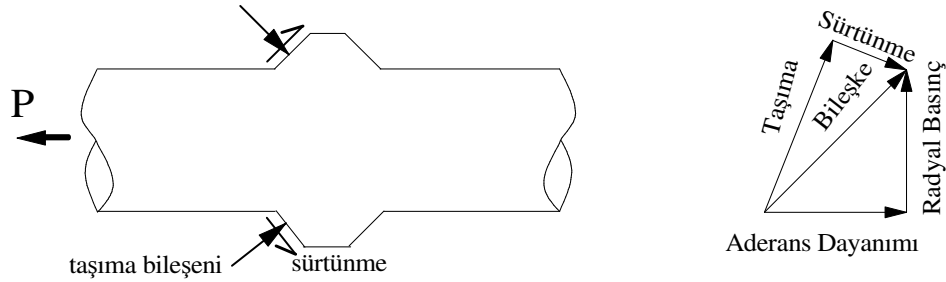
3.1 Giriş

Betonarme; basit olarak, beton ile çelik donatı çubuklarının beraber çalışacak ve birbirlerinin eksikliklerini tamamlayacak şekilde bir araya getirilmesi olarak tanımlanabilir. Betonarme bir yapı elemanının gerektiği gibi davranabilmesi için donatının betona kenetlenmesi zorunludur. Donatının eksenine paralel olarak, çevresini saran betona göre rölatif kaymasına karşı gelerek kuvvet aktarımını sağlayan bağ kuvvetleri, donatının betona kenetlenmesini yardımcı olur. Donatı çubuğunun betonun içinde kaymasını önleyen ve kenetlemeyi sağlayan bağ kuvvetlerine aderans denir. Genellikle betonarmede aderans deyimiyle; çelik ve betonun yapışması, birbirlerini ortak harekete zorlayabilme kabiliyeti kastedilir. Aderans olayı, betonarme elemanların dayanımlarını yüklenme durumlarına bağlı olarak iki ayrı şekilde etkilemektedir. Donatı çubuklarını basınç veya çekme tesirleri vererek betondan sıyırmaya çalışan yük durumunda, aderans donatının ankrajını sağlar. Bu çeşit bir bağlantıyı gerçekleştiren aderans, ankraj aderansı veya dış aderans olarak adlandırılmaktadır. Çekme veya eğilmeye çalışan ve donatı çubuklarının sıyrılmaya zorlanmadığı betonarme elemanlarda ise, aderans her iki malzemenin birlikte çalışmalarını sağlar ve böylece elemanın çatlama durumunu tayin eder. Bu ikinci çeşit çalışmayı gösteren aderansa da iç aderans adı verilmektedir.

Çelik ve beton arasındaki aderans, betonarmenin başlangıcından beri birçok araştırmacı ve uygulayıcının dikkatlerini kendi üzerinde toplamış ve bu konuda büyük sayıda araştırma yapılmıştır. Yüksek dayanımlı çeliklerin uygulama alanındaki öncüleri, yuvarlak ve düz yüzeyli enkesitleriyle, klasik yumuşak betonarme demirlerinden pek farklı olmayan aderans özelliklerine sahiptirler. Ancak bir süre sonra bu yeni tip çeliklerin yüksek dayanımlarından bütünüyle yararlanabilmek için betonla bağlantılarının artırılması gerektiği anlaşılmış ve yüzeylerindeki çıkıntı, girinti ve nervürlerle aderansı geliştirilmiş modern betonarme donatısı türleri uygulama alanına yayılmışlardır [57]. Nervürlü çubukların aderans dayanımı, öncelikle nervürlerin çevresini saran betona karşı gösterecekleri taşıma gücüne bağlıdır. Çubuk nervürü yüzü boyunca, çelik ve beton arasındaki sürtünme, nervüre göre rölatif kayma sonucu beton dışı önlemeye yardım etmekle aderans dayanımını geliştirmede önemli rol oynar. Sürtünmeden dolayı oluşan kuvvet, nervüre dik etki eden aderans taşıma bileşenine vektörel olarak eklenir. Bileşke aderans kuvvetinin düşey bileşeni ise, donatıyı çevreleyen betona dik etki eden radyal basınçtır. Yatay bileşen ise, etkin

aderans dayanımıdır (Şekil 3.1). Beton ve donatı arasındaki bağ olarak adlandırılan aderansın üç temel nedene dayandığı kabul edilmektedir.

1. Çelik ile beton arasında yapışmaya neden olan ve kimyasal adezyon safhasını tanımlayan kapiler ve molekül sel bağ kuvvetleri.
2. Çelik çubuk ile beton arasında oluşan sürtünme kuvvetleri.
3. Yüzeyinde çıkıntılar bulunan aderansı geliştirilmiş çubukların (nervürlü donatı) kullanılması durumunda ortaya çıkan ve nervürler ile beton dişler arasında oluşan diş kuvvetleri ve kenetlenme



Şekil 3.1 Betona gömülü donatı çubuğu parçasının serbest cisim diyagramı ve aderans dayanımı bileşenleri [58]

Bunun yanı sıra yüksek dayanımlı betonların da geniş ölçüde kullanılmaya başlanmasıyla aderans problemi yeniden önem kazanmıştır. Aderans üzerine geniş çapta ilk araştırmaları 1909 – 1912 yıllarında Illinois Üniversitesinde, çekip – çıkarma deneyleri ve kiriş deneyleri üstüne Abrams yapmış, bunun üstüne daha sonra birçok araştırmacı bu sorunu ele almıştır.

Aderans olayının nedenleri henüz kesin olmamakla beraber, genellikle donatı ile beton arasındaki üç ana sebepten ileri geldiği kabul edilmektedir.

- a. Çelik ve beton arasında yapışmaya sebep olan molekül sel ve kapiler bağ kuvvetleri: Bu yapışma çok düşük değerli olup zayıf zorlar altında, çelik ve betonun birbirlerine göre pek küçük yer değiştirmeleri sonunda kopar. O kadar ki Robinson ve Saillard bu bağın ihmal edilmesi gerektiği kanısındadırlar [57].
- b. Çubukların düz denilen kısımlarının yüzeyinde yeni imal edilmiş bile olsalar varolan pürüzlerin betona tutunmasından ileri gelen sürtünme kuvvetleri: Sürtünme kuvvetleri molekül sel

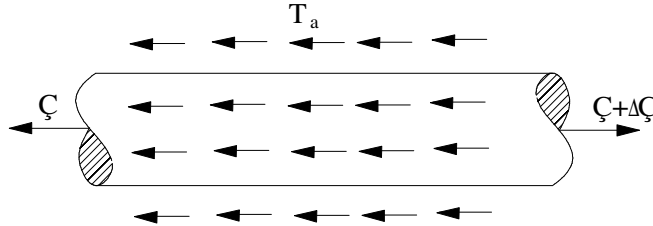
kuvvetlerden daha çok önemlidirler. Düz yuvarlak demirlerin aderansının hemen tamamı ikinci olarak ele alınan bu sürtünme kuvvetlerinden ileri gelmektedir.

- c. Çubuk yöresindeki betonun makaslama ve basınç dirençlerini de olaya karıştıran, helisel, tek veya çok sayıda, sürekli veya süreksiz nervürlerden ve enine çıkıntılardan ileri gelen mekanik dış kuvvetleri: Bu durum özellikle aderansı geliştirilmiş çubuklarda ortaya çıkar. Seçilen yüzey biçimlerinin uygun olması halinde aderans önemli ölçüde artar [57].

3.2 Aderans Mekanizması

Aderans gerilmeleri çelik ile betonun, aralarındaki sınırlarda birbirlerine paralel yönde rölatif yer değiştirmelerine mani olan kuvvetlerdir. Kuvvetlerin oluşabilmesi için donatı çeliği ve betonun birbirlerini rölatif olarak harekete zorlaması gerekir. Kuvvet tesirleri altında beton ile çeliğin rölatif olarak birbirleri üstünde kaymasına “aderans kayması” denir.

Aderans kaymaları fazlalaştıkça beton çatlakları genişler. Kayma sınırsız bir hal alıp aderans tamamen kaybolursa, donatı betondan sıyrılıp çıkar.



Şekil 3.2 Donatı Çubuğu Boyunca Gerilme Değişimi

Şekil 3.2 de görülen, donatı çubuğunun bir noktasından diğerine kuvvet ve dolayısıyla gerilme değişimi söz konusu olduğunda, çubuğu dengede tutan çubuk çevresi boyunca oluşan kayma gerilmeleridir. Bu kayma gerilmelerine “aderans gerilmeleri” denir.

3.3 Aderans Dayanımını Etkileyen Faktörler

Yüksek dayanımlı ve aderansı geliştirilmiş modern betonarme donatıların (nervürlü) meydana çıkması ile aderansın nedenleri ve aderansa etki eden faktörler gibi pek çok konunun

yeniden incelenmesi ihtiyacı doğmuştur. Yapılan araştırmalar, aderansa çok daha fazla faktörün etki ettiğini ortaya çıkarmıştır.

Faktörlerin çokluğunun yanı sıra, bu etkenlerin birbirleriyle ilgilerinin de kesin olarak bilinmemesi ikinci bir zorluğu getirmektedir. Gerçekten, eğer $X_1, X_2, X_3, \dots, X_m$ aderansı etkileyen m sayıda faktör olsun; u aderans çözümü gerilmesini veren ifade, bunların birbirleriyle olan bağlantı şekillerine göre şu şekilde verilebilir:

Basit (etkenler birbirinden bağımsız) ise

$$u = \alpha_1 \cdot X_1^{\beta_1} + \alpha_2 \cdot X_2^{\beta_2} + \dots + \alpha_m \cdot X_m^{\beta_m} = \alpha_i \cdot X_i^{\beta_i} \quad (3.1)$$

(α_i, β_i ler sabitlerdir)

veya karmaşık (etkenler birbiriyle bağımlı) ise

$$u = X_1(X_2, X_3, \dots, X_m) + X_2(X_1, X_3, \dots, X_m) + \dots \quad (3.2)$$

Gerçekte ise u gerilmesini veren ifade karma bir özellik gösterir; yani bir kısım etkenler diğerlerinden bağımsız, geri kalanlar ise birbirleriyle bağımlıdır [59].

Aderans dayanımında, kesme-aderans etkileşimi ve boyut etkisi çok önemli rol oynadıklarından, yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bulguları genelleştirmek doğru değildir. Bu sebeple öncelikle aderans dayanımını etkilediği kabul edilen başlıca faktörler bilinmelidir. Fakat bu etkenlerden bazıları sadece aderansı geliştirilmiş çubuklar veya çok korozyona uğramamış (pas tabakası bağlamamış) düz yüzeyli çubuklar için geçerlidir.

Aderans dayanımını etkileyen başlıca faktörler aşağıda sıralanmıştır:

3.3.1 Donatının Özelliği İle İlgili Etkenler

Çelik çubuğun çapı, akma veya elastiklik sınırı, özel profil şekli ve yüzeyinin niteliği aderans açısından önemlidir.

Donatı çapı değıştikçe, kenetlenmeyi sağlayan çevrenin, uygulanan kuvveti etkileyen alana oranı değışmektedir. Yani, donatı çapı artıkça hem kesit alanı artan donatıya gelen kuvvetin artması sonucu kenetlenme azalmakta, hem de donatı dış kuvvetlerinin oluşturduğu ve yarıma çatlağına sebep olan radyal gerilmelerin artması da söz konusu olmaktadır. Buradan, yarıma kırılmasında, betonda oluşan çekme gerilmelerinin çapla orantılı olarak arttığı ortaya çıkmaktadır. Kullanılan boyuna donatının çapının aderansa etkisi, yapılan önerilere göre artan donatı çapına karşılık lineer bir şekilde azalan aderans dayanımı hesaplanarak gözönüne alınabilir [60, 57, 61].

Donatının akma dayanımı, kenetlenme boyunca aderans gerilmesinin dağılımında ve bindirmeli eklerde ise, gerilme aktarımında büyük rol oynamaktadır. Donatıdaki yüksek gerilmeler, aderanslı olumsuz yönde etkilemekte, dolayısı ile düşük dayanımlı çelikler diğerlerine kıyasla daha avantajlı duruma gelmektedirler.

Çubuğun yüzey geometrisinin (nervür) aderansı arttırdığı kesin olarak bilinmekte ise de hangi profilin en uygun profil olduğu ve profil seçiminde hangi kıstasların geçerli olduğu sorunları henüz tamamen çözülememiştir.

Çubuk yüzeyinin niteliği faktörü, donatının profil şekli etkenine benzerdir. Asıl sorun beton ile çeliğin birlikte çalışması olduğuna göre çubuk yüzeyinin niteliğinin önemi açıktır. Pürüzlülük ve hafif bir pas aderansı arttırırken, ilerleyip kabuk görünüşünü almış pas zararlı olmaktadır. Benzer olarak, topraklı, çamurlu, yağlanmış çubukların aderansı da yok denecek kadar azdır [59].

Çubuk yüzeyinin düz ya da nervürlü olması da aderansı etkilemektedir. Düz yüzeyli çubuklarda aderans, yapışmaya ve sürtünmeye dayanmaktadır. Nervürlü çubukların aderansında bu iki nedenin etkisi ihmal edilebilecek kadar azdır. Bu tür çubukların aderansı çubuk üzerindeki çıkıntıların betona yaslanmasıyla sağlanmaktadır.

Beton bir kütleyle gömülmüş bir betonarme çubuk eksenel bir çekme kuvveti uygulanarak çekip çıkarılmaya çalışılırsa çubuğun sıyrılıp çıkmasına, çubuk boyunca oluşan aderans gerilmeleri engel olur. Uygulanan kuvvet küçük olduğu takdirde çubuğun düz yüzeyli veya nervürlü olması önemli bir fark oluşturmaz. Bu durumda aderans oluşturan temel neden, beton ile çelik arasındaki yapışma kuvvetleridir.

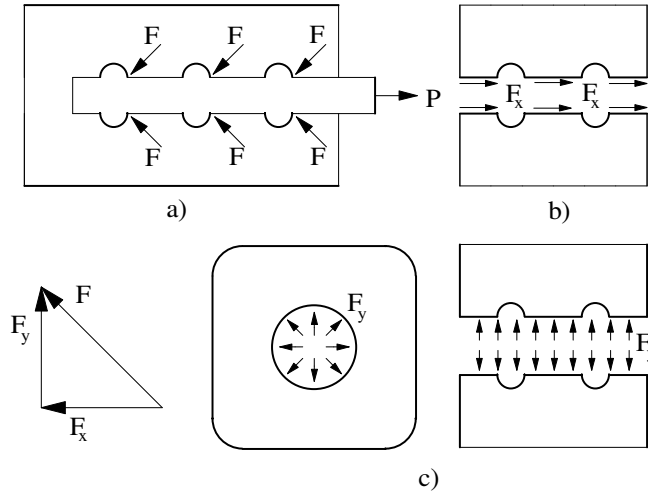
Donatıya uygulanan kuvvetin artması ile çelik, beton içinde kaymaya başlar ve bunun neticesinde yapışma kuvvetleri kaybolur. Bunların yerini sürtünme kuvvetleri alır. Yapılan deneyler, çeliğin betona göre kaymasının, donatı gerilmelerinin çok düşük olduğu düzeyde başladığını göstermiştir. Bu nedenle, birçok araştırmacı yapışma etkisinin ihmal edilebileceğini savunmuşlardır.

Yükün artması ile çelik beton içinde kaymaya devam eder. Bu kaymanın mertebesi çoğaldıkça sürtünme kuvvetleri de azalmaya ve kaybolmaya başlar. Artık çelik betondan sıyrılmaya başlamıştır ve bu sıyrılma bütün çubuk boyunca oluştuğunda, düz yüzeyli çubukların aderans dayanımı tükenmiş olur. Bu aşamada çubuk, uygulanan kuvvet altında betondan çekilip çıkarılabilir.

Çubuk aderansını geliştirmek amacı ile imalat sırasında çubuk yüzeyine verilen özel şekiller aderans direncini büyük ölçüde artırır. Nervürlü çubuklarda çeliğin betona göre kayması, nervür veya diş olarak adlandırılan çıkıntılarının beton kütleyle daha iyi yaslanmasını sağlar. Dişlerin betona dayanması ile oluşan mekanik kuvvetler, nervürlü çubukların sıyrılıp çıkmasını önler. Bu yüzden, nervürlü çubuklardaki aderansın temel nedeni bu mekanik bağ kuvvetleridir.

Sürtünme kuvvetleri, aderansı etkileme yönünden düz yüzeyli çubuklarda önemli rol oynar. Haddeme sırasında oluşan pürüzler ve paslanma, sürtünme yüzeyini artırmanın yanı sıra, küçük de olsa mekanik diş kuvvetlerinin oluşmasını sağlar ve dolayısı ile aderansı artırır. Çubuk yüzeyinin niteliği nervürlü çubuklar için büyük önem taşımaz.

Beton ile çeliğin birlikte çalışmasında çubuk yüzeyinin niteliğinin önemi açıktır. Bir çelik çubuk haddeden yeni çıkmış bile olsa yüzeyinde bir takım pürüzler gösterir. Zamanla paslanmanın da işe karışmasıyla yuvarlak düz demirler küçük bir mertebede de olsa aderansı geliştirilmiş çubuk durumuna gelirler. Asitle büyük ölçüde korozyona uğratılmış bir yuvarlak düz demirin, az çok haddeden yeni çıkmış bir aderansı geliştirilmiş çubuk kadar direnç gösterdiği görülmüştür [57].



Şekil 3.3 Kenetlenme Aderans Deneyi

Şekil 3.3 (a) da gösterildiği gibi, dış olarak adlandırılan çıkıntıların yüzeylerinin çubuk eksenine göre eğik olması nedeni ile betona eğik kuvvetler uygulanmaktadır. Goto'nun 1971 yılında yaptığı bir çalışmada, bu kuvvetler ile çubuk eksenindeki açının, 40°'den fazla olduğu kanıtlanmıştır. Betona uygulanan eğik kuvvetin yatay ve dikey bileşenlerinin (F_x ve F_y) etkileri Şekil 3.3 (b) ve (c)'de ayrı ayrı olarak gösterilmiştir. Yatay bileşen çıkıntı yakınındaki betonda basınç, iki çıkıntı arasındaki düzlem boyunca da kayma gerilmeleri meydana getirir.

Genellikle bu yatay bileşen, kırılmaya yol açacak mertebelere ulaşamaz. Şekil 3.3 (c)'de gösterilen düşey bileşen ise (genellikle yatay bileşenden daha büyüktür), donatı çevresindeki betona radyal bir basınç uygular. Bu durumda beton, içinde basınçlı bir sıvı veya gaz taşıyan boru gibi davranır. Düşey bileşenin betonda oluşturduğu çekme gerilmeleri, “yarılma” olarak tanımlanan kırılmaya sebep olabilir. Düz yüzeyli çubuklarda mekanik dış kuvvetler önemli olmadığından, aderans kırılması çubuğun betondan sıyrılıp çıkması ile oluşur. Mekanik dış kuvvetlerinin çok önemli olduğu nervürlü çubuklarda ise kırılma, çubuğun betona uyguladığı eğik kuvvetlerin etkisi ile, yarılma şeklinde oluşur. Bu yüzden, yüzeyi düz ve nervürlü çubukların davranışları ve bunlarla donatılmış beton elemanlardaki aderans kırılmaları çok farklıdır [62].

Özet olarak şunlar söylenebilir:

Beton bir kütleyle gömülmüş çelik çubuğa uygulanan çekme kuvveti üç tür kırılmaya sebep olabilir:

- a. Donatının akma sınırlarına erişmesi: Kenetlenme boyu olarak tanımlanan betona gömülü çubuk boyu yeterince uzun olduğu durumlarda bir aderans kırılması söz konusu olmaz ve çelik akma sınırına ulaşabilir.
- b. Donatının betondan sıyrılıp çıkması: Düz yüzeyli çubukların kenetlenme boyu yeterli olmadığı durumlarda, bu tür kırılma meydana gelebilir. Seyrek rastlanmasına rağmen nervürlü çubuklarda da sıyrılıp çıkma olabilir. Ancak nervürlü çubuklarda sıyrılma olayının meydana gelebilmesi için iki çıkıntı arasındaki betonun kayma gerilmeleri etkisi ile kesilip kırılması gerekir.
- c. Eğik dış kuvvetlerinin etkisiyle betonun yarılması: Bu yarılmaya sebep olan düşey bileşen Şekil 3.3 (c)'de gösterilmiştir. Yarılma, genellikle çubuğa paralel oluşan çatlaklardan gelişir. Bu tür kırılma, düz yüzeyli çubuklarla donatılmış elemanlarda görülmez.

3.3.2 Betonla İlgili Etkenler

Beton bileşimi aderansı etkilemektedir. Karışıma giren çimento, kum veya çakıl miktarında yapılacak değişiklikler, aderans dayanımını $\pm\%20$ oranında değiştirebilmektedir. Yapılan deneyler, çimento türünün de önemli olduğunu göstermiştir. Portland tipi normal ve yüksek dayanımlı çimentolar aderans yönünden en iyi sonuçları vermektedir. Pozzolanlı, yüksek fırın cürufu çimentoların ise yuvarlak düz demirlerde Portland tipine göre %75'e varan bir aderans düşmesine sebep olabildikleri gözlenmiştir [62]. Kullanılan agreganın cinsi ve katkı maddeleri de aderansı etkiler. Örneğin, hafif agrega ile yapılan betonun aderans dayanımı, normal agrega ile yapılan orana daha düşüktür.

Betonun plastikliği azaldıkça daha yüksek aderans direnci gösterir. Beton vibrasyonla sıkıştırılarak, yüksek bir aderans direnci elde edilebilir. Çeşitli usullerle sıkıştırma beton içindeki hava ve su boşluklarını yok ederek betonun donatıları daha iyi sarmasını sağlamaktadır. W.I. Larnach, priz başladıktan sonra betonun yeniden vibrasyonla sıkıştırılmasının, betonun aderans direnci üzerinde olumsuz etki yaptığını tespit etmiştir. Örneğin karılıp kalıba yerleştirildikten 3 saat sonra aderans direncinde ortalama %33 bir azalma olduğu gözlenmiştir [62].

Beton döküldükten sonra, muhafaza edildiği ortamın şartları (ısı, nem, don, kür şartları gibi) aderans dayanımını büyük ölçüde etkilemektedir. Yani, betonun sertleşmesi süresince bakımındaki özen aderansı arttırmaktadır. Birbiri peşine gelen donma-çözülme devrelerinin aderans direncini sıfıra indirdiği 1951'de A. Bichora tarafından gözlenmiştir. Donun aderans üzerindeki etkisini inceleyen V. Kohf (1957) da aderansın dona karşı beton dayanımından daha hassas olduğu sonucuna varmış ve yuvarlak düz demirler için beton dökümünden itibaren ilk üç gün ısıнын 10°C ' den, dört ve beşinci günlerde ise 5°C ' den daha düşük olmasını tavsiye etmiştir. R. Dutron betonun sertleşme sürecinde nemlendirilmesinin aderansı arttırdığını gözlemiştir [62].

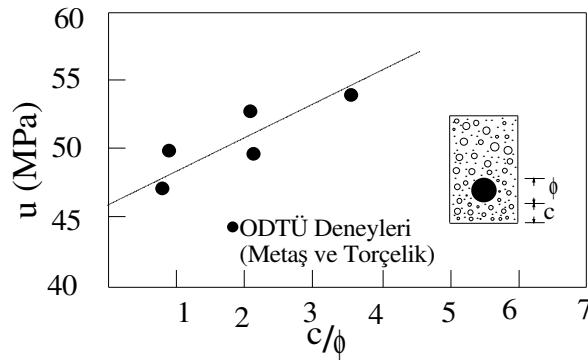
Betonun çekme ve basınç dayanımları, bileşimi, yaşı, sıkıştırılması ve korunması aderans dayanımını etkileyen önemli etkenlerdir. Sürtünme kuvvetlerinin beton çekme dayanımına bağlı olarak değiştiği yapılan deneylerle belirlenmiştir. Nervürlü çubuklardaki çıkıntıların betona uyguladığı eğik kuvvetlerin, betonda çekme gerilmesi meydana getirdiği ve yarılmaların bu nedenle olduğu daha önce belirtilmişti. O halde yarıma dayanımını etkileyen en önemli faktörlerden birisi, betonun çekmeye karşı dayanımıdır. Betonun çekme dayanımı faktörü, aderansı geliştirilmiş çubuklarda önem kazanmaktadır. Çünkü nervürlü çubuklarla donatılmış elemanlarda kırılma, genelde yarıma ile olacağından, betonun çekme dayanımı özellikle önem kazanmaktadır. Dolayısıyla, beton dayanımının artmasının, aderans dayanımını arttıracığı açıktır.

Betonun yaşı, aderans dayanımını, gerek beton dayanımının zamanla artması ve gerekse plastikliğinin azalması yönlerinden etkilemektedir.

3.3.3. Betonarme Kesit ile İlgili Etkenler

Kenetlenme boyunun aderans üzerindeki etkisi bu yüzyılın başlarından beri bilinmektedir. Beton bir kütleye gömülmüş çubuğa uygulanan çekme kuvveti, çubuk çevresinde oluşan ve aderans gerilmesi olarak adlandırılan kayma gerilmeleri ile dengelenir. Genellikle bu gerilmelerin çubuk boyunca eşit olarak yayıldıkları kabul edilir. Kenetlenme boyu yeterli olduğu takdirde, donatının çekip çıkarılması veya betonun yarılması söz konusu olamaz. Ancak, aderans dayanımı ile kenetlenme boyu arasında doğrusal bir ilişki yoktur. Yani kenetlenme boyu iki katına çıkarılınca dayanımı iki kat artmaz [62].

Donatı etrafındaki beton örtünün kalınlığı, özellikle aderansı geliştirilmiş çubuklarla donatılmış betonarme elemanlar için önemlidir. Beton örtü kalınlığının, yaklaşık donatı çapının üç katından daha az olduğu durumlarda, yapısal açıdan tehlike arz etmeyen yarıma göçmesi meydana gelmektedir [63]. Yarıma göçmesinin daha iyi anlaşılması bakımından, iç basınç altındaki boru analogisinden hareket edilirse, betonda oluşan radyal çekme gerilmesinin beton örtü kalınlığı ile ters orantılı olduğu görülür. Aderans dayanımının beton örtü kalınlığı ile değişimi ise, Şekil 3.4' te görülmektedir [64].



Şekil 3.4 Beton örtü kalınlığının aderans dayanımına etkisi

Bir kesitte kenar çubuğun aderansı, kenardaki beton tabakası ince olduğu ve kolaylıkla enine deformasyon yaptığı için bir iç çubuk kadar iyi olamaz. Aderansın yeteri kadar iyi olması için beton çubuğu kenar ve alttan saran beton tabakasının bir minimum kalınlığı olmalıdır. Bu kalınlık

özellikle nervürlü çubuklarda, köşeye doğru olan kuvvetler sebebiyle betonun çatlamaması için de lazımdır.

Bir kirişte üst kısımlarda betonun iyi sıkıştırılamaması, su/çimento oranının artması sonucu beton dayanımının azalması, üst çubukların altında betonun oturmasının alt çubuklara nazaran daha fazla olması gibi nedenlerle üstte veya üste yakın çubuklarda aderans, alt çubuklara göre daha az olmaktadır. Betonarme bir yapı elemanının gerektiği gibi davranabilmesi için donatının betona kenetlenmesi gerekir. Aderansın tam olarak sağlanabilmesi için gerekli kenetlenme boyu, kesitteki donatı çubuklarının betonlama sırasındaki konumuna bağlıdır. Eğimi yatayla 45° ile 90° arası olan çubukları beton iyice sarabilmekte ve bunların aderansı iyi olabilmektedir. Buna göre eğimi yatayla 45° ile 90° arasında olan çubuklarla eğimi daha az veya yatay olup da betonun üst yüzeyinden en az 30 cm altta olan veya elemanın alt yarısı içinde bulunan çubukların yer ve durumları TS 500'de [65] konum 2 ve bu tanımın dışında kalan çubukların yer ve durumları konum 1 olarak isimlendirilmiştir. Aynı bir çubuğun konum 2'deki aderansı, konum 1'deki aderansından 2 kat daha iyi olmaktadır [66].

Betonlama sırasında düşey duran çubukların aderans dayanımının yatay olanlara oranla daha yüksek olduğu da yapılan deneylerle saptanmıştır (%50 fazla olduğu ileri sürülmüştür). Ancak nervürlü düşey bir çubuk betonlamanın yapıldığı yönde çekilecek olursa, yatay çubuğa kıyasla daha büyük kayma göstermektedir.

Dayanımı etkilemeyen bu olayın nedeni, döküm sırasında çubuk çıkıntıları altında oluşan, sünger andıran gevşek beton kütleleridir [67]. Üst ve alt sıralara konulan çubukların aderans özellikleri arasındaki farkın nedenleri şunlardır:

- Betonun döküm ve priz anları arasında tasman yaparak üst sıra demirlerin alt yüzeyi ile bağlantısının azalması
- Prizden önce alt seviyede hidrostatik basıncın daha büyük olması ve bu basıncın betonu alt çubuk sıraları üzerine bastırması.
- Su ve hava dolu boşlukların sıkıştırma sırasında hafiflikleri sebebiyle üst seviyede toplanmaları ve üst sıra çubukları sarmaları

Aderansı geliştirilmiş çubukların aderansını etkileyen en önemli faktörlerden biri de enine donatıdır. Kayma donatılarının sayısı artırıldığında aderansı yok eden boyuna çatlaklar, daha büyük zorlamalarda meydana gelmektedir. Enine donatının beton-çelik bağlantısı üzerindeki etkisi, yük altındaki aderansı geliştirilmiş bir çubuktan onu saran beton kütesine gelen tesirler göz önüne alınarak incelenebilir. Daha önce donatıyı örten beton kalınlığının etkisini açıklayan düşüncüyü enine donatı bulunması durumu için genişletmek mümkündür. Çatlamadan önce betonu

parçalamaya çalışan kuvvetin önemli bir bölümünü alan enine donatının çatlakların oluşmasından sonra bunun tümünü taşıdığı ve böylece engelleyecek aderans çözümünü geciktirdiği görülebilir.

Donatıyı saran betondan çubuk eksenine dik basınç gerilmesi, aderansı büyük ölçüde olumlu yönde etkilemektedir. Ayrıca betonun boyuna doğrultuda çekmeye çalışması ise, enine doğrultuda bir büzülme oluşturmaktadır. Bu olay da rötreye benzer şekilde, betonun donatıyı sıkıştırması ile aderans dayanımının artmasına önemli katkıda bulunur.

3.3.4 Diğer Etkenler

Bu etkenler arasında zorların etkisi ve yükleme hızı gibi zamanla ilgili etkenler, yorulma ve elektro-kimyasal etkenleri sayılabilir.

Zamanla ilgili etken denilince, betonda büzülme ek olarak, kalıcı yük altında oluşan sünme etkisi söz konusu olmaktadır. Aderans direncinin, bu kalıcı zorların etki süresi arttıkça azaldığı ve bu azalmanın bir asimtota ulaştığı düşünülmektedir. Yükleme hızı ise, aderans dayanımı üzerindeki etkisini beton ve çeliğin birbirlerine göre kaymalarıyla gösterir.

Malzemenin diğer bütün mekanik özellikleri gibi aderans direnci de dinamik ve tekrarlanan yükler altında yorulma göstermektedir.

Elektro-kimyasal etken ile ilgili olarak J. Kolek [68], yaptığı çalışmada demirin haricindeki maddelerden yapılan kalıpların betonlamada kullanılması halinde aderansı azalttığını ortaya çıkarmıştır. Çünkü, donatı demirleri ile farklı madenden yapılmış kalıp arasındaki potansiyel farktan dolayı bir pil oluşmakta; bu da donatı çevresinde aderansı büyük ölçüde azaltan gaz kabarcıklarının meydana gelmesine yol açmaktadır.

3.4 Aderans Çeşitleri

Beton bir bloğa bir çelik çubuk gömülsün ve beton sertleştikten sonra çekip çıkarılmak istensin. Çelik çubuğun beton içindeki bir noktasında çelik uzaması (çekme kuvveti, betonun rötresi, sünmesi gibi tesirlerin etkisi dahil olmak üzere) ε_e ve bu noktada çelik ile temasta olan beton lifteki uzama da ε_b olsun.

İki malzeme arasında kayma olmadığına göre,

$$\epsilon_e = \epsilon_b \quad (3.3)$$

bağıntısı yazılabilir. Bu tanım, beton bir bloğa gömülmüş, bir çelik çubuk ile beton arasındaki aderansın, birim uzamalar tipinden ifadesidir. Bu bağıntı gergilere ve eğilmeye maruz elemanların çekme bölgelerinde uzamanın belirli bir değerine kadar doğrudur. Betonun uzama limitinin çeliğin uzama kapasitesi yanında çok küçük olması nedeniyle, çelikte uzamalar belirli bir değeri geçince beton çatlaklar ve (3.3) bağıntısı çatlama yerlerinde geçerliliğini kaybeder. Bu tip elemanlarda eleman boyunca mevcut çatlakların çubuk hizasındaki genişlikleri toplamının çubuk boyunca oranı ϵ_o olsun. Çelikte beton arasında kayma olmadığını gösteren ve aderansı deformasyonlar tipinden ifade edildiği bağıntı, bu defa

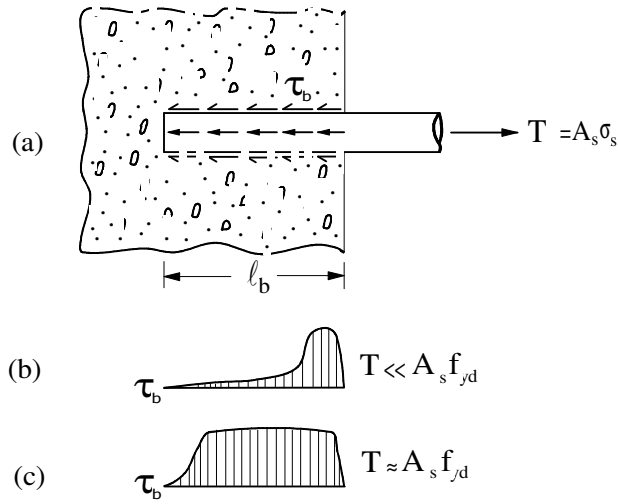
$$\epsilon_e = \epsilon_b + \epsilon_o \quad (3.4)$$

olarak yazılabilir. Buna göre betonarme elemanlarda aderansın, birbirinden farklı iki şekilde var olduğu söylenebilir.

1. Betonarme bir bloğa gömülmüş, ankre edilmiş çubukların maruz kaldığı çekme veya basınç kuvveti ile çıkıp gelmesine engel olan aderans. Bu tür aderansa kenetlenme (ankraj) aderansı denir ve bunun için (3.3) bağıntısı geçerlidir.
2. Betonarme bir taşıyıcı elemanda iki malzemenin beraber çalışmasını temin eden ve böylece o elemanlarda çatlama durumunun şekli üzerinde en önemli rolü olan aderans (örneğin eğilmeye maruz bir kirişte çekme donatısı ile gövde betonu arasındaki aderans.) Eğilme aderansı denen bu aderans türü için (3.4) bağıntısı geçerlidir [66].

3.4.1 Kenetlenme Aderansı

Betonarme bir çubuk beton kütle içine yeterli derinlikte gömülmüşse, bunu çekip çıkarmak mümkün değildir. Gömülme kısa olduğu takdirde, çubuğun nervürlü olup olmamasına bağlı olarak, çubuk sıyrılıp çıkarılabilir veya etrafındaki beton kütleyle yarabilir. Çubuğun betondan sıyrılmadan veya betonu yarmadan akma gerilmesine ulaşmasını sağlayacak boya “kenetlenme boyu” (ankraj boyu) denir.



Şekil 3.5 Kenetlenme aderansı

Şekil 3.5'deki beton kütleyle gömülü olan çubuğa kenetlenme boyunca etkiyen (τ_b) bağ kuvvetleri, uygulanan ($T = A_s \sigma_s$) çekme kuvvetini dengelemek durumundadır. Yeterli kenetlenmenin sağlanması için $\sigma_s = f_{yd}$ olduğunda, çubuk çevresinde oluşan bağ kuvvetlerinin toplamının çekme kuvvetine eşit olması gerekir ($\sum \tau_b = A_s f_{yd}$). Fakat aderans gerilmelerinin kenetlenme boyunca düzgün yayılmadığı ve gerçek dağılımın birçok değişkene bağlı olduğu yapılan deneylerde görülmüştür. Bu nedenle temel kenetlenme boyunun hesabı zorlaşmaktadır. Aderans gerilmeleri kenetlenme boyunca düzgün yayılı olsaydı veya bu gerilmelerin dağılımı kesin olarak bilinseydi, gerekli kenetlenme boyunun hesabı oldukça kolay olurdu. Burada A_s donatı kesit alanını, f_{yd} çelik donatının akma gerilmesini, T çekme kuvvetini, τ_b aderans gerilmesini ve σ_s donatıdaki gerilmeyi göstermektedir.

Aderans gerilmeleri ile kenetlenme boyu arasındaki ilişkiyi yaklaşık olarak hesaplayabilmek için, aderans gerilmelerinin kenetlenme boyunca değişmediği varsayılabilir. Gerçek dağılım varsayılandan çok değişik olduğundan, elde edilecek bağıntının gerçeğe tam uymadığı unutulmamalıdır.

$$\sum \tau_b = T = A_s f_{yd}$$

$$\tau_b (\pi\phi) l_b = \frac{\pi\phi^2}{4} f_{yd}$$

$$l_b = \frac{\phi f_{yd}}{4\tau_b} \quad (3.5)$$

$\tau_b = c_1 f_{ctd}$ ve $\frac{1}{4c_1} = c_0$ varsayılırsa, (3.5) bağıntısı aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$l_b = c_0 \frac{f_{yd}}{f_{ctd}} \phi \quad (3.6)$$

Bu denklem kenetlenme boyunu veren temel denklemdir. c_1 ve c_0 deneysel olarak bulunan katsayılardır. f_{ctd} , betonun çekme dayanımı ve ϕ ise çekme donatısının çapıdır. Kenetlenme boyunu uzatmak, uygulanan çekme kuvvetini artırmaz; bilakis, yapılan deneylerle boy uzadıkça kenetlenme boyunun verimliliğinin azaldığı tespit edilmiştir.

Deneysel ve teorik incelemeler, çubuğun kenetlenme türünün ve farklı sargıların, kenetlenme üzerinde önemli etkiye sahip olduklarını göstermiştir. Bu amaçla yapılan bir çalışmada, kenetlenme uzunluğu boyunca çubuk gerilmesi ve kayma dağılımı, kenetlenme türüne bağlı olarak karşılaştırılmıştır. Yeterli enine donatı, düz kenetlenmede olduğu gibi, kancalı ve enine kaynaklanmış düz yüzeyli çubuk durumunda da daha az kenetlenme uzunluğu ile aynı çubuk gerilmesi sağladığı görülmüştür [69].

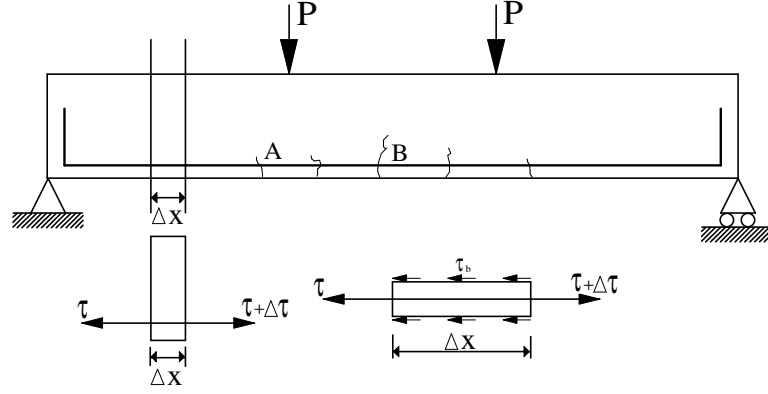
Yine bir çalışmada, donatı çubuğunun nispi nervür alanının artmasıyla, belirli bir kayma değeri için oluşacak aderans gerilmelerinin aynı oranda arttığı gözlenmiştir [70].

Ayrıca, kenetlenmiş çubuktaki enine basınç ve beton örtüsünün artması, donatı çubuğunun sarılmasının artmasıyla, aderans kapasitesini arttıracak aşıkârdır. Çünkü beton örtünün 1ϕ 'den 2ϕ 'ye veya 2ϕ 'den 3ϕ 'ye artmasıyla aderans dayanımı artışı %15 civarında olmaktadır [71].

3.4.2 Eğilme Aderansı

Eğilmeye çalışan bir betonarme elemanda momentin bir kesitten diğerine değişebilmesi için, donatıdaki gerilmenin de değişmesi gerekir. Şekil 3.6' da gösterildiği gibi, donatıdaki gerilmenin değişebilmesi, ancak donatı çevresinde oluşan ve aderans gerilmesi olarak adlandırılan

kayma gerilmeleri ile mümkündür. Denge koşulu nedeniyle Δx uzunluğundaki çubuk çevresindeki etkiyen aderans gerilmelerinin toplamı, çubuğun iki ucundaki çekme kuvvetleri farkına eşit olmalıdır.



Şekil 3.6 Eğilme Aderansı

$$\tau_b(v)\Delta x = \Delta T = \frac{\Delta M}{z}$$

$$\frac{\Delta M}{\Delta x} = V \text{ kesme kuvveti değeri yerine yazılırsa,}$$

$$\tau_b = \frac{V}{z(v)} \quad (3.7)$$

(3.7) bağıntısında τ_b aderans gerilmesi, v çelik donatının çevre uzunluğu ve V de kesme kuvvetidir.

3.5. Aderans Deneyleri

Şartnamelerde kullanılacak aderans gerilmeleri (emniyet gerilmesi veya taşıma gücü) veya kenetlenme boyunun tespit edilebilmesi için, bu yüzyılın başından beri çeşitli aderans deneyleri yapılmıştır. Çeşitli ülkelerde değişik tipler esas alınmış ve bunlar aderans gerilmesinin belirlenmesinde standart deney kabul edilmiştir. Hemen belirtmek gerekir ki, geliştirilen bu deney elemanlarının hiçbirisi tam anlamı ile gerçek durumu yansıtmamaktadır. Bu nedenle deney türlerinin tümü eleştiriye açıktır [57].

Bu güne kadar gerçekçi bir aderans deneyinin geliştirilmemiş olmasının başlıca nedenleri şunlardır.

- Aderans-kesme ilişkisi henüz tam olarak aydınlığa kavuşturulamamış karmaşık bir konu olduğundan, bu etkileşimin gerçekçi olarak deney elemanına yansıtılması olanaksızdır.
- Boyut etkisi aderansı büyük ölçüde etkilemektedir.
- Yerel gerilmelerin aderans ve kenetlenme üzerine ihmal edilemeyecek ölçüde etkileri vardır.
- Donatı çubukları arasındaki uzaklık ve beton örtüsü aderansı etkileyen önemli değişkenlerdir.

Bu durumda, aderans veya kenetlenme sorunu incelenecek eleman, laboratuarda aynı boyut ve sınır koşulları ile imal edilip test edilmedikçe yapılan deneyin tam olarak gerçeği yansıttığı söylenemez. Karşılaştırılan her sorun için elemanı aynen temsil eden bir prototipin denemesi elbette ki pratik ve ekonomik olmayacaktır.

Bu konuda yapılan deneyler genelde dış aderans denilen direkt aderansla ilgili özellikleri (kenetlenme, bindirmeli ekleme, sınır gerilme) konu alan çekip-çıkarma (pull-out) deneyleri ile iç aderans denilen çatlama özelliklerini konu alan giriş deneyleri olmak üzere iki türdür. Yaygınlığı daha az olan itip-çıkarma (push-out) deneyleri de yapılmaktadır.

3.5.1 Çekip-Çıkarma Deneyi

Aderans deneyleri arasında en eskisi, en yaygın olarak kullanılanı, en basit ve en pratik olanı eksenel çekip-çıkarma deneyleridir (Şekil 3.7). Bu deneyde alt tabandan mesnetlenmiş prizmatik veya silindirik bir beton kütlesi içine yerleştirilmiş olan çelik çubuk, alt serbest ucundan, eksenini doğrultusunda üniform artan bir P kuvveti ile betondan çekilip çıkarılmaya çalışılır. Çubuğun yüksüz ve yüklenmiş uçlarının beton kütesine göre kaymaları (sıyrılma) P ile bağıntılı olarak ölçülür. Bu ölçmeler ile çelik gerilmesine bağlı gerilme-sıyrılma diyagramları elde edilmektedir. Ayrıca değişik kenetlenme boyları kullanılarak yapılan deneylerle kenetlenme boyunun belirlenmesi de mümkündür.

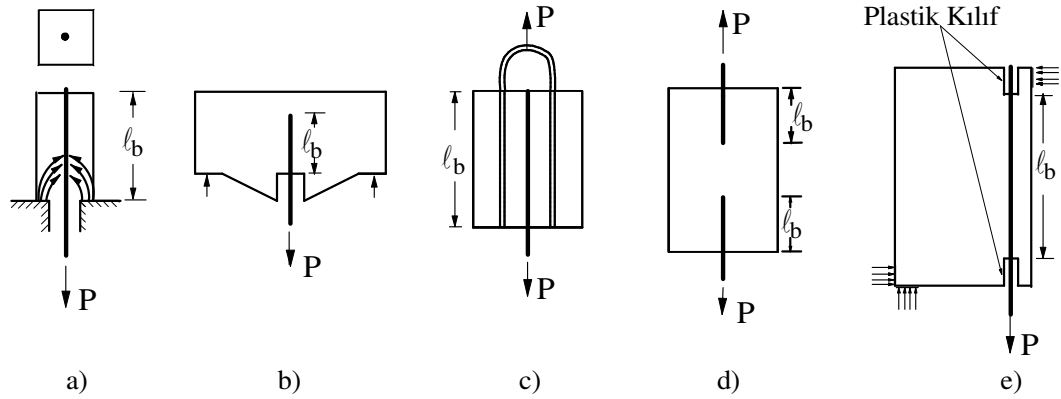
Bu tür deney elemanında donatıya dik kesme kuvvetinin bulunmayışı, mesnetin uyguladığı yerel basınç gerilmeleri ve beton örtüsünün gerçekte olandan çok büyük olması ve çekme çatlaklarının oluşmaması gibi sakıncalar söz konusudur. Bu sebeple bu deney elemanı aderans dayanımı ve kenetlenme boyunun saptanmasında uygun değildir. Ancak iki tür donatının izafi aderans ve kenetlenme özelliklerinin saptanıp karşılaştırılmasında bu tür deneyden yararlanılabilir.

Eksenel çekip çıkarma deneyinde kırılma oluşmadan önce donatı akma dayanımına ulaşırsa, kenetlenme boyu yeterli kabul edilebilir. Donatı akma konumuna ulaşmadan çubuk beton küleden sıyrılıp çıkar (düz yüzeyli donatı) veya beton kütle yarılırsa (nervürlü donatı) kenetlenme boyu

yetersiz sayılır. Bu karşılaştırmada önemli olan rölatif değerlerdir. Çubuk etrafındaki beton kütlenin nervürlü çubuklar için önemli, düz yüzeyli çubuklar için fazla önemli olmayışı, bu tür deneyin nervürlü ve nervürsüz çubukların aderans yönünden karşılaştırılmasında kullanılmasını sakıncalı kılar [62].

Eksenel çekip-çıkarma deneylerinde gözlenen sakıncaları gidermek amacı ile bazı değişiklikler yapılarak, yeni deney elemanları geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları Şekil 3.7 de gösterilmiştir.

Şekil 3.7 (b), (c) ve (d)'de gösterilen deney düzeneklerinde, mesnet nedeni ile donatı çevresinde oluşan yerel basınç gerilmeleri yok edilmiş, ancak sakıncalar giderilememiştir. Şekil 3.7 (e)'de gösterilen eksantrik çekip çıkarma deneyinde eksenel çekme elemanı için sayılan sakıncaların bir çoğu yok edilmiştir. Bu deneyde, beton örtü kalınlığı gerçekçi olarak ayarlanabilmekte ve yerel basınç gerilmeleri, uçlarda donatıya geçirilen kılıflarla yok edilebilmektedir. Ayrıca, donatıya dik kesme kuvvetinin bulunması ve eğilme nedeni ile çatlamanın olabilmesi, bu deney türünün daha gerçekçi olmasını sağlamaktadır [57].



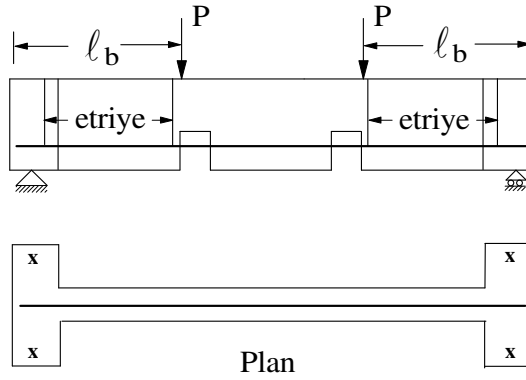
Şekil 3.7 Çekip-Çıkarma (Pull-out) Deneyleri

3.5.2 Kiriş Deneyleri

Çekip-Çıkarma deneylerinin eğilmeye çalışan bir elemandaki gerçek durumu yansıtamamasından dolayı kiriş deneyleri geliştirilmiştir. Özellikle eğilme çekme çatlaklarının aderans davranışını etkilediği kabul edildiğinden beri, çekip-çıkarma deneyleri, kiriş testlerinden daha az güvenilir olarak dikkate alınmıştır. Kiriş deneylerinden en yaygın olarak kullanılanları, Bureau of Standards Deneyi, Texas Deneyi, Standard Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi ve büyük boyutlu betonarme kirişler üzerinde yapılan Kiriş Çatlama Deneyidir.

3.5.2.1 Standart Bürosu Deneyi

Kenetlenme boyunun saptanmasında daha gerçekçi şartları sağlayan bir deney türüdür. Şekil 3.8’ de gösterilen Standart Bürosu deney elemanında kesme kırılmasını önlemek için aşırı etriye kullanmak gerekmektedir. Bu durum ise aderansı büyük ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla, gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmek açısından önemli bir sakınca doğmaktadır.

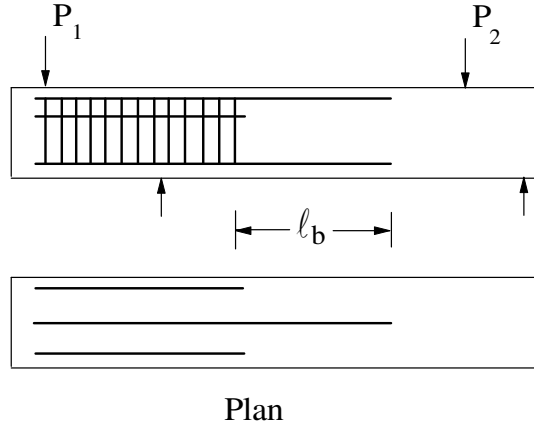


Şekil 3.8 Standart Bürosu deneyi

3.5.2.2 Teksas Deneyi

Standart Bürosu deneyine benzer şekilde kenetlenme boyunun incelendiği bu deney türünün sakıncası, donatının gerçeğe bağdaşmayacak genişlikte bir beton kütleyle gömülmüş olmasıdır (Şekil 3.9). Bu kiriş tipinde de başlıca önemli olan, donatıyı örten betonu sınırlayabilecek olan

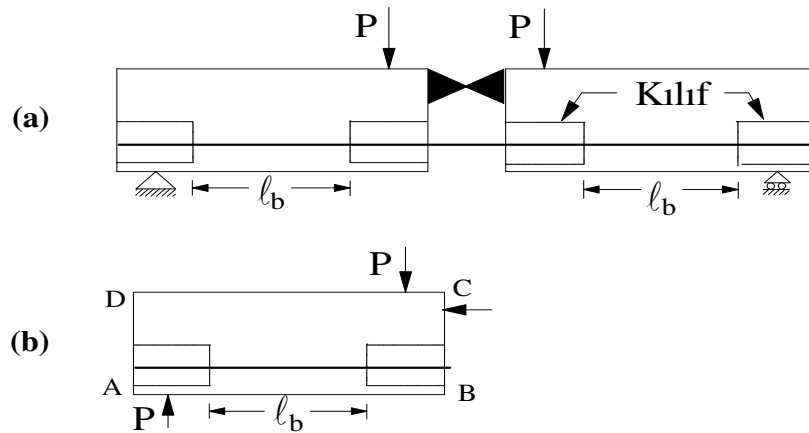
mesnetin uyguladığı yerel basınç gerilmelerinin önlenmesidir. Böylece, yarıma göçmesinin önlenmesi ortadan kaldırılmaktadır.



Şekil 3.9 Teksas deneyi

3.5.2.3 Standart Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi

Donatı çubuklarının çekme durumundaki betonla sarılı olmalarını sağlayan bu tür bir deney elemanı ile gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilir. Kiriş ortasındaki mafsalın amacı, çubuğa etkiyen kuvvetin kesin olarak belirlenmesidir (Şekil 3.10). Denenen çubuklara etkiyen kuvvet, epruvete yüklenen P kuvveti ile orantılı olup, kademeli olarak arttırılmaktadır. Kademeler çubukta belirli çekme gerilmeleri oluşturmak üzere düzenlenmiştir.



Şekil 3.10 Standart Mafsallı Belçika Deneyi

Şekil 3.10b deki serbest cisim diyagramından görüleceği gibi, bu deney elemanının yarısı, Şekil 3.7(e)'de gösterilen eksantrik çekip-çıkarma deney numunesine benzemektedir. Ancak, O.D.T.Ü.' de yapılan deneyler, bu iki tür deney elemanından elde edilen sonuçların oldukça farklı olduğunu göstermiştir. Belçika deneyinde, mesnet ile yük uygulanan nokta arasındaki deplasman farkının, eksantrik çekip-çıkarma deneyine oranla çok fazla olması, iki deney türü arasındaki tek fark olduğundan, gözlenen dayanım farkı bu nedene bağlanmıştır. Daha sonra özel bir deney düzeni geliştirilerek, eksantrik çekip çıkarma deneyinde, Belçika deneyine yakın deplasmanlar verildiğinde, sonuçların birbirine yaklaştığı gözlenmiştir [64].

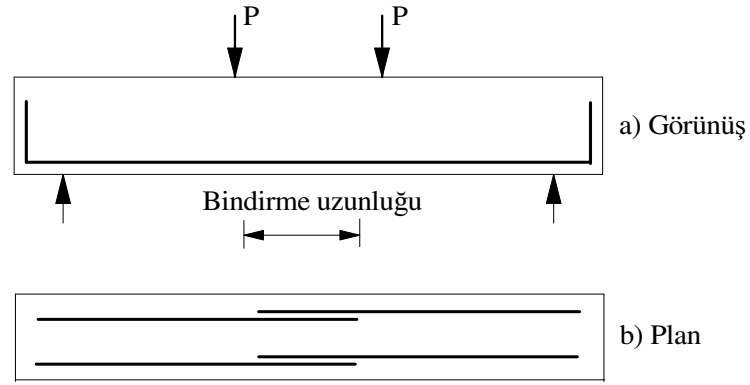
3.5.2.4 Kiriş Çatlama Deneyi

Eğilme çekme çatlaklarının aderans davranışını etkilediği kabul edildiğinden beri, bu tür deney testleri daha çok önem kazanmıştır. Bu deney tipinde, belirli bir türdeki donatının kullanılmasıyla oluşan kiriş çatlama durumunun incelenmesi ve donatıdaki gerilmenin tespiti esastır. Genellikle dikdörtgen kesitli olarak alınan bu betonarme deney kirişi, belli bir L açıklığında iki mesnete oturtulmaktadır. Yükleme, düşey, simetrik ve belli bir aralıkta olan iki tekil yük aracılığıyla yapılmaktadır. Yükleme esnasında, açıklık ortası sehim ölçümlerinin de yapılabilmesi bu deney türüne ayrı bir önem kazandırmaktadır. Bu deney türünde, test numunesinin büyük boyutlu olması ve dolayısıyla daha gerçekçi sonuçlara götürmesi oldukça önemlidir.

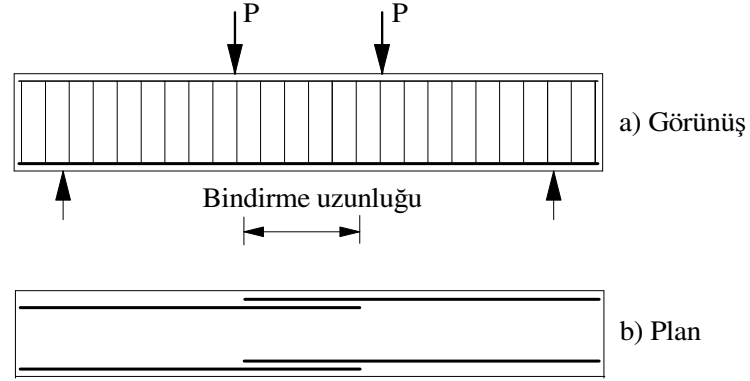
Şekil 3.11'de görüldüğü gibi, çekme donatısı, sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli olarak yerleştirilmektedir. Böylece nihai yükte, donatı akmadan önce, yarıлма göçme modu ile numunenin göçmesi söz konusu olmaktadır. Bu durum ise, bindirmeli ekli donatıların maksimum kapasitesine ulaştığını göstermektedir. Dolayısıyla aderans dayanımı direkt olarak donatıda meydana gelen gerilmeden tayin edilebilmektedir [61].

Bu çalışmada da kullanılan bu deney türü, pratikte karşılaşılabilecek ve aderans dayanımını etkileyen birçok faktörün (donatı çapı ve yüzey şekli, beton basınç dayanımı, kenetlenme ve ekleme uzunlukları, beton örtü kalınlığı, çelik çubuğun betonlama esnasındaki konumu, enine donatı, yükleme durumu ve hızı v.b.), değişken parametre olarak incelenmesini sağlaması açısından büyük bir avantaja sahiptir.

Diğer taraftan, yapılan bu çalışmada donatı detaylandırması kapsamlı tutularak (ettriye ve montaj donatısı) daha gerçeğe yakın bir kiriş davranışı amaçlanmıştır (Şekil3.12)



Şekil 3.11 Çekme donatısı sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli olarak yerleştirilmiş kiriş deneyi



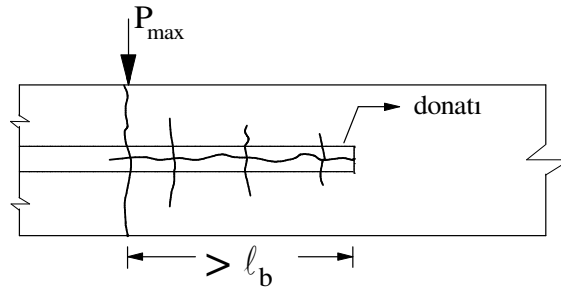
Şekil 3.12 Etriye, montaj donatılı ve çekme donatısı ekli olarak yerleştirilmiş kiriş deneyi

3.6. Çatlama Olayı

Betonun çekme altındaki kopma uzaması değerinin çeliğe göre çok düşük olması ($\epsilon_{ck}=0.0001$), betonun, donatı çubuklarının şekil değiştirmesini belirli bir sınır gerilmeden sonra izleyememesi ve çatlama sonucunu doğurur.

Aderansı geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerle donatılan yapılarda, servis yükleri altındaki çatlama rahatça gözlenebilecek bir düzeydedir. Donatı çubuğunun betona nervür kuvvetleri aracılığıyla tutunması kaymayı azalttığından, betonun, çeliğin uzamasını takip edememesinden ileri gelen çatlakların sayısı artar. Böylece çeliğin toplam uzaması ile betonun toplam uzaması arasındaki fark, az açılmış çok sayıda çatlağa bölünmüş olur [72].

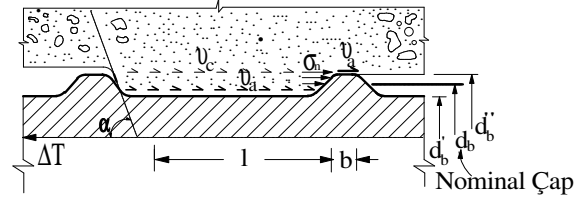
Aderans gerilmelerinin, yani elemanı yarılmaya zorlayan kuvvetlerin neden olduğu çatlama, kenetlenme boyunun yetersiz olması nedeni ile Şekil 3.13’ de gösterildiği gibi meydana gelir. Bu tür bir çatlama, donatı çubuklarının konumuna ve beton örtü kalınlığına göre elemanın alt veya yan yüzünde gözlenir. Şayet donatı üstte ise, çatlak üst yüzde de görülür. Bu çatlakların nihai yük durumunda ulaştıkları konum, betonarme elemanın göçüşü ile sonuçlanmaktadır. Söz konusu göçüş, ileride de belirtileceği gibi, nervürlü donatı kullanılması durumunda beton ile donatı arasındaki bağ ve etkileşim sonucu oluşan gerilmelerden dolayı sıyrılma veya yarılmaya şeklinde meydana gelmektedir.



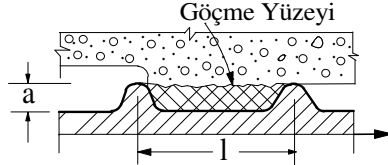
Şekil 3.13 Aderans nedeni ile oluşabilecek çatlaklar

3.7 Aderansta Göçme Mekanizmaları (Sıyrılma ve Yarılmaya)

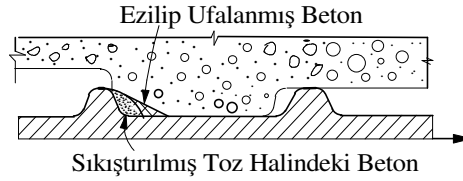
Aderansı geliştirilmiş yüksek dayanımlı donatı çubuğu kullanılması durumunda beton ile donatı arasındaki bağ ve etkileşim ile ilgili olarak oluşan gerilmeler söz konusudur. Nervürlü çubuğun komşu iki dişi arasında sağlanan aderans direnci, bölgesel seviyede, kimyasal adezyon nedeniyle çubuk yüzeyinde oluşan kayma gerilmesi (v_a), iki nervür arasındaki silindirik beton yüzeyi üzerindeki kayma gerilmesi (v_c), beton basınç mukavemeti (f'_c) ve nervür yüzüne etkiyen basınç gerilmesine (σ_n) bağlıdır (Şekil 3.14a).



a) İki komşu nervür arasında oluşan gerilmeler



b) Nervürlerde kesme sıyrılması göçme modu



c) Bölgesel ezilme ile betonun yarılmaları sonucu oluşan göçme

Şekil 3.14 Nervürlü çubuğun iki çıkıntısı arasındaki bölgesel davranış [73]

Rehm [74], aderans probleminin birçok yönlerinin dişler arası uzaklık (l) ile diş yüksekliği (a) oranı geometrik parametresine göre ele alınabileceğini göstermiştir. Park ve Paulay [73], Rehm' in bulguları ışığında ve l/a değerine göre aderans göçüşünü veren iki türlü mekanizmayı önermişlerdir [75].

Aderans göçüş türü üzerinde belirleyici olan l/a oranı, yaklaşık olarak 10' dan daha az olduğu zaman beton kesme kuvveti, tipik olarak sıyrılma davranışına sebep olacaktır ve çubuk Şekil 3.14b' de gösterildiği gibi sıyrılacaktır. Yani, göçme, donatının dişler arasındaki parçalanmış beton ile birlikte sıyrılıp çıkması ile gerçekleşecektir. Bunun yanında, sıyrılma göçmesi, beton örtü kalınlığının donatı çapından çok büyük olması ($c > 3\phi$) veya yarıma kuvvetine karşı koyan etkili enine basınç olması durumunda da meydana gelmektedir. Bu çalışmada da kullanılan donatı çubuklarında olduğu gibi, l/a oranı 10' dan büyük olduğu zaman, parçalanıp ufalanan betonun, nervürün önünde daha büyük kayma değerlerinde yarıma çatlağına neden olabilecek bir kama oluşturduğu görülmektedir (Şekil 3.14c). Böylece, donatının sıyrılma davranışı, yarıma çatlakları oluşacak şekilde kendini gösterir ve yapısal açıdan tehlike arz eden sıyrılıp-çıkma davranışı

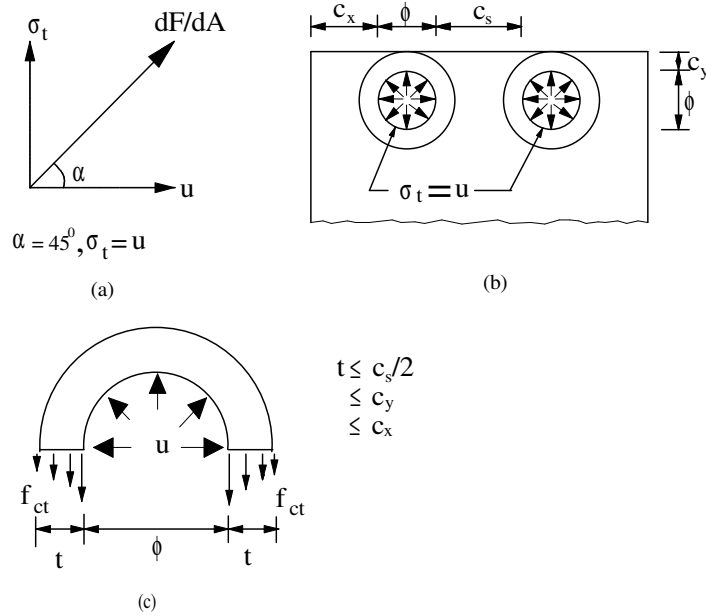
önlenmiş olur. Yani, donatı çubuğunun çevresini saran betona göre relatif kayması sonucu, nervürlerin betonda oluşturduğu düşey radyal çekme kuvvet beton örtü üzerinde halka gerilmeler oluşturur. Aderans kuvvetinden kaynaklanan söz konusu çekme kuvveti, beton çekme kapasitesini aşarsa, beton kaplamanın yarılma sonucu, aderans göçmesi oluşur.

Bunun yanında, söz konusu bu kamanın üst yüzeyi boyunca sıyrılma olabileceğinden yarıma çatlağı oluşabilmesi için Şekil 3.14a’ da gösterilen α açısının 40° den büyük olması koşulunun sağlanması zorunludur [73].

Donatı çubuğunun sıyrılması, nihai davranışı ve yapı elemanlarının kırılmasını etkileyen başlıca faktörlerden biridir. Sıyrılma davranışı, yukarıda da değinildiği gibi, çubuk özelliklerinin (geometrisi ve çelik tipi), beton özelliklerinin, beton örtü kalınlığının ve enine donatı miktarının bir fonksiyonudur.

3.8 Aderans Göçmesinin (Yarıma) Mekaniği

Aderans göçüşünün yarıma ile olması için, kullanılan donatının nervürlü olması, l/a oranının 10’ dan büyük olması ve α açısının 40° den büyük olması şartlarının sağlanması gerekir (Şekil 3.14).



Şekil 3.15 Yarıma kırılmasının modellenmesinde ‘iç basınçlı boru analojisi’ [67]

Yarılma çatlaklarının oluşma mekanizmasını daha iyi açıklamak için iç basınç altındaki boru analogisinden yararlanılabilir. Nervürlü donatıdaki çıkıntıların betona uyguladığı dış kuvvetleri, donatıya dik ve paralel iki bileşene ayrılabilir (Şekil 3.15a). Donatıya dik bileşeni, yarılma gerilmesi, paralel olan ise klasik aderans gerilmesidir. Betona uygulanan dış kuvvetlerinin eğimi genelde 45° dolaylarındadır. Bu sebeple, $\sigma_t = u$ varsayımı yapılabilir.

σ_t gerilmesi, iç basınç etkisi altındaki bir borunun iç basınç şiddetine eşittir. Kamalama kuvvetlerinin bu radyal bileşkeleri (σ_r), boru olarak düşünebileceğimiz beton örtü tabakasına basınç kuvvetleri şeklinde etkir (Şekil 3.15b). Bu beton örtünün (borunun) birimleri olarak tasarlanabilecek beton halkalarda ise, çekme gerilmeleri oluşur (Şekil 3.15c). Yarılma olarak adlandırılan kırılma, betonda oluşan bu çekme gerilmelerinin, betonun çekme dayanımını aşması sonucu oluşur ve ana donatı boyunca çatlama şeklinde görülür. Yarılma çatlaklarının tüm çubuk eksenini boyunca yayılmaları ile sonuçlanan bu göçüş ani ve tahripkâr olmaktadır.

Bu tür kırılmanın modellenmesinde uygun görülen “iç basınçlı boru analogisi” için bazı geometrik özelliklerin tanımlanması gerekir. Boru iç çapının donatı çapı olması, boru et kalınlığının, donatı çubuğu ile en yakın beton yüzü arasındaki uzaklık olarak alınması uygun olacaktır (Şekil 3.15b). Eğer donatı ile betonarme elemanın yan yüzü arasındaki uzaklık, betonun alt yüzüne olan uzaklıktan az ise, et kalınlığı c_x alınmalıdır. Aynı şekilde iki donatı arasındaki uzaklık $2c_x$ ve $2c_y$ ’ den küçük olması durumunda et kalınlığı $t = c_x/2$ olarak alınmalıdır. Yani boru et kalınlığı $c_x/2$, c_x ve c_y den en küçük olanı alınmalıdır. Bu durumda borunun dış çapı, $(\phi + 2t)$ olur ve $\sigma_t = u$ olduğundan iç basınç u olarak alınabilir.

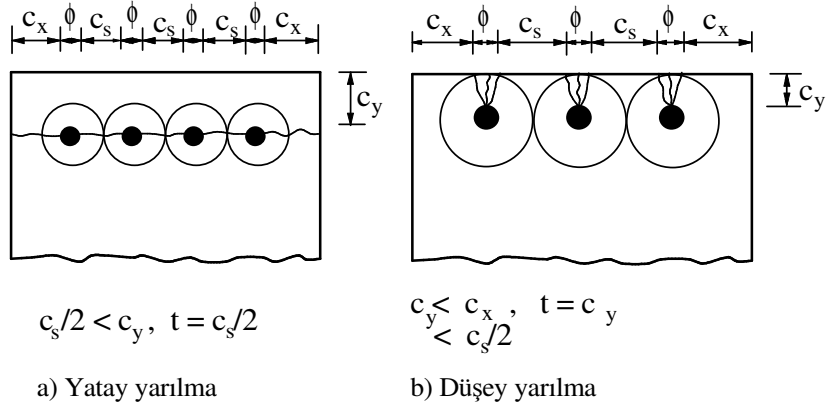
u iç basıncı etkisinde, kalın çeperli bir silindirde oluşan maksimum ve minimum çekme gerilmelerinin ortalaması, Şekil 3.14c’ den faydalanarak Denklem (3.8) ile ifade edilebilir.

$$f_{ct} = \frac{u r_1}{\left(\frac{r_2}{r_1}\right) r_2 - r_1} \left(1.5 + 0.5 \frac{r_2^2}{r_1^2} \right) \quad (3.8)$$

Burada r_1 , boru iç yarıçapını ($r_1 = \phi / 2$), r_2 dış yarıçapını ($r_2 = \phi / 2 + t$) göstermektedir [67].

Çekmeye maruz aderansı geliştirilmiş donatının betondan sıyrılması ve yukarıda bahsedilen şartlar göz önüne alındığında, betonarme bir kirişte aderans nedeni ile meydana gelecek yarılmanın, donatı sıklığına bağlı olarak değişeceği açıktır. Bu durumda yarılma, donatı dizisi düzeyinde yatay bir düzlemde veya donatı çubuklarının beton örtüyü yırtması ile düşey bir düzlemde oluşabilir

(Şekil 3.16a, b). Yarılmamanın nasıl olacağı c_s/c_y oranına bağlıdır. Yani, $c_s/c_y > 2.0$ olduğunda yatay yarıлма, $c_s/c_y < 2.0$ olduğunda ise, düşey yarıлма (beton örtünün yırtılması) meydana gelir. Prof. Ferguson' un deneyleri bu yarılmamanın doğruluğunu kanıtlamaktadır [64].



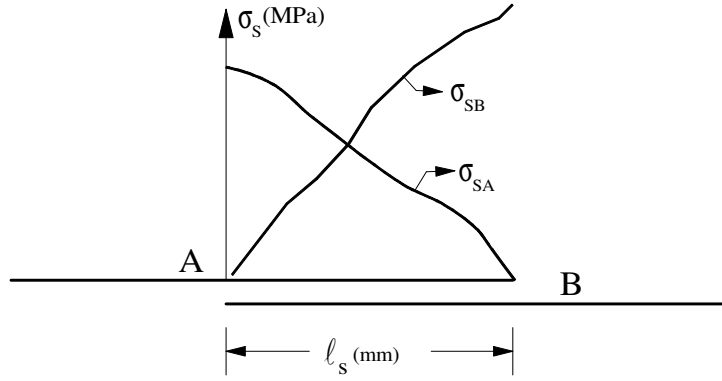
Şekil 3.16 Yarıлма çatlakları [64]

3.9 Bindirmeli Eklmeler

Yapım zorlukları ile ilgili teknik zorlamalar ve taşınmada kolaylık sağlamak amacıyla betonarme çelik çubukların boyları belirli sınırları aşmaz. Fakat uygulamanın üretilen donatı boylarından daha uzun olmasını gerektirmesi durumunda, çubukların eklenmesi yoluna gidilir. Başka pratik zorunluluklar da çubukların eklenmesini gerektirebilir. Çekme donatısında yapılan bindirmeli eklerde düz yüzeyli çubuk kullanılıyorsa, kanca yapılması zorunludur. Nervürlü çubuklar için böyle bir zorunluluk yoktur.

Bindirmeli eklelerde gerilme, bir çubuktan diğerine aktarılmaktadır. Şekil 3.17' de gösterildiği gibi, bu aktarma tek bir noktada sağlanamaz. Bindirme boyu kısa tutulduğunda, aşırı gerilme yığılmaları kaçınılmaz olur. Bu nedenle yönetmeliklerde, minimum bindirme boyu, “temel kenetlenme boyu” ℓ_b 'ye göre belirlenir.

Şekil 3.18' de, eğilmeye maruz bir elemanda eklenmiş çubukların, beton örtüyü yararak kırılmaya fazlasıyla eğilimli durumda olan beton ve çelik ara yüzeyinde, yüksek kontak gerilmeleri ürettiği görülmektedir. Eklenmiş çubuklarda meydana gelen gerilmeler sonucu, olası yarıлма çatlak modelleri Şekil 3.19' da gösterilmektedir.



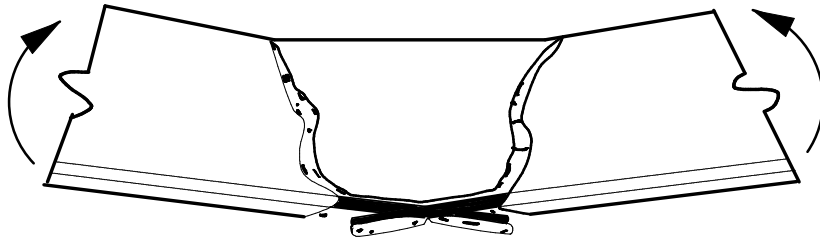
Şekil 3.17 Bindirmeli eklemelerde çubuklardaki gerilmelerin birinden diğerine aktarılması [64]

Ayrıca donatı çubuk gerilmesi, beton basınç dayanımı, yan ve alt beton örtü kalınlığı, enine donatı miktarı ve aderans durumu gereken ekleme uzunluğunun belirlenmesinde önemli etkiye sahiptirler.

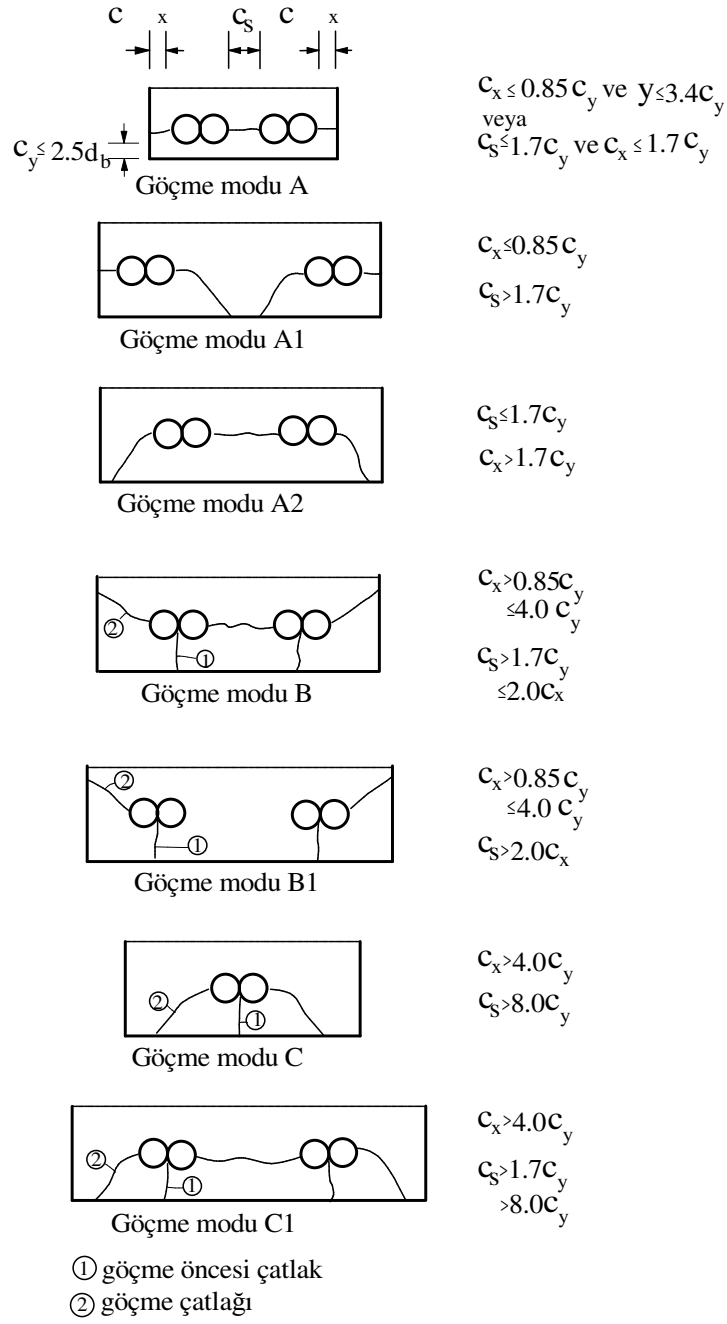
Yapılan test sonuçlarına göre, gerekli ekleme uzunluğu, donatı aralığının ve etriye miktarının artmasıyla azalmaktadır. Bunun yanında, boylamasına uzun çatlaklardan sakınmak için minimum enine donatı kaçınılmazdır [76]. Bununla beraber, enine donatı olarak düz çubuklar (duvarlarda ve döşemelerde eklemeler için yaygın olarak kullanılır), gerekli bindirme uzunluğu üzerinde hemen hemen hiçbir etkiye sahip değildir.

Kenetlenme davranışı ve uzunluğu ile ekleme davranışı ve uzunluğu farklı kabul edilmektedir [21]. Bununla beraber, CEB-FIP MC90'da kenetlenme uzunluğu ile ekleme uzunluğu aynı kabul edilmektedirler.

Bindirmeli eklerin ucunda yoğunlaşan gerilme yığılmaları nedeni ile, özellikle nervürlü donatı kullanılan durumlarda, beton örtünün yarılma olasılığı artar. Bu nedenle, kiriş eksenine dik ölçülen ekler arası uzaklık ve beton örtü kalınlığı mümkün olduğu kadar büyük olmalıdır.



Şekil 3.18 Eğilmeye maruz bir elemanda çubuk rijitliği sebebiyle beton örtünün göçmesi [76]



Bindirmeli Ekli Kirişlerde Göçme modları

Şekil 3.19 Eklenmiş çubukların yarıлма çatlak modelleri [76]

Bindirmeli eklemelerin, bindirme boyunca etriye ile sarılması son derece yararlı olacaktır. Bu tür etriyeler betonu sararak yarılmaya karşı dayanımı artırmalarının yanısıra, özellikle büyük çaplı donatı durumunda, Şekil 3.18 'de gösterildiği gibi, rijit cisim dönmesi sonucu betonun yırtılmasını da önler [64].

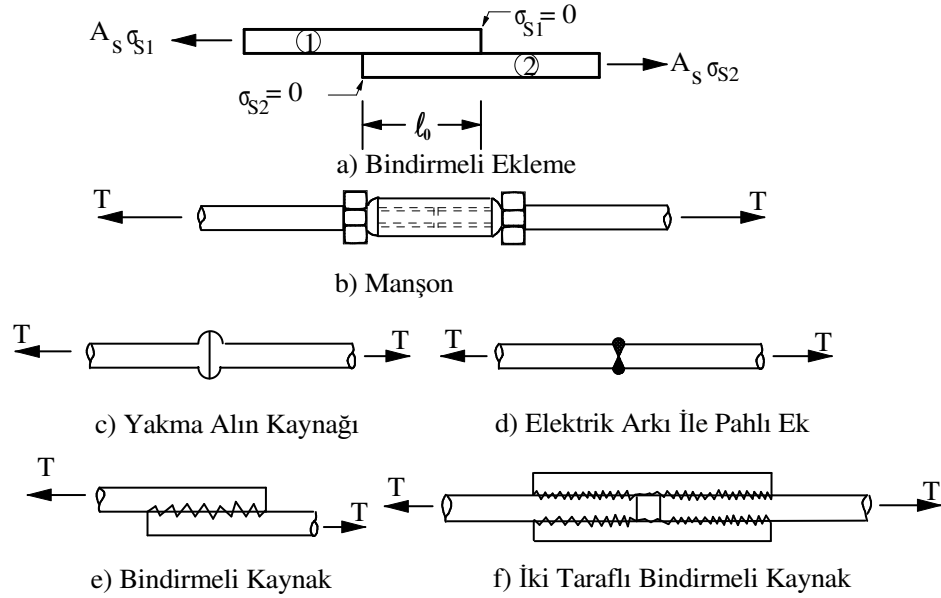
3.10 Bindirmeli Ekli Çubuklar için TS 500'ün Şartları

TS 500, beton donatısının eklenmesi için, bindirmeli ekleme ve mekanik ekleme (Manşon, kaynak vb.) yöntemlerini önermektedir.

Manşon iki bölümden oluşur. Dişi bölüm manşonun kendisi olup, bir tarafı sağ, diğer tarafı sol dişlidir. Erkek bölüm ise, eklenecek çubukların yivlenmiş uçlarıdır. Manşon çeliği eklenecek çubuklarınkine uymalıdır. Erkek bölümün çekirdeğinde eklenecek çelik çubuğun emniyet gerilmesine izin verilir (Şekil 3.20b).

Kaynaklı eklerde bu konuda denenmiş iş gücü kullanılmalı ve donatıya uygulanacak kaynaklama için mümkün olduğunca Şekil 3.20c ve d'de gösterilen türler kullanılmamalıdır. Şekil 3.20e ve f'de gösterilen kaynaklı ekler kullanıldığında, kaynak yapımına özen gösterilmeli ve kullanılan çeliğin özelliklerinin kaynaklama esnasında değişmediği kanıtlanmalıdır. Kaynaklı eklerde kesit alanı %20 azaltılmalıdır.

Pratikte en fazla kullanılan ve en az sorun çıkaran ekleme türü, bindirmeli eklemedir (Şekil 3.20a). Bireysel çubuklardan oluşan bindirmeli eklerde, iki çubuk arasındaki uzaklık hiçbir zaman 4ϕ 'yi geçmemelidir. Aynı kesitteki iki bindirme ekinin arasındaki serbest uzaklık en az 2ϕ veya 20 mm olmalıdır.



Şekil 3.20 Bindirmeli ekleme türleri [64]

Birden fazla çubuğun ek yapılması gerekliliğinde, ekler mümkün olduğu kadar şaşırtılarak yapılmalıdır. İki ek arasında eleman eksenı boyunca ölçülen uzaklık $1.5\ell_s$ veya daha büyük olursa, ek şaşırtılmış varsayılabilir.

3.10.1 Çekme Donatısının Eklenmesi

Bindirmeli eklerde bindirme boyu ℓ_s , Denklem (3.9)' dan hesaplanır.

$$\ell_s = \alpha_1 \ell_b \quad (3.9)$$

$$\alpha_1 = 1 + 0.5r$$

Burada, “r” aynı kesitte eklenen donatının toplam donatıya oranıdır. Bütün kesiti çekme taşıyan elemanlarda, $\alpha_1 = 1.8$ alınır. Konum I' e giren çubuklarda, ℓ_s , 1.4 çarpanıyla arttırılır.

Bindirmeli ek yapılan çubukların uçları kancalı ise, bindirme boyu Denklem (3.9)' dan elde edilen değerin $\frac{3}{4}$ 'üne kadar azaltılabilir.

Bindirmeli eklerde, bindirme boyunca sargı donatısı bulundurulması gereklidir. Sargı donatısının çapı, en az eklenen donatı çapının 1/3'ü veya $\phi 8$ olmalıdır. Bindirme boyunca en az 6 sargı donatısı bulundurulmalı ve sargı donatısı aralığı eleman yüksekliğinin 1/4'ünden ve 200 mm' den fazla olmamalıdır.

Betonarme yapı elemanlarında kullanılacak manşonlu eklerin, hem çekme hem de basınç altında, manşonla bağlanan donatı çubuğu için standartlarda öngörülen minimum karakteristik akma dayanımının 1.25 katı dayanıma sahip olduğu deneylerle kanıtlanmalıdır.

Kaynaklı ek yapılacak çubukların metalürjik analizi yapılmalı ve çeliğin özellikle karbon içeriği açısından kaynaklamaya uygun olduğu kanıtlanmalıdır. Kaynaklı ekler TS 708' e [77] uygun olarak yapılmalıdır.

3.10.2 Basınç Donatısının Eklenmesi

Bindirmeli eklerde bindirme boyu, Denklem (3.10)' da belirtilen kenetlenme boyundan ve 300 mm' den az olmamalıdır. Basınç donatısındaki bindirmeli eklerde kanca yapılmamalıdır. Bindirme boyunca, çekme donatısında tanımlanan sargı donatısının aralığı $d/4$ 'ten az olmalıdır. Çapı 30 mm' den büyük olan donatı çubuklarına bindirmeli ek yapılamaz. Bu çubuklar yeterliliği deneylerle kanıtlanmış özel manşonlarla eklenmelidir.

$$\ell_b = 0.12 \frac{f_{yd}}{f_{ctd}} \phi \geq 20\phi \quad (3.10)$$

Basınç donatısındaki manşonlu ve kaynaklı ekler, çekme donatısında tanımlandığı gibi yapılmalıdır.

4. KULLANIM YÜKLERİ ALTINDA ADERANS HESABI

4.1 Giriş

20. y.y.'lin başlarından itibaren ortalama aderans dayanımının ve kenetlenme boyunun belirlenmesinde çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, daha çok kenetlenme ve ekleme boyunun belirlenmesinde önemli gelişmeler sağlamıştır. Kullanılan deney türlerinin sadece rölatif değerlendirmelere müsaade edebilen özellikte ve gerçek durumu yansıtmaktan uzak olması da bu konuda yoğunlaşmaya sebep olmuştur.

1970'lerden sonra, yapılan çalışmalar daha çok donatı aderans dayanımının belirlenmesine yönelik olmuştur. Günümüze kadar süre gelen bu çalışmalarda, deney türü olarak, genelde gerçeğe daha yakın sonuçlar verebilen bindirmeli ekli kiriş numuneleri kullanılmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmaların çoğu, ACI Şartnamesi'ne paralel yürütülmektedir.

4.2 Bindirmeli Ekli Kirişlerde Aderans Dayanımının Bulunması

Aderans ile ilgili birçok deney türünün olduğu bilinmektedir. Fakat donatı aderans dayanımının belirlenmesinde ve daha gerçekçi bir sonuca gidebilmede, büyük boyutlu ve çekme donatısı sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli olarak yerleştirilen kiriş deneylerin en uygun olduğu bu konuda yapılan son çalışmalardan görülmektedir. Bu deney türünde, çekme donatısı olarak genelde nervürlü demir kullanılmaktadır. Deney kiriş numuneleri, etriyeli veya etriyesiz olarak tasarlanabilmektedir.

Basit mesnetli ve çekme donatısı bindirmeli ekli yerleştirilmiş kiriş numuneleri, açıklık ortasında sabit moment bölgesinden dört noktali pozitif eğilme ile yüklenirler. Kiriş numunelerde, sabit moment bölgesinde üst üste eklenen donatıların ekleme uzunlukları, donatı akmaya ulaşmadan önce, aderans kırılması (yarılma göçme modu) olabilecek şekilde seçilir. Yarılma göçme modu, bindirmeli ekli donatıların maksimum kapasitesine ulaştığını göstermektedir. Çünkü, yükleme esnasında donatı nervürleri, beton dışları zorlayarak, donatı çubuğunun etrafını saran betonda çubuk eksenine dik radyal gerilmeler oluşturmaktadır. Söz konusu gerilmeler ise, çok sayıda yarılma çatlağının oluşmasına ve dolayısıyla donatı akmaya ulaşmadan önce numunenin göçmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple, aderans dayanımı, donatıda meydana gelen gerilme ile direkt alakalı olmaktadır. Donatı çubuğundaki gerilme (σ_s) ise, elastik hesap yöntemi kullanılarak tamamen çatlamış kesit analizi ile hesaplanabilir.

Donatıdaki gerilmenin hesabında, her bir numune için elde edilen maksimum yük esas alınır. Ortalama aderans gerilmesini belirlemek için, donatıdaki toplam kuvvet ($A_s \sigma_s$), bindirme uzunluğu boyunca olan donatı yüzey alanına ($\pi d_b l_s$) bölünür:

$$u = \frac{(A_s \sigma_s)}{\pi d_b l_s} = \frac{\sigma_s d_b}{4 l_s} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1) ile deneylerden elde edilen datalar kullanılarak ortalama aderans dayanımı belirlenir.

4.3 Elastik Hesap Yöntemi

Betonarme hesaplarının başlangıcı, mukavemet derslerinde kullanılan ilkelerin betonun çekme gerilmesi taşınamaması şeklindeki ek kabulle genişletilmesi şeklinde olmuştur. Bu nedenle 1900’lerde başlayan devrede, kullanım yüklemesi altında malzemeler için belirlenecek emniyet gerilmelerinin aşılmamasını esas alarak boyutlama yapılmıştır. Emniyet Gerilmeleri Yöntemi veya Elastik Hesap Yöntemi olarak bilinen bu hesap şekli, 1960’lara kadar uzun süre kullanılmıştır. 1985’de yayınlanan TS 500 yönetmeliğinde de Elastik Hesap Yöntemi, kesitlerin boyutlandırılmasında kullanılacak bir seçenek olarak bulunmaktadır [78].

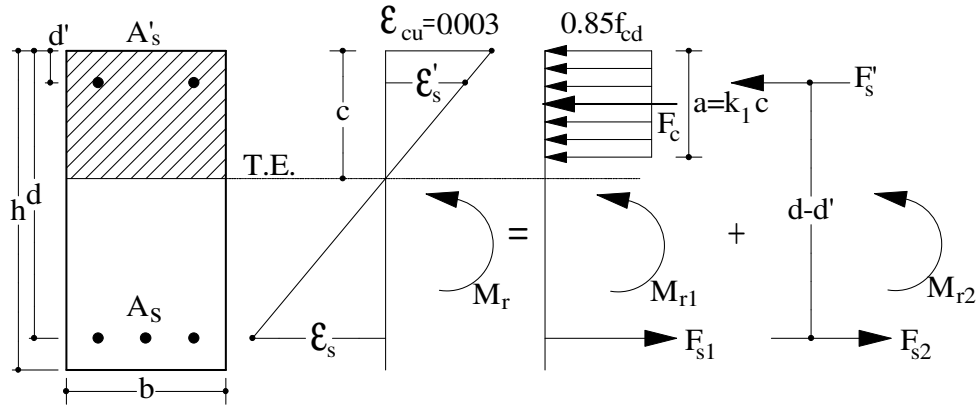
Herhangi bir kesit hesabında olduğu gibi elastik hesap yöntemi için de bazı temel varsayımların yapılması gerekir. Bu varsayımlar denge ve uygunluk denklemlerinin yazılabilmesi ve çözümlenebilmesi için zorunludur. Söz konusu varsayımlar:

1. Bernouilli-Navier varsayımı geçerlidir. Yani, şekil değiştirmelerin, tarafsız eksen den uzaklıklarıyla doğru orantılı olarak değiştiği kabul edilir (Şekil 4.1)
2. Betonun çekme dayanımı ihmal edilmektedir. Betonun çekme bölgesinde tamamen çatlamış olduğu kabul edilir.
3. Beton ile donatı arasındaki aderans veya yapışma tamdır.
4. Hem beton hem de çelik gerilmeleri yayılışının doğrusal olduğu kabul edilir. Yani, lineer gerilme-şekil değiştirme davranışı varsayımı esas alınır.
5. Gerilme diyagramı, beton gerilmeleri esas alınarak çizilir. Betonun ve donatının yan yana bulunduğu bölgede şekil değiştirmeleri eşit olduğundan, donatı gerilmeleri, beton gerilmelerinin $n = E_s / E_c$ katıdır.
6. Kesitte birkaç sıra donatı varsa, hesaplarda, bunların şekil merkezindeki gerilme değeri esas alınır.

4.4 Eğilme Etkisi Altındaki Çift Donatılı Betonarme Elemanların Çözümlemesi

Kiriş kesitlerinde basınç bölgesinde montaj donatısı bulunur. Bu donatının momentin taşınmasına katkısının göz önüne alınması için çift donatılı kesit düzeni tercih edilebilir (Şekil 4.1). Çift donatılı bir kesitin boyutlandırılmasında izlenecek en uygun yol, önce kesitin tek donatı ile taşıyabileceği en büyük eğilme momenti değerinin bulunmasıdır. Çift donatılı kesit düzenlemesinde $\rho = 0.85\rho_b$ durumuna karşı gelen şekil değiştirme durumu esas alınarak taşınabilecek eğilme momenti ve gerekli çekme donatısı bulunur. Geri kalan momentin karşılanması için çekme ve basınç bölgesine konulması gerekli ek donatı hesap edilir.

Şekil 4.1' de çift donatılı kesite ait iç kuvvetler gösterilmiştir. Kesitin geometrik boyutları ve malzeme değerleri verildiğine göre taşıma gücünün bulunması, tek donatılı kesitlerde olduğu gibi yapılabilir. Bu işlem, ifadelerinin basitliği bakımından dikdörtgen, gerilme bloğu kabulü esas alındığında, aşağıdaki gibi yapılabilir: Kesitteki basınç kuvveti, betondaki ve basınç donatısındaki olmak üzere ikiye bölünür. Basınç donatısının akma gerilmesine erişip erişmemesi tarafsız eksenin kesitteki yerine bağlıdır. Şekil 4.1 esas alınarak aşağıdaki bağıntılar yazılabilir:



Şekil 4.1 Çift donatılı dikdörtgen kesitte şekil değiştirme ve gerilmeler

$$F_c = 0.85 f_{cd} a b$$

$$F'_s = A'_s \sigma'_s$$

$$M_{r1} = 0.85 f_{cd} a b (d - 0.5 a)$$

$$M_{r2} = A_s \sigma'_s (d - d')$$

$$M_r = M_{r1} + M_{r2} \text{ Bağıntısında } M_{r1} \text{ ve } M_{r2} \text{ değerleri yerine yazılırsa}$$

$$M_r = 0.85 f_{cd} a b (d - 0.5 a) + A_s' \sigma_s' (d - d') \quad (4.2)$$

$$\sigma_s' = E_s \epsilon_s' = E_s \epsilon_{cu} \frac{c - d'}{c} \quad (4.3)$$

(4.3) bağıntısı ve tarafsız eksen $c = \frac{a}{k_1}$, (4.2) bağıntısında yerine yazılarak,

$$(0.425 f_{cd} b_w) a^3 - (0.85 f_{cd} b_w d) a^2 + (M_r - A_s' E_s \epsilon_{cu} (d - d')) a + (k_1 A_s' E_s \epsilon_{cu} d' (d - d')) = 0$$

(4.4) bağıntısı bulunur. Bu bağıntıda k_1 değeri beton sınıfına bağlı bir katsayıdır ve değeri aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır:

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

Üçüncü dereceden bir bilinmeyenli (4.4) bağıntısından bulunan a değeri ile c mesafesi hesaplanıp, (4.3) bağıntısında yerine yazılırsa σ_s' gerilmesi elde edilir.

$$F_t = 0.85 f_{cd} b_w a + \sigma_s' A_s' \quad (4.5)$$

(4.5) bağıntısından asal donatının karşıladığı kuvvet hesaplanır ve

$$F_t = \sigma_s A_s \quad (4.6)$$

(4.6) bağıntısında yerine yazılırsa asal donatının karşıladığı gerilme σ_s bulunur.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1 Malzemeler

Bu çalışmada, Oyak Çimento Grubuna ait olan Elazığ Çimento Fabrikası'ndan temin edilen N tipi Portland Çimentosu (CEM I 42.5) kullanılmıştır. Ayrıca, kendiliğinden sıkışan betondaki ince toz malzeme (<0.125 mm) miktarına da katkı sağlamak amacıyla Tunçbilek Termik Santraline ait F sınıfı uçucu külü ve Eti Elektro Metalurji A.Ş.'den temin edilen silis dumanı karışıma mineral katkı olarak katılmıştır. Agregalar ise Elazığ Murat nehrinden temin edilmiştir. Beton karışımındaki mümkün olabilecek en yüksek homojenlik ve doluluğu sağlamak amacıyla, agregalar 0–7, 7–15 ve 15–20 mm tane sınıflarına ayrılmış olup, karışım hesaplarında agregaların doymun kuru yüzey özgül ağırlıkları sırasıyla 2.63, 2.64 ve 2.66 gr/cm^3 olarak alınmıştır. Agregaların toz miktarları 0–7, 7–15 ve 15–20 sınıfları için sırasıyla %2.48, %0.21 ve %0.13 olarak, su emmeleri ise sırasıyla %1.57, %1.0 ve %0.7 olarak hesaplanmıştır. Kullanılan uçucu kül, silis dumanı ve Portland çimentosuna ait kimyasal bileşim ve fiziksel özellikler ise Tablo 5.1' de verilmiştir.

Tablo 5.1 Portland çimentosu, uçucu kül ve silis dumanının kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri

Muhteva	PC	UK	SD
SiO ₂ (%)	20.2	58.82	91
Al ₂ O ₃ (%)	5.8	19.65	0.58
Fe ₂ O ₃ (%)	3.23	10.67	0.24
CaO (%)	64.1	2.18	0.71
MgO (%)	-	3.92	0.33
SO ₃ (%)	2.66	0.48	-
Klorür (Cl ⁻) (%)	0.006	-	-
Kızdırma kaybı (%)	2.58	0.91	1.84
Özgül ağırlık (g/cm^3)	3.1	2.08	2.2
Özgül yüzey alanı (cm^2/g)	3484	3812	96.5% <45 μm

Bu çalışmada, Portland çimentosu yerine mineral katkı olarak % 25, 30, 35 ve 40 oranlarında uçucu kül ve % 5, 10, 15 ve 20 oranlarında silis dumanı kullanılarak 8 tip kendiliğinden sıkışan beton ve karşılaştırma amacıyla da sadece Portland çimentosu içeren

kontrol betonu karışımı olmak üzere 9 tip beton kullanılmıştır. Beton karışımlarının benzerliğinde su/çimento oranının 0.38-0.40 civarında olması hedeflenmiştir. Elde edilen betonlara ait karışım oranları Tablo 5.2’ de verilmiştir.

Tablo 5.2 Kullanılan betonlara ait karışım oranları (kg/m³)

Karışım	Kontrol Betonu	Uçucu küllü KSB				Silis dumanlı KSB			
		UK25	UK30	UK35	UK40	SD5	SD10	SD15	SD20
su/toz	0.39 ^a	0.39	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.40	0.40
Bağlayıcı malzeme	-	500	500	500	500	450	450	450	450
Çimento	350	375	350	325	300	427.5	405	382.5	360
Uçucu kül	-	125	150	175	200	-	-	-	-
Silis dumanı	-	-	-	-	-	22.5	45	67.5	90
Agrega büyüklüğü									
0-7 (mm)	800	910	910	910	910	990	990	990	990
7-15 (mm)	500	450	450	450	450	450	450	450	450
15-20 (mm)	650	285	285	285	285	285	285	285	285
Viscocrete 3075	-	6.75	6.75	6.75	6.75	8.00	8.00	8.00	8.00
Sikament-FFN	5.50	-	-	-	-	-	-	-	-

^a: su/çimento oranı

Tablo 5.3 KSB’ ların taze beton özellikleri

KSB deneyleri	Kontrol Betonu	Uçucu küllü KSB				Silis dumanlı KSB			
		UK25	UK30	UK35	UK40	SD5	SD10	SD15	SD20
Çökme (mm)	68	709 ^b	702 ^b	705 ^b	701 ^b	707 ^b	701 ^b	708 ^b	707 ^b
T ₅₀₀ (s)	-	2.44	2.56	3.00	2.89	2.30	1.80	1.20	1.00
V-hunisi akma zamanı (s)	-	4.50	5.00	5.39	5.52	3.81	3.19	2.44	2.26
L-kutusu; H ₂ /H ₁	-	0.910	0.943	0.953	0.959	0.865	0.876	0.888	0.890
Segregasyon (%)	-	18.4	15.8	15.2	14.4	15.3	17.9	19.8	22.0

^b: çökme-yayılma değerleri

Betonların üretiminde maksimum tane çapı 20 mm olan doğal çakıl ve nehir kumu (<4 mm) kullanılmıştır. Tablo 5.3’ de elde edilen çökme-yayılma değerleri 1.06 gr/cm³ yoğunluğa sahip modifiye polikarboksilat esaslı bir süper akışkanlaştırıcı (SA) olan Viscocrete 3075 karışımına (çimento+uçucu kül) ve (çimento+silis dumanı) miktarının sırasıyla %1.35 ve %1.78’ i oranlarında katılarak bulunmuştur.

KSB karışım oranları deneme testleri ile birlikte EFNARC esas alınarak tayin edilmiştir. KSB karışımı için çökme-yayılma, T_{500} , L-kutusu ve elek segregasyon (Şekil 5.2) işlenebilirlik deneylerine ait değerleri karışımlardaki su miktarları ayarlanarak elde edilmiştir. Normal betona ait karışım oranlarının belirlenmesinde ise, yine su miktarı değiştirilip Şekil 5.2’ de gösterildiği gibi çökme deneyi kullanılarak karışım kıvamı ayarlanmıştır. Üretilen betonların Tablo 5.3’ de verilen işlenebilirlik testlerine ait değerler göstermiştir ki, KSB karışım oranları iyi bir doldurma ve geçme kabiliyetinin yanında, yeterli segregasyon direncine sahiptir ve kontrol betonu ise, kabul edilebilir çökme değerleri arasındadır (Tablo 5.3).



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.1. Kendiliğinden sıkışan beton için a) çökme-yayılma ve T_{500} b) L-kutusu c) elek segregasyon d) V-hunisi deneyleri



Şekil 5.2 Kontrol betonu için çökme deneyi

5.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması

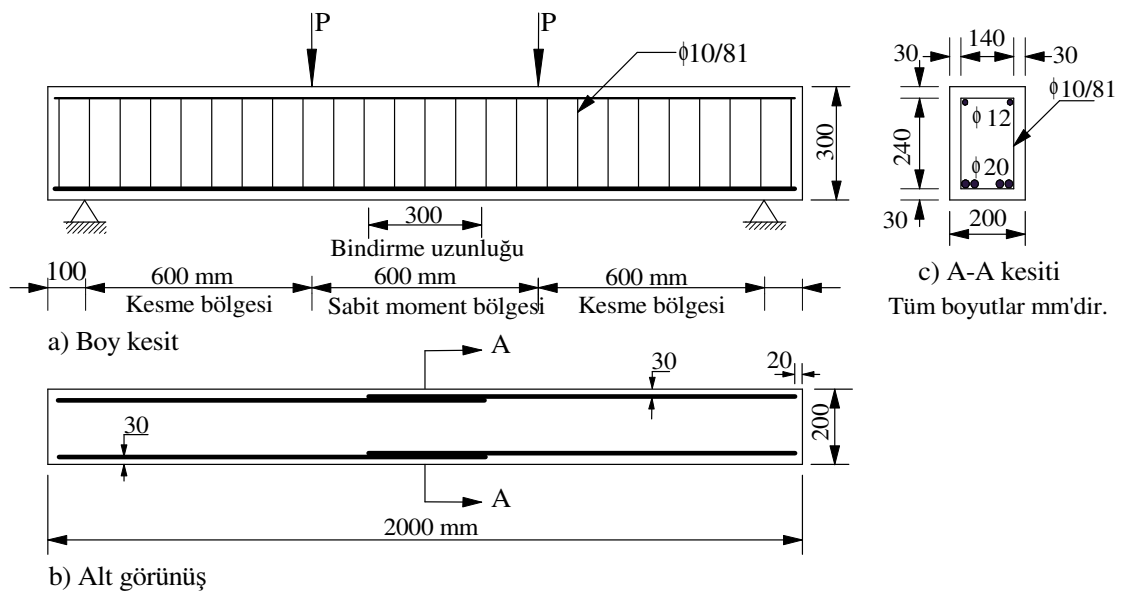
Çalışmanın esasını teşkil eden basit eğilme deneyi için toplam 27 adet tam ölçekli ve dikdörtgen kesitli kayma donatılı kiriş numuneleri hazırlanmıştır. Her bir kiriş, açıklık ortasında üst üste bindirilmiş çekmeye maruz iki adet $\phi 20$ nervürlü donatı çubuğu, iki adet $\phi 12$ montaj donatısı ve 25 adet $\phi 10$ kayma donatısının yerleştirilmesiyle tasarlanmıştır. Bindirme uzunluğu, donatı akmaya ulaşmadan önce, bindirme bölgesindeki beton örtüyü yaparak, aderans göçmesi olabilecek şekilde seçilmiştir (Şekil 5.3). Çekme ve montaj donatısına ait numuneler üzerinde, üniversitemiz Makine Mühendisliği bölümünde TS 708'e göre çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri sonucunda donatı çubuklarının Tablo 5.4'te gösterilen mekanik özelliklere sahip oldukları tespit edilmiştir. Bütün numuneler için, donatı elastisite modülü 200000 MPa olarak alınmıştır [65].

Tablo 5.4 Donatı çubuklarına ait mekaniksel özellikler

Donatı Tipi	ϕ (mm)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	f (MPa)	Kopma uzaması (%)
S 420	12	113.10	490.44	789.80	20.00
	20	314.16	509.55	780.25	23.60



Şekil 5.4’ de, deney numunelerine ait geometrik durum, kesit ve görünüş verilmiştir.



Şekil 5.4 Deney numunelerine ait geometrik özellikler

Tüm karışımların karıştırma işlemi, karışımda homojenliği sağlamak amacıyla öncelikle etiv kurusu durumda olan çakıl ve kum karışım suyunun %60' ı ile birlikte 2 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra bu işlem çimento, mineral katkı (sadece KSB karışımları için), geriye kalan su ve süper akışkanlaştırıcının birlikte karışıma katılarak, 250 L hacimli mikser yardımıyla toplam 6 dakikada tamamlanmıştır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 250L hacimli mikser

Karıştırma işlemi tamamlanan karışımlar el arabası yardımıyla yaklaşık 10 m mesafedeki çelik kalıplara dökülmüştür. Kontrol betonu numunelerinde kalıba yerleştirildikten sonra vibratörle sıkıştırma işlemi yapılırken, KSB' lar için herhangi bir sarsma ya da sıkıştırma işlemine gerek duyulmadan betonlar kalıba yerleştirilmiştir. Her deney serisi için üç adet 150×150 küp numune alınmıştır. Hazırlanan küp ve kiriş numuneleri 1 gün kalıpta bekledikten sonra kalıptan çıkarılıp 28 gün süreyle naylon altında ıslak bezlerle kür edilmiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Kiriş ve küp numunelerinin kür edilmesi

Test edilecek olan kiriş numunelerine ait yükseklik (h) ve genişlik (b) ile birlikte beton basınç dayanımı (f'_c), donatı çapı (ϕ), çekme donatısı bindirme uzunluğu (l_s) ve donatı oranı (ρ) gibi detaylar Tablo 5.5' de verilmiştir.

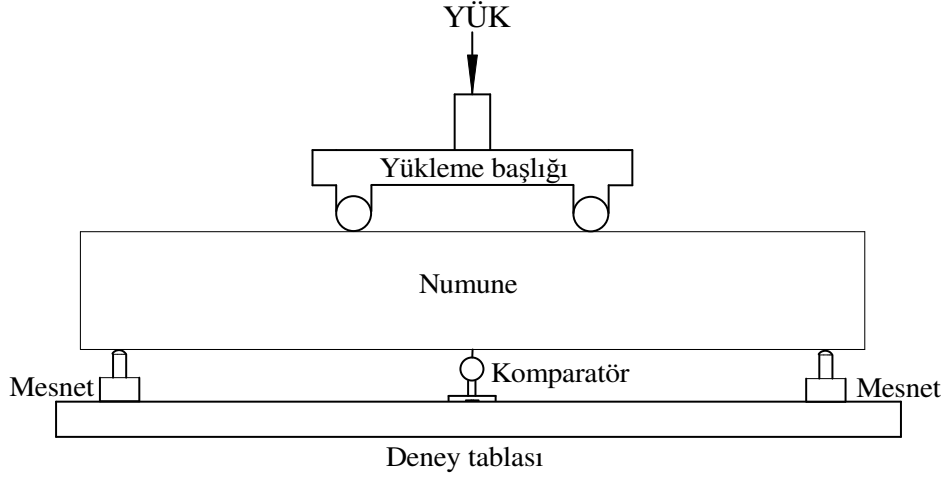
Tablo 5.5 Kiriş numunelerine ait özellikler

Numune No	f'_c (MPa)	ϕ (mm)	l_s (mm)	b (mm)	h (mm)	ρ
K-Kontrol	41.48	20	300	200	300	0.0116
K-KSB-UK25	35.52	20	300	200	300	0.0116
K-KSB-UK30	42.23	20	300	200	300	0.0116
K-KSB-UK35	38.47	20	300	200	300	0.0116
K-KSB-UK40	33.51	20	300	200	300	0.0116
K-KSB-SD5	36.48	20	300	200	300	0.0116
K-KSB-SD10	44.05	20	300	200	300	0.0116
K-KSB-SD15	47.64	20	300	200	300	0.0116
K-KSB-SD20	47.60	20	300	200	300	0.0116

5.3 Deney Düzeneği ve Test İşlemi

Deney kirişleri, 1800 mm açıklıklı, basit mesnetli kirişlerdir (Şekil 5.4). Numuneler yükleme kapasitesi 250 kN olan hidrolik ve yük kontrollü makine ile yüklenmiştir. Test makinesinden yük, deney kirişi üzerindeki rijit çelik başlık vasıtasıyla eşit olarak yoğunlaştırılmış iki tekil yük ve iki mesnet olmak üzere dört noktalı eğilme şeklinde sağlanmıştır. Sehimler ise, açıklık ortasına yerleştirilen komparatör yardımıyla ölçülmüştür. Bütün kirişlerde pik yüke ortalama 8 dakika civarında erişilmiştir. Şekil 5.7’ de deney düzeneğine ait detaylar görülmektedir.

Bu çalışmada, basit eğilme yüklemesi altında farklı tür ve oranlarda mineral katkı olarak uçucu kül ve silis dumanlı KSB ve normal betondan üretilmiş toplam 27 adet kiriş numunesi kullanılarak aderans olayı incelenmiştir. Deney numunelerinin tanımlanmasında ilk harf K, kiriş numunesi olduğunu, KSB kendiliğinden sıkışan betonu, UK uçucu külü, SD silis dumanını ve daha sonraki sayısal değerler de mineral katkının ne oranda kullanıldığını göstermektedir. Örneğin, K-KSB-UK25 tanımlaması, mineral katkı olarak çimentonun %25’i oranında uçucu kül içeren kendiliğinden sıkışan betonlu kiriş numunesini, K-KSB-SD15 de mineral katkı olarak çimentonun %15’i oranında silis dumanı içeren kendiliğinden sıkışan betondan üretilmiş kiriş numunesini temsil etmektedir.



Şekil 5.7 Deney düzeneği

Deneyler esnasında kiriş numunelerine ait genişlik (b), yükseklik (h), faydalı yükseklik (d) ve donatı çapı (ϕ) bütün testlerde sabit tutulmuş, değişken parametre olarak beton karışımında kullanılan mineral katkı türü ve dozajı seçilmiştir. Uygulanan yükler ve 35 kg/saniye yük artımındaki açıklık ortası sehimleri, yükleme esnasında göçme anına kadar sürekli olarak kaydedilmiş olup, çatlak gelişimi ve kırılma türü gözlemlenmiştir. Bütün kirişler, gevrek bir davranış ile bindirme uzunluğu üzerindeki beton örtününün yarılmaları sonucu, aderans göçmesiyle kırılmıştır.

5.4 Deney Bulguları

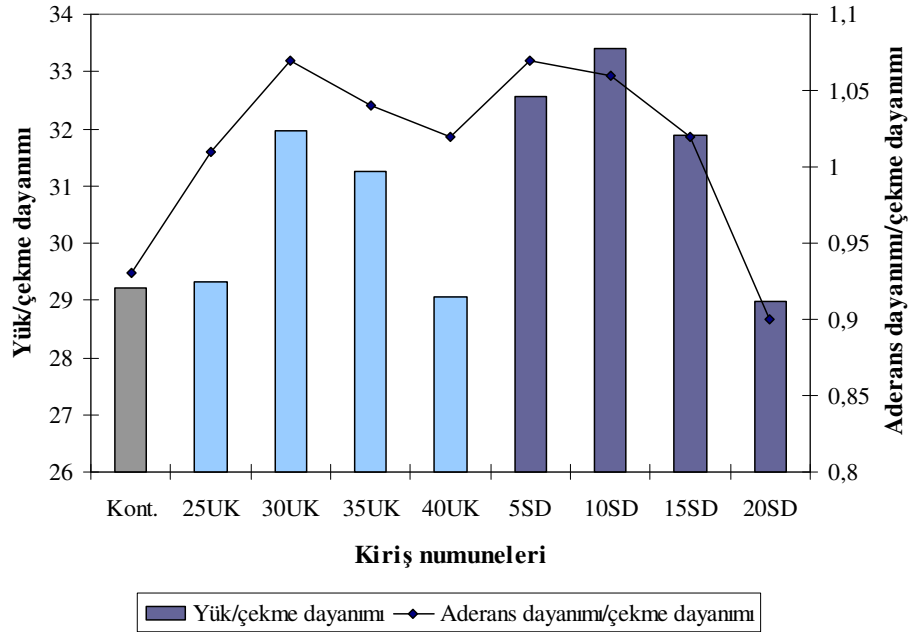
Tablo 5.7’ deki deney sonuçlarından, genelde KSB numunelerine ait aderans dayanımlarının normal beton numunelerinin aderans dayanımından daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte $p_{max} / \sqrt{f'_c}$ ve $u_{test} / \sqrt{f'_c}$ ’den yararlanarak çizilen Şekil 5.8’deki grafik incelendiğinde, aderans dayanımı olarak en iyi performansı %30 UK , %5 SD ve %10 SD oranına sahip kiriş numunelerinin sergilediği anlaşılmaktadır.

Uçucu küllü KSB kiriş numunelerinde %30 UK oranına sahip numunelerin (P_{max}) göçme yükü, tarafsız eksen derinliği (c), donatıda oluşan gerilme (σ_s) ve dolayısıyla aderans dayanımının en yüksek olduğu görülmüştür. Silis dumanlı KSB karışımlarına ait kiriş numunelerinde ise, %10SD içeren numunelerin göçme yükü, donatıda oluşan gerilme ve dolayısıyla aderans dayanımının daha yüksek olduğu ve SD oranı arttıkça tarafsız eksen derinliğinin azaldığı tespit edilmiştir.

Hesaplarda kullanılan maksimum moment (M_{max}), kiriş zati ağırlığı ve yükleme sisteminden dolayı oluşan momenti içermektedir.

Tablo 5. 7 Deney sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi

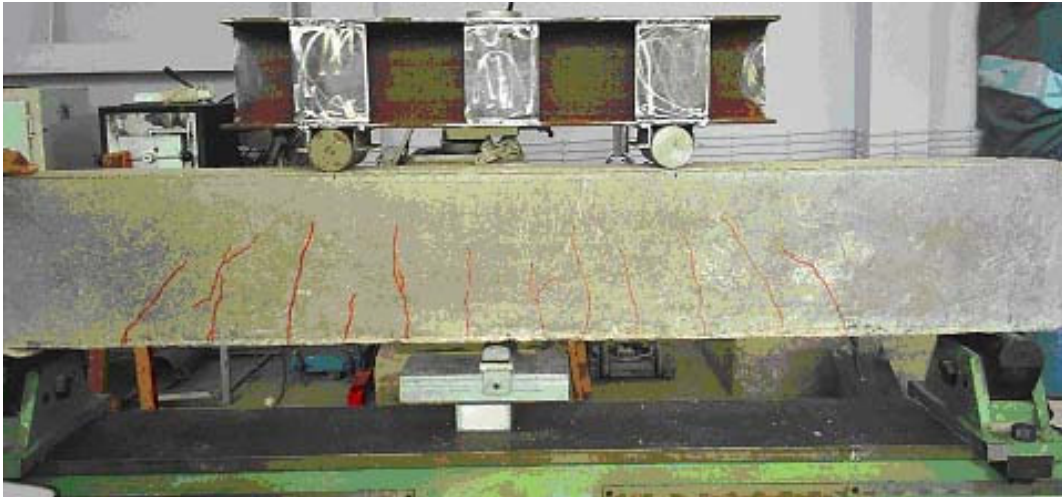
Numune No	İstatistik değerler	f'_c (MPa)	P_{max} (kN)	δ (mm)	c (mm)	σ_s (MPa)	u_{test} (MPa)
K-Kontrol	Ortalama Standart sapma	41.48 1.34	188.2 7.4	5.27 0.33	37.46 0.81	358.23 14.27	5.97 0.24
K-KSB-UK25	Ortalama Standart sapma	35.52 1.67	174.7 6.9	5.35 0.30	40.16 0.89	359.19 2.75	5.99 0.05
K-KSB-UK30	Ortalama Standart sapma	42.23 1.92	207.6 9.9	6.32 0.26	41.78 1.69	415.55 28.71	6.93 0.48
K-KSB-UK35	Ortalama Standart sapma	38.47 4.99	193.8 13.7	6.70 0.55	41.16 1.44	387.17 31.63	6.45 0.53
K-KSB-UK40	Ortalama Standart sapma	33.51 4.74	168.3 16.2	6.18 0.55	41.15 0.71	355.55 23.50	5.93 0.39
K-KSB-SD5	Ortalama Standart sapma	36.48 0.91	196.6 7.9	5.13 0.05	42.04 1.09	386.72 6.97	6.45 0.12
K-KSB-SD10	Ortalama Standart sapma	44.05 2.67	221.6 8.5	6.09 0.14	41.52 2.44	423.28 18.08	7.05 0.30
K-KSB-SD15	Ortalama Standart sapma	47.64 0.86	220.0 14.9	6.30 0.80	39.91 2.19	420.34 28.35	7.01 0.47
K-KSB-SD20	Ortalama Standart sapma	47.60 1.37	199.8 6.5	5.86 0.15	36.19 0.80	370.84 9.02	6.18 0.15

**Şekil 5.8** Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Şekil 5.9’da, bir kiriş numunesine ait çatlaklar görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, tüm numunelerin yan yüzlerinde eğilme çatlakları oluşmuş olup, deneyler esnasında yapılan gözlemlerden bütün numunelerin donatı bindirme bölgesindeki beton örtünün yarılmaması sonucu, ani ve gevrek bir kırılmayla göçtüğü tespit edilmiştir. Tüm kiriş numunelerine ait çatlak modelleri Bölüm Ek-1’ de resimlenmiştir.

Yarılma göçme modu, bindirmeli ekli donatıların maksimum kapasitesine ulaştığını göstermektedir. Bu nedenle aderans dayanımı direkt olarak donatıda meydana gelen gerilmeden tayin edilebilir. Donatıdaki gerilme ise Bölüm 4’te değinilen, elastik hesap yöntemi esaslarına göre tamamen çatlamış kesit analizi ile hesaplanmıştır.

Şekil 5.10-5.18’ deki deney numunelerine ait yük-sehim eğrilerinden, SD içeren karışımlara ait kiriş numunelerinin rijitliğinin UK içeren karışımlara ait kiriş numunelerine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Uçucu küllü KSB kiriş numunelerine ait yük-sehim eğrilerinden, %30 oranında UK içeren kiriş numuneleri dışındaki numunelere ait kiriş rijitliklerinin (özellikle %35 ve %40 UK içeren numuneler) azaldığı tespit edilmiştir. Silis dumanlı KSB kiriş numunelerine ait yük-sehim eğrilerinden ise, %10 oranında SD içeren kiriş numuneleri haricindeki numunelerin kiriş rijitliklerinin (özellikle %15 ve %20 SD içeren numuneler) azaldığı görülmüştür. Kontrol betonuna ait kiriş numunelerinin rijitliklerinin ise genelde bütün KSB numunelerinden daha az olduğu gözlemlenmiştir.

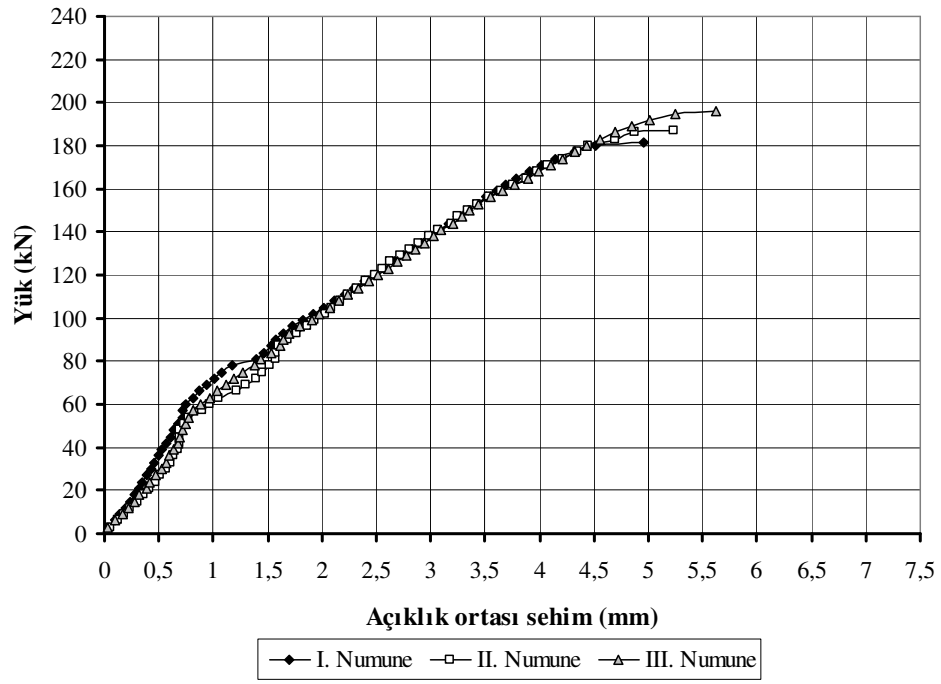


a) Yan görünüş

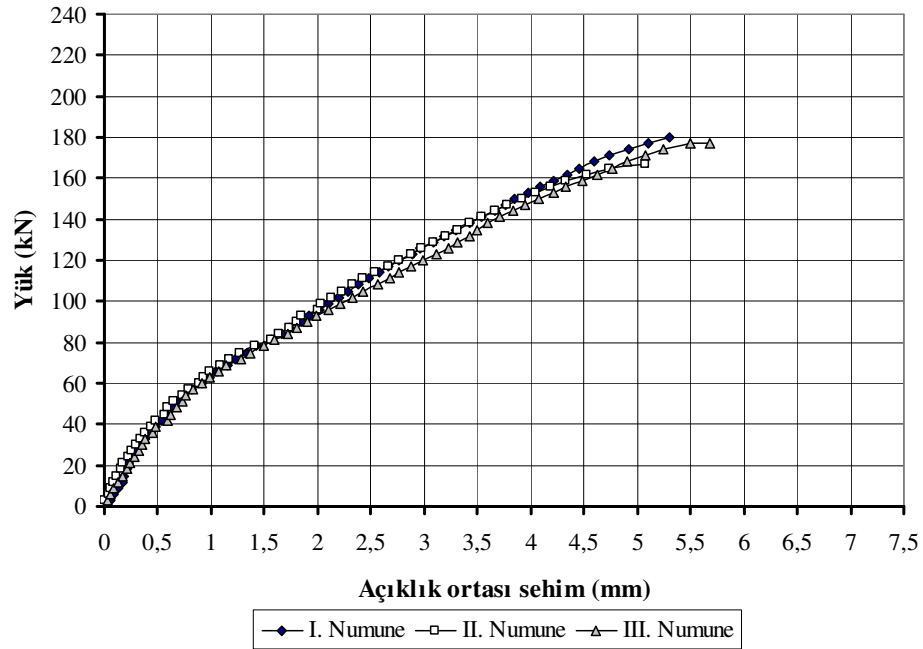


b) Alt (çekme bölgesi) görünüş

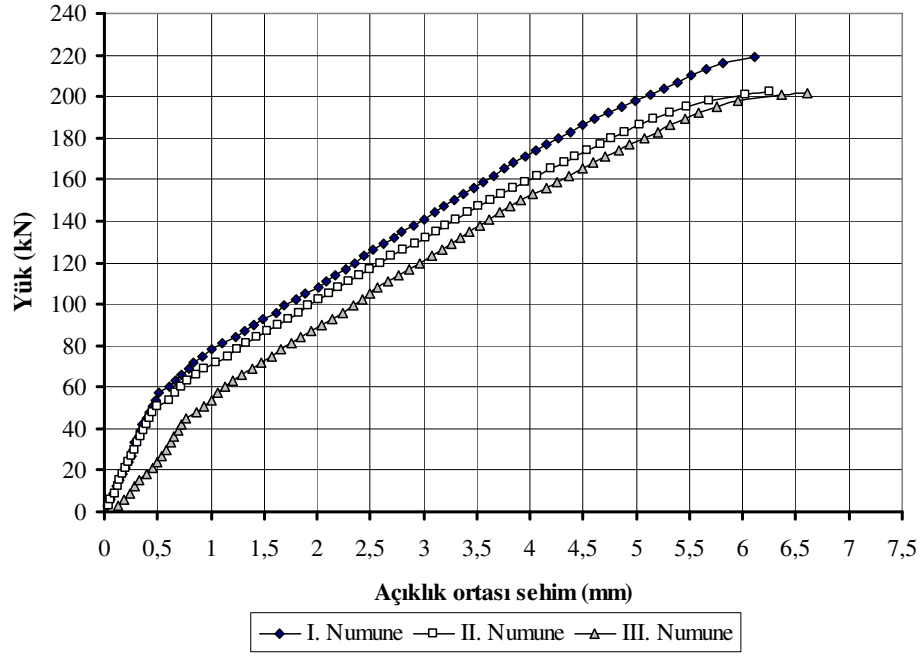
Şekil 5.9 K-KSB-30UK kirişine ait çatlak modelleri



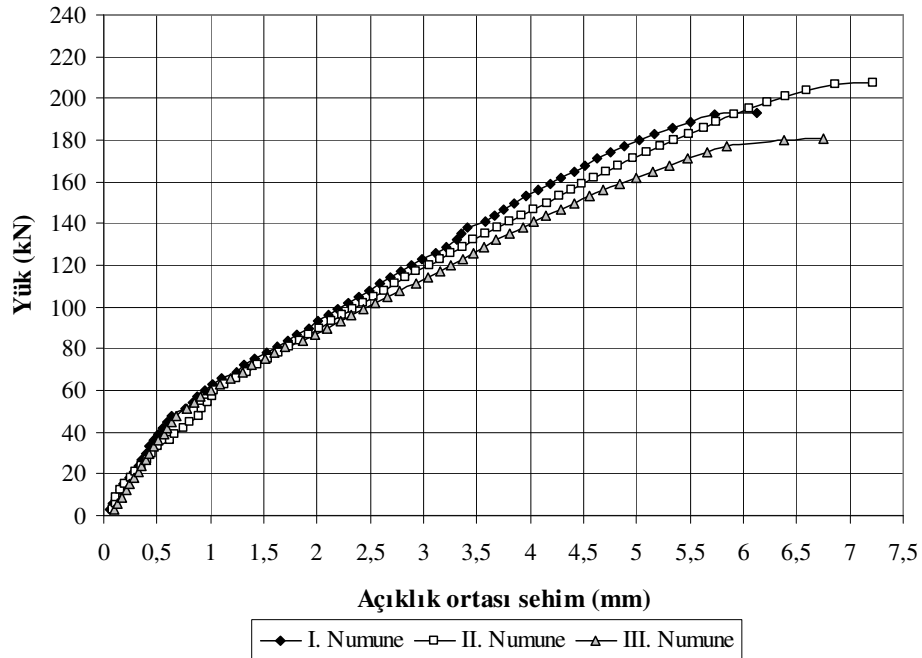
Şekil 5.10 K-Kontrol kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri



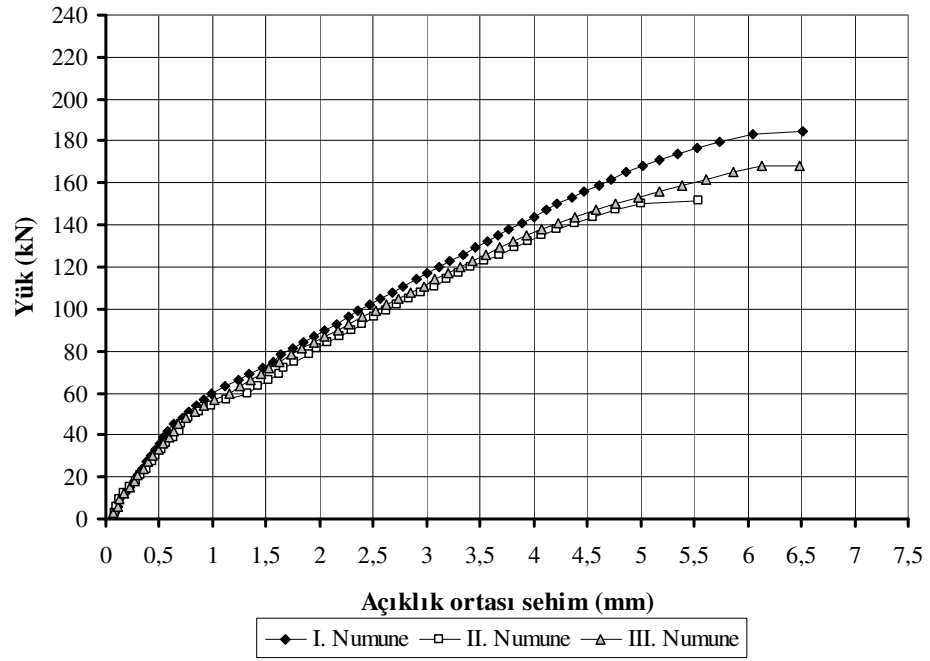
Şekil 5.11 K-KSB-25UK kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri



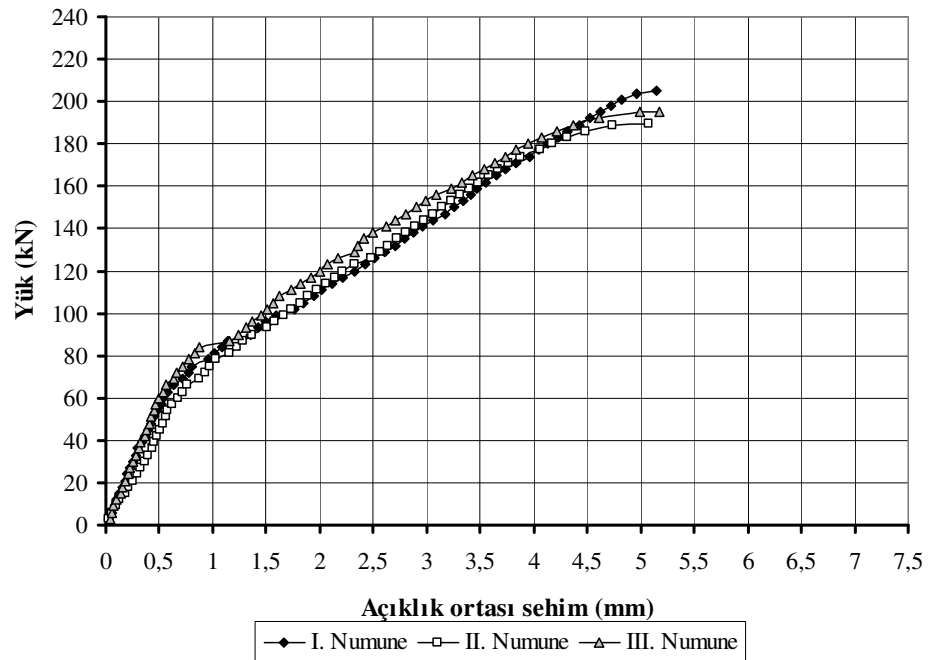
Şekil 5.12 K-KSB-30UK kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri



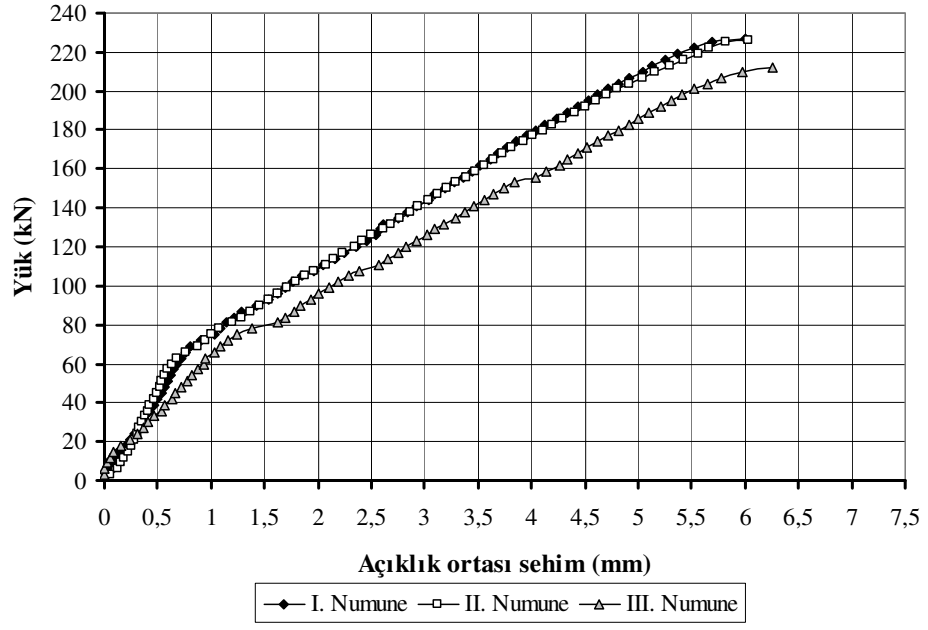
Şekil 5.13 K-KSB-35UK kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri



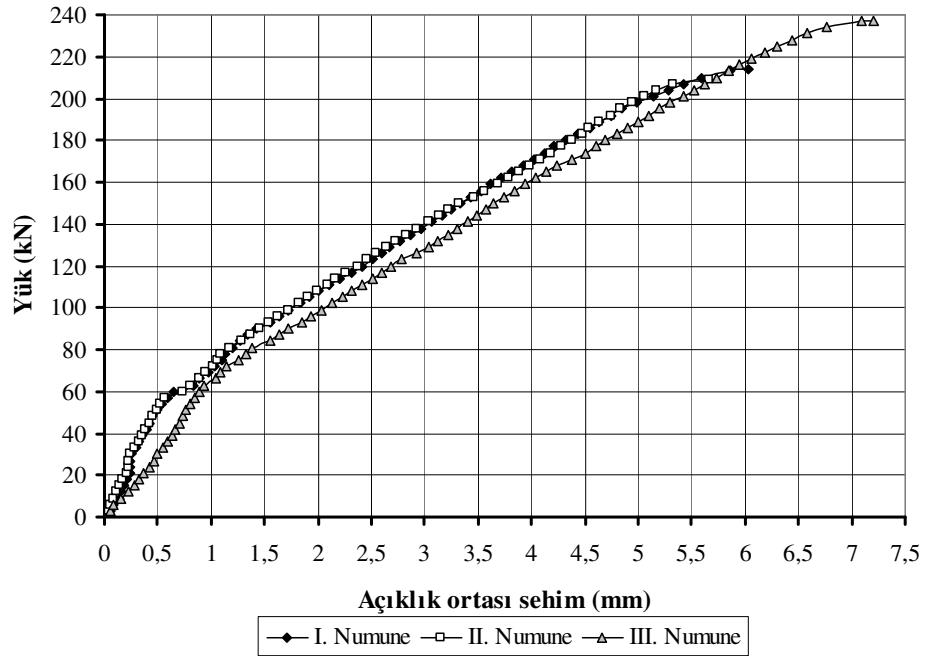
Şekil 5.14 K-KSB-40UK kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri



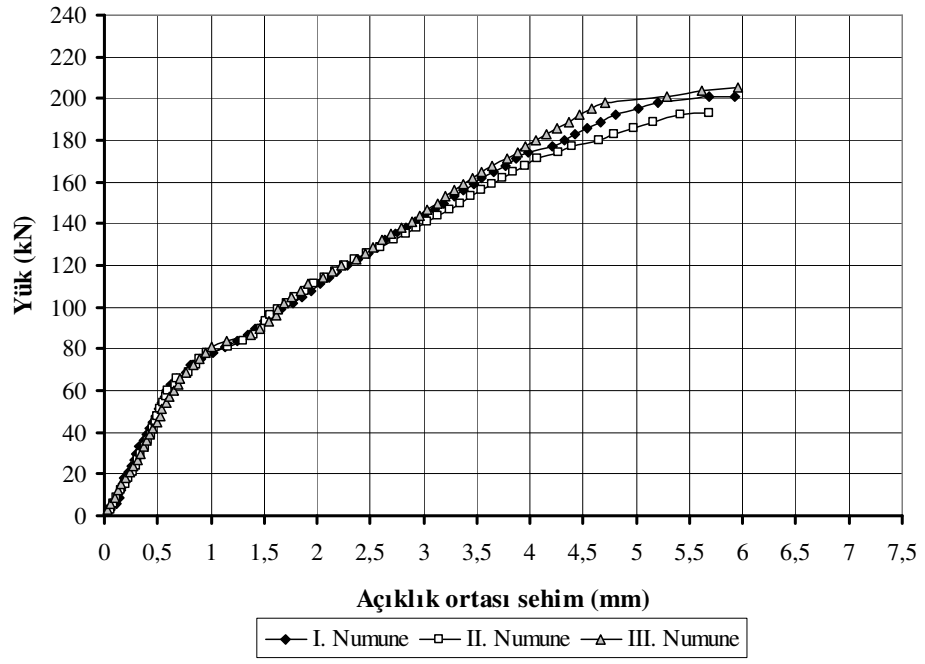
Şekil 5.15 K-KSB-5SD kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri



Şekil 5.16 K-KSB-10SD kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri



Şekil 5.17 K-KSB-15SD kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri



Şekil 5.18 K-KSB-20SD kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, çekme donatısı sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli olarak yerleştirilmiş kayma donatılı 27 adet kiriş numunesi test edilerek, donatı aderans dayanımı incelenmiştir. Dikdörtgen kesitli bu kiriş numuneleri, farklı tür (uçucu kül ve silis dumanı) ve dozajda (%25, 30, 35 ve 40 UK ile %5, 10, 15, ve 20 SD) mineral katkı içeren 8 tip kendiliğinden sıkışan beton ve kontrol betonundan üretilmiştir. Yapılan deneyler ve analizler esas alınarak aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

1. Deney sonucu elde edilen nihai yükün, beton ve donatının karakteristik değerleri esas alınarak klasik hesap (elastik hesap yöntemi) ile bulunan değerlerden daha düşük olduğu görülmüştür. Bu sebeple, numune göçmesinin, beton örtünün yarılması sonucu üst üste bindirilmiş ekleme donatısının aderans göçmesinden dolayı meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu ise, çalışmanın amacına ulaştığını göstermektedir.
2. Genelde KSB numunelerine (hem uçucu küllü hem de silis dumanlı) ait aderans dayanımlarının kontrol betonu numunelerinin aderans dayanımından daha yüksek olduğu görülmektedir.
3. Uçucu küllü KSB kiriş numunelerinde %30 UK oranına sahip numunelerin göçme yükü, tarafsız eksen derinliği, donatıda oluşan gerilme ve dolayısıyla aderans dayanımının en yüksek olduğu görülmüştür. Silis dumanlı KSB karışımlarına ait kiriş numunelerinde ise, %10 SD içeren numunelerin göçme yükü, donatıda oluşan gerilme dolayısıyla aderans dayanımının daha yüksek olduğu ve SD oranı arttıkça tarafsız eksen derinliğinin azaldığı tespit edilmiştir.
4. Yük-sehim eğrilerinden görüldüğü gibi, kontrol betonuna ait kiriş numunelerinin rijitlikleri genelde bütün KSB numunelerinin rijitliklerinden daha az iken, SD içeren KSB karışımlara ait kiriş numunelerinin rijitliğinin UK içeren KSB karışımlarına ait kiriş numunelerine göre daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, uçucu küllü KSB kiriş numunelerine ait yük-sehim eğrilerinden; %30 oranında UK içeren kiriş numuneleri dışındaki numunelere ait kiriş rijitliklerinin (özellikle %35 ve %40 UK içeren numuneler) azaldığı tespit edilmiştir. Silis dumanlı KSB kiriş numunelerine ait yük-sehim eğrilerinden ise, %10 oranında SD içeren kiriş numuneleri haricindeki numunelerin kiriş rijitliklerinin (özellikle %15 ve %20 SD içeren numuneler) azaldığı görülmüştür.
5. Sünekliği fazla olan kiriş numunelerinin (%30 ve 35 UK ile %5, 10 ve 15 SD içeren KSB kiriş numuneleri), donatı aderans dayanımlarının da büyük olduğu deney sonuçlarından görülmektedir (Şekil 5.8). Çünkü, söz konusu kiriş numunelerinde, göçme yükünün artması sonucu nervürlü donatıdaki çok sayıda dişin kenetlenmeye katkıda bulunduğu

anlaşılmaktadır. Böylece çok sayıda çatlakların oluşmasıyla hem süneklik hem de kenetlenmeden dolayı donatı aderansı artmıştır.

Yapılan deneysel çalışma daha önce yapılan literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında, hem kendiliğinden sıkışan beton kullanılması hem de çok sayıda beton karışımı kullanılarak daha sağlıklı bir karşılaştırma yapılabilmesi, çalışmayı farklı kılmaktadır. Ayrıca, deney numunelerinin büyük boyutlu olması ve kırış numunelerinin üretilmesinde kullanılan beton karışımlarının genelde yüksek mukavemetli olması çalışmaya ayrı bir önem kazandırmaktadır. Deney sonuçlarındaki sapmanın az olmasının: nervürlü donatı ile beton arasındaki mekanik aderansın sağlanması amacıyla KSB ve uygun kıvama sahip normal beton kullanılması, su/çimento oranının düşük tutulması, uygun kür şartları ve sistemli bir deney düzeneğinden kaynaklandığı açıktır. Tüm deney numunelerine ait nihai göçme yükünün, klasik hesaplara bulunan değerlerden daha düşük olması, yani, kırılmanın donatı akmadan önce beton örtünün yarılması sonucu ekleme donatısının göçmesiyle meydana gelmesi, deneyin amacına ulaştığını göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Gambarova, G. P. and Giuriani, E., 1985, Discussion of “Fracture mechanics of bond in reinforced concrete” by Ingreffea, A. R., Gerstle, W. H., gergely, P. and Saouma, V., ASCE Journal of Structural Engineering, 1985, s 1161-1163.
- [2] Tepfers, R., 1979, Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars. Magazine of Concrete Research, 1979, No.106, p 3–12.
- [3] Hamad, B. S. and Itani, M. S., 1998, Bond strength of reinforcement in high-performance concrete: The role of silica fume, casting position and superplasticizer dosage, ACI Mater, J.98, p 499-511.
- [4] Azizinamini, A., Stark, M., Roller, J. J. and Ghosh, S. K., 1993, Bond performance of reinforcing bars embedded in high-strength concrete, ACI Structural Journal 93, p 554-561.
- [5] Esfahani, M. R. and Rangan, B. V., 1998, Local bond strength of reinforcing bars in normal strength and high-strength concrete, ACI Journal 98, p. 96-106.
- [6] Turk, K. and Yildirim, M. S., 2003, Bond strength of reinforcement in splices in beams, Structural Engineering and Mechanics, 16(4), p. 469-478.
- [7] Turk, K., Caliskan, S. and Yildirim, M. S., 2005, Influence of loading condition and reinforcement size on the concrete / reinforcement bond strength, Structural Engineering and Mechanics, 19(3), p. 337-346.
- [8] Zhu, W., Sonebi, M. and Bartos, P. J. M., 2004, Bond and interfacial properties of reinforcement in self-compacting concrete, Vol.37, Materials and Structures, p.442-448.
- [9] Ozawa, K., Maekawa, K., Kunishima, M. and Okamura, 1989, H., Development of High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures, The second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2), Proceedings book, Chiang Mai, Thailand, p. 445-450.
- [10] Shindoh, T., Yokota, K. and Yokoi, K., 1996, Effect of mix constituents on rheological properties of super workable concrete, In: Bartos P.J.M., Marrs D.L., Cleland D.J. (Eds.), Proceedings of the International RILEM Conference Production Methods and Workability of Concrete, Paisley, Scotland, June 3–5, 1996, E & FN Spon, London, p. 263–270.

- [11] EFNARC, May 2005, European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification and Production and Use, Association House, UK, (www.efnarc.org).
- [12] Yıldız, S., Balaydın, İ. Ve Ulucan, Z. Ç., 2007, Pirinç kabuğu külünün beton dayanımına etkisinin araştırılması, Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s. 85-91.
- [13] Türk, K., Karataş, M. ve Ulucan, Z. Ç., 2006, Farklı oranlarda F sınıfı uçucu kül içeren kendiliğinden sıkışan betonun dayanım özellikleri, Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s. 513-520.
- [14] Yazicioglu, S., Caliskan, S. and Turk, K., 2006, Effect of curing conditions on the engineering properties of self-compacting concrete, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 13, No. 1, pp. 25–29.
- [15] Türk, K., Karataş, M. ve Ulucan, Z. Ç., 2007, Farklı oranlarda silis dumanı ikameli kendiliğinden sıkışan betonun mühendislik özellikleri, 7. Ulusal Beton Kongresi, İnşaat Mühendisleri Odası (İMO), İstanbul Şubesi, Kasım 2007 (Özeti kabul edildi).
- [16] Yahia, A., Tanimura, M., Shimabukuro, A., Shimoyama, Y., 1999, Effect of rheological parameters on self compactability of concrete containing various mineral admixtures, in: A. Skarendahl, O. Petersson (Eds.), Proceedings of the First RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, September, p. 523- 535.
- [17] Kurita, M., Nomura, T., 1998, Highly-flowable steel fiber-reinforced concrete containing fly ash, in: V.M. Malhotra (Ed.), Am. Concr. Inst. SP 178, p. 159- 175.
- [18] Kim, J.K., Han, S.H., Park, Y.D., Noh, J.H., Park, C.L., Kwon, Y.H. and Lee, S.G., 1996, Experimental research on the material properties of super flowing concrete, in: P.J.M. Bartos, D.L. Marrs, D.J. Cleland (Eds.), Production Methods and Workability of Concrete, E&FN Spon, pp. 271- 284.
- [19] Miura, N., Takeda, N., Chikamatsu, R., Sogo, S., Application of superworkable concrete to reinforced concrete structures with difficult construction conditions, Proc. – ACI SP (140) 163-186

- [20] Karataş, M. ve Ulucan, Z. Ç., 2007, Su/toz oranının kendiliğinden sıkışan betonun reolojik özelliklerine etkisi, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi (DAUM), Fırat üniversitesi, Elazığ.
- [21] Orangun, C. O., Jirsa, J. O. And Bren, J. E., 1977, A revaluation of test data on development length and splices, ACI Journal 77, p 114-122.
- [22] Tepfers, R., 1973, A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars, Publication No.73:2, Division of concrete structures, Chalmers University of Technology, Goteborg, 328 s.
- [23] Okamura, H., Ouchi, M., 1999, Self-compacting concrete. Development, present use and future, Proceedings of the First International RILEM Symposium, Edited by A.Skarendahl and Ö. Petersson, p. 3–14.
- [24] Said, A. and Nehdi, M., 2002, Reinforced Self-Consolidating Concrete Structural Frames, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, p.191-196.
- [25] Ouchi, M., 1999, Self-compacting concrete – Development, applications and investigations, Nordic Concrete Research Committee Publications, 5p.
- [26] Khurana, R., Topçu, O., 2000, Role of Superplasticizers in the development of self compacting concrete, Second International Symposium on Cement and Conc. Tech. in the 2000s, Volume I, Istanbul, Turkey, p. 473–482.
- [27] Collepardi, M., 2001, A Very Close Precursor of Self-Compacting Concrete (SCC), unpublished data, 10p.
- [28] Hollingsworth, D., 2002, Design and Use of Self-Consolidating Concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, p. 429-432.
- [29] Felekoğlu, B., Temmuz 2003, Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 246 s.
- [30] Rols, S., Ambrosie, J., Pera, J., 1999, Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete, Cem. Concr. Res., Vol: 29, p. 261–266.

- [31] Ambrosie, J., Pera, J., 2002, Design of Self-Levelling Concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, p.93-98.
- [32] Khayat, K.H., Bickley, J., Lessard, M., 2000, Performance of Self-Consolidating Concrete for Casting Basement and Foundation Walls, ACI Materials Journal, May-June, p. 374-380.
- [33] Khayat, K.H., Daczko, J.A., 2002, The Holsitic Approach to Self-Consolidating Concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self- Consolidating Concrete, p. 3-8.
- [34] Constantiner, D., Daczko, J.A., 2002, Not All Applications are Created Equal; Selecting the Appropriate SCC Performance Targets, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, p. 179-184.
- [35] Billberg, P., 1999, Self-compacting concrete for civil engineering structures, Swedish Experience, Summary, CBI report/report 2:99, 2p.
- [36] Sağlam, A.R., 2000, Süperakışkanlaştırıcı ve viskozite artırıcı katkıların kendiliğinden yerleşen beton özelliklerine etkisi, Sika Teknik Bülten, 2000/4, s. 9-16.
- [37] Tang, C. -W., Yen, T., Chen, K. -H., 2000, The rheological behavior of medium strength high performance concrete, Second International Symposium on Cement and Conc. Tech. in the 2000s, Volume II, Istanbul, Turkey, p. 50–57.
- [38] Sari, M., Prat, E., Labastire, J.-F., 1999, High strength self-compacting concrete – Original solutions associating organic and inorganic admixtures, Cem. Concr. Res., Vol: 29, p. 813-818.
- [39] Su, N., Hsu, K.-C., Chai, H.-W., 2001, A simple mix design of self-compacting concrete, Cem. Concr. Res., Vol: 31, p. 1799-1807.
- [40] Fang, W., Jianxiong, C., Changhui, Y., 1999, Studies on self-compacting high performance concrete with high volume mineral additives, Proceedings of the First International RILEM Symposium, Edited by A.Skarendahl and Ö. Petersson, p. 569-578.
- [41] Ramsburg, P., Neal, R.E., 2002, The Use of a Natural Pozzolan to Enhance the Properties of Self-Consolidating Concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, p. 451-456.

- [42] Petersson, Ö., 2002, Limestone Powder as Filler in Self-Compacting Concrete – Frost Resistance, Compressive Strength and Chloride Diffusivity, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, p. 391-396.
- [43] Ho, D.W.S., Sheinn, A.M.M., Ng, C.C., Tam, C.T., 2002, The use of quarry dust for SCC applications, *Cem. Concr. Res.*, Vol: 32, p. 505-511.
- [44] Erdoğan, Y. T., Mayıs 2003, Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara, 741 s.
- [45] Yahia, A., Tanimura, M., Shimabukuro, A., Shimoyama, Y., 1999, Effect of rheological parameters on self compactability of concrete containing various mineral admixtures, *Proceedings of the First International RILEM Symposium*, Edited by A.Skarendahl and Ö. Petersson, p. 523-536.
- [46] Bouzoubaa, N., Lachemi, M., 2001, Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash Preliminary results, *Cem. Concr. Res.*, Vol: 31, p. 413-420.
- [47] Jianxiong, C., Xincheng, P., Yubin, H., 1999, A study of self-compacting HPC with superfine sand and pozzolanic additives, *Proceedings of the First International RILEM Symposium*, Edited by A.Skarendahl and Ö. Petersson, p. 549-560.
- [48] Skarp, U., Engstrand, J., Jansson, I., 2002, A Concept for Enhancing Early Strength Development in Self-Consolidating and Normal Concrete by Means of Increased Stability and Homogeneity, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, p. 363–370.
- [49] Malhotra, V. M. and Carrette, G. G., May 1983, Silica Fume Concrete-Properties, Applications, and Limitations, *ConcreteInternational*, ACI, p. 40–46.
- [50] Hollingsworth, D., 2002, Design and Use of Self-Consolidating Concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, p. 429–432.
- [51] Danzinger, M.W., Saitoh, K., Jost, P., 2002, Self-Consolidating Concrete: Key Learning and Their Effects on Current Applications, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, p. 417-422.

- [52] Yoshioka, K., Tazawa, E.-I., Kawai, K., Enohata, T., 2000, Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals, *Cem. Concr. Res.*, Vol: 32, p. 1507–1513.
- [53] Tandırlı, E., Akalın, Ö., Arca, E., 2000, The effect of melamine based superplasticizers on the properties of concrete, *Second International Symposium on Cement and Conc. Tech. in the 2000s*, Volume I, Istanbul, Turkey, p. 453–462.
- [54] Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S., Matsuhisa, M., 2000, Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer, *Cem. Concr. Res.*, Vol: 30, p. 197–207.
- [55] Gürol, G., 1999, Ekonomik beton için beton bileşenleri çimento/su/ince ve kaba agrega/kimyasal ve mineral katkıları, *Dizayn ve Konstrüksiyon Dergisi*, 1999/164 Haziran, s. 66–74.
- [56] Ferraris, C.F., 1995, Testing of selected Self-Leveling Compounds for Floors, Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5633, January, 27 p.
- [57] Arda, T. S. 1968a, Betonarmede Aderans Konusunda Bir Derleme, İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi Yayını, İstanbul.
- [58] Hamad, B. S., Harajili, M. H. and Jumaa, G., 2001, Effect of fiber reinforcement on bond strength of tension lap splices in high-strength concrete. *ACI Structural Journal* 2001, p. 638–647.
- [59] Arda, T. S. 1968b, Enine donatının aderansa etkisi, Doktora tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 97 s.
- [60] Riessauw, F., 1957, Essais comparatifs d'adherence entre acier tor verrous 40 et acier a. 37 lisse. *Symposium on bond crack formation in reinforced concrete-Vol. III, subject I* Tekniska Högskolans Rotaprinttryckeri- RILEM- Stockholm.
- [61] Türk, K. 2002, Bileşik eğilmeye maruz betonarme elemanlarda donatı aderansının beton özelliklerine bağlı olarak incelenmesi, Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 96 s.
- [62] Bayram, M. 1994, Betonarmede Aderans ve Kenetlenme, Bitirme Projesi, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi, İzmir.

- [63] Cairns, J. And Jones, K., 1996, An evaluation of the bond-splitting action of ribbed bars. ACI Materials Journal, p. 10–19.
- [64] Ersoy, U., 1985, Betonarme (Temel ilkeler ve taşıma gücü hesabı), ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü yayını, yayın no:3, Ankara, 634 s.
- [65] TS 500, 2000, Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, T.S.E., Ankara.
- [66] Baradan, S. 1997, Çimento Tipinin Donatı Beton Aderansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, EÜ Fen Bil. Enst. İzmir.
- [67] Ersoy, U. ve Atımtay E., 1975, Betonarme (Temel ilkeler ve hesap yöntemleri), ODTÜ yayını, Yayın No: 1, Ankara, 623 s.
- [68] Kolek, J., 1963, An effect on bond, Structural Concrete, Vol.1, No: 9- Research Commity of Cast Stone and Cast Concrete Products Industry, London.
- [69] Schießl, P., 1975, Nachrechnung von Verankerungen mit Verbundgrund-gesetzen, Report of the Institut für Betonstahl-und Stahlbeton-bau München, Sept. 1975, München.
- [70] Martin, H., 1973, Zusammenhag zwischen Oberflächen beschaffenheit, Verbund und Sprengwirkung von Bewehrungstahlenunten Kurzzeitbelastung, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 228, Berlin.
- [71] Eligehausen, R., Kreller, H. und Langer, P., 1989, Untersuchungen zum Verbundverhalten gerippter Bewenhrugsstabe mit praxisüblischer Betondeckung, Mitteilungen of the Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, No.5.
- [72] Aka, İ., Keskinel, F. ve Arda, T. S., 1985, Betonarmeye giriş, İstanbul teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yayını, Yayın No: 7, İstanbul, 424 s.
- [73] Park, R. and Paulay, T., 1975, Reinforced Concrete Structures, John Wiley and Sons, New York.
- [74] Rehm, G., 1961, Über die grundlagen des verbundes zwischen stahl und beton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Heft 138 – Verlag Wilhem Ernst und Shon, Berlin.

[75] Karakoç, C., 1985, Aderansta mekanik etkileşim olayı, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 83 s.

[76] Eligehausen, R., 1979, Tensile lapped-spliced of ribber bars with straight ends, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 301, Berlin.

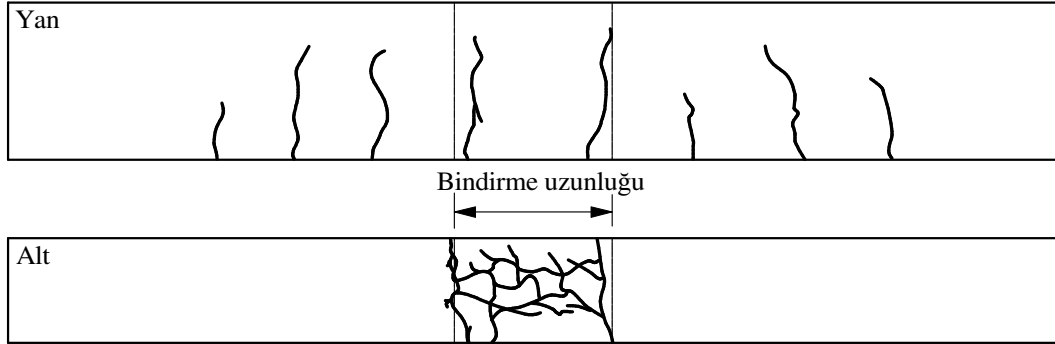
[77] TS 708, 1996, Beton çelik çubukları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[78] Celep, Z. ve Kumbasar, N., 2005, Betonarme Yapılar, Dördüncü Baskı, Beta Dağıtım, İstanbul, 861 s.

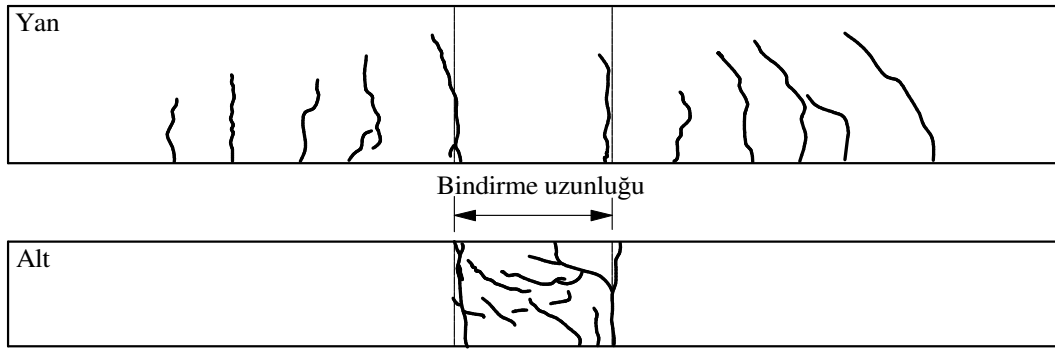
ÖZGEÇMİŞ

1972 yılında Ağın'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Ağın'da tamamladı. 1994 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 1996 yılında Fırat Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsünde “Sürekli Tablalı Kirişsiz Döşemelerin Analizi” isimli yüksek lisans tezini tamamlayarak aynı yıl doktora eğitimine başladı. 1996 yılında halen görevini yürütmekte olduğu Fırat Üniv. Müh. Fak. İnşaat Müh. bölümünde uzman olarak çalışmaya başladı. Evli ve iki çocuk babasıdır.

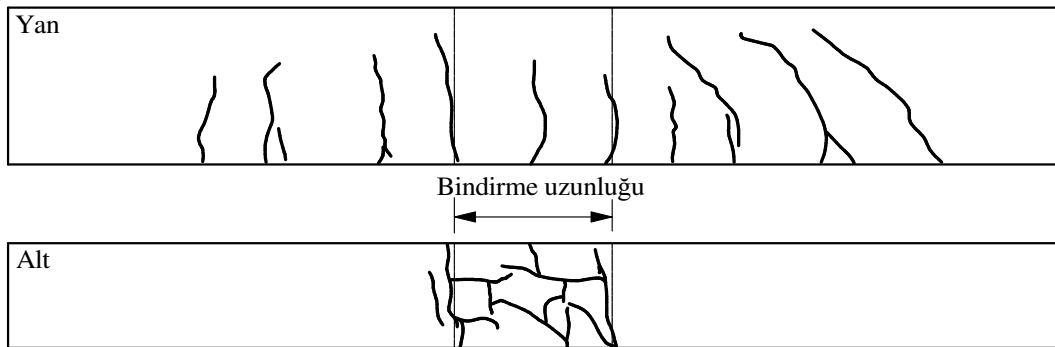
EK-1. DENEY KİRİŞ NUMUNELERİNE AİT ÇATLAK MODELLERİ



a) I. Numune

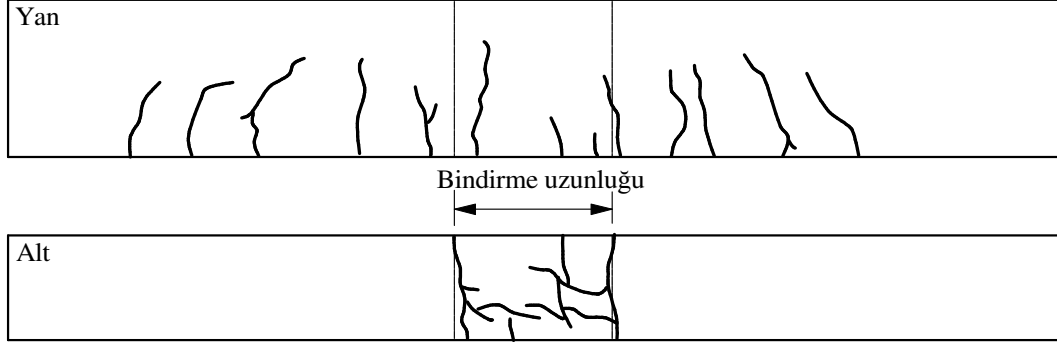


b) II. Numune

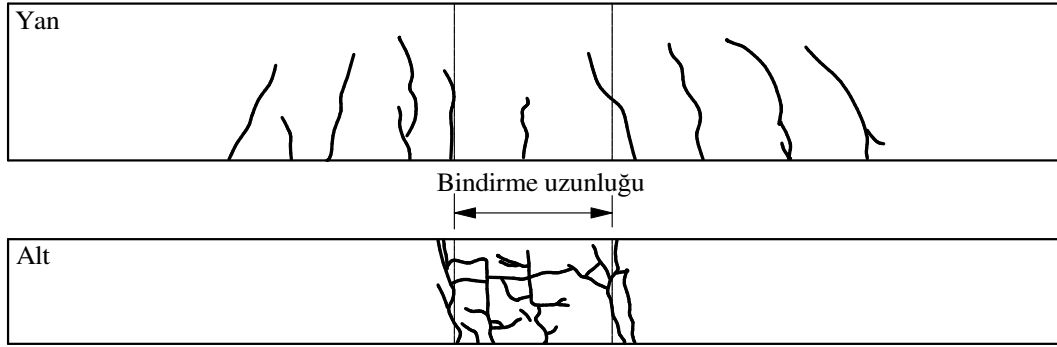


c) III. Numune

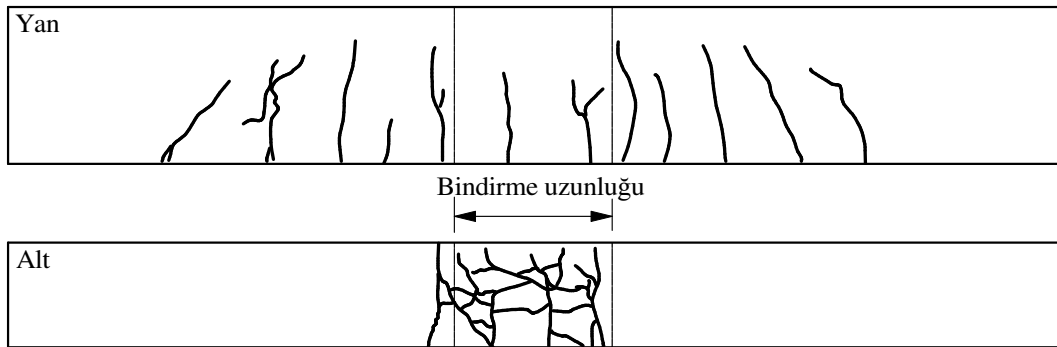
Şekil Ek-1.1 K-KSB-25UK Kirişine ait çatlak modelleri



a) I. Numune

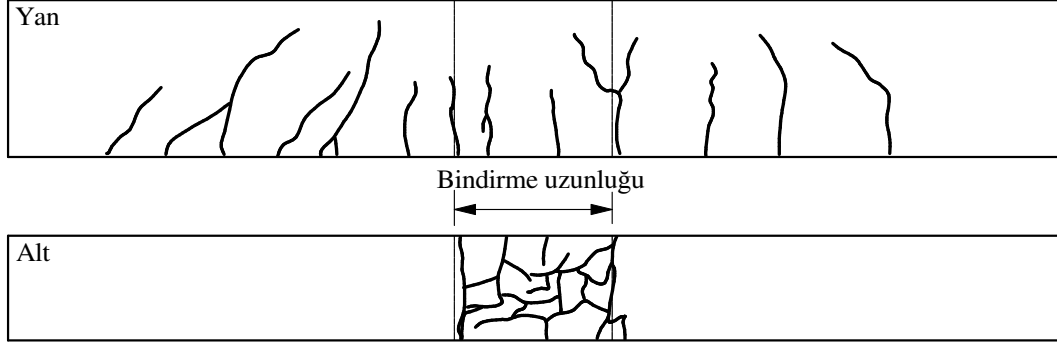


b) II. Numune

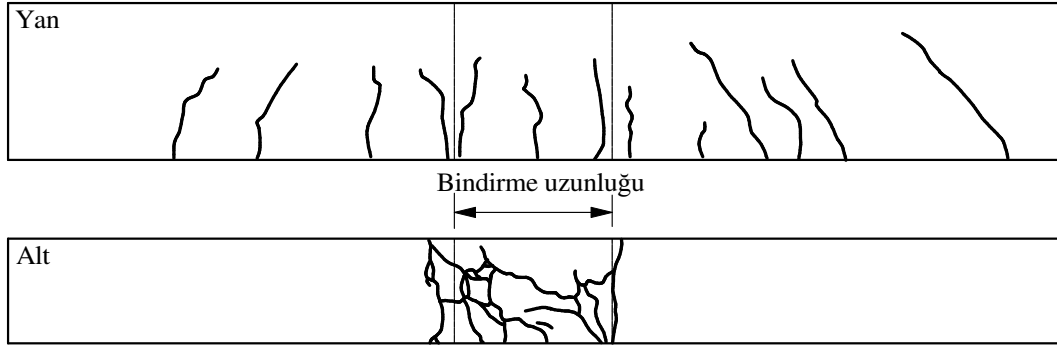


c) III. Numune

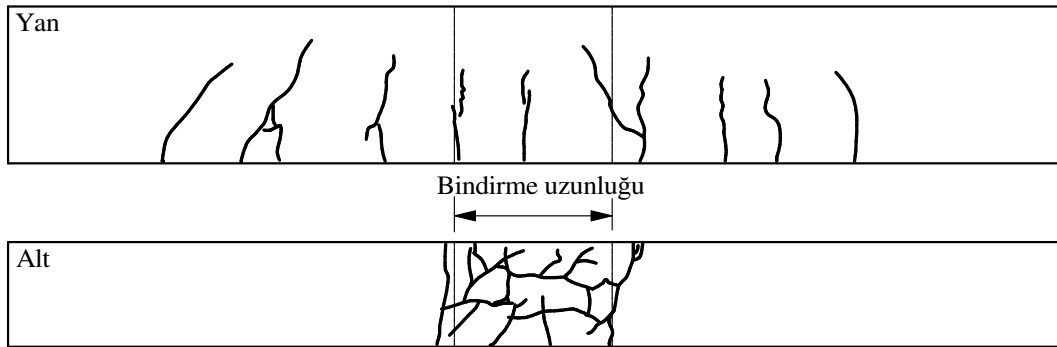
Şekil Ek-1.2 K-KSB-30UK kirişine ait çatlak modelleri



a) I. Numune

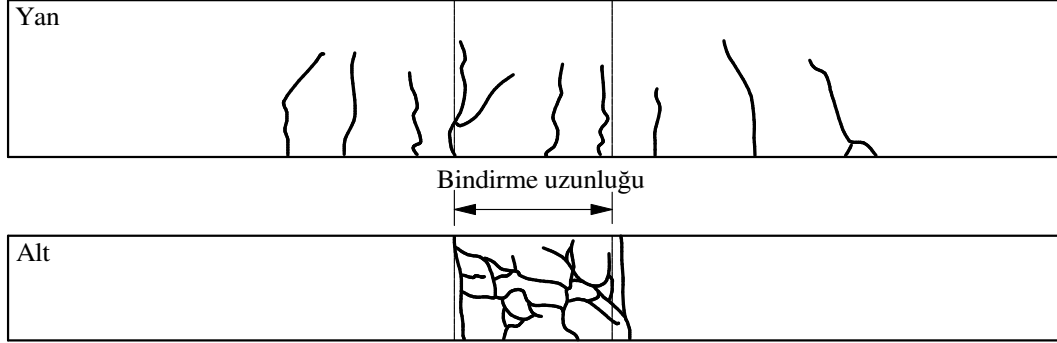


b) II. Numune

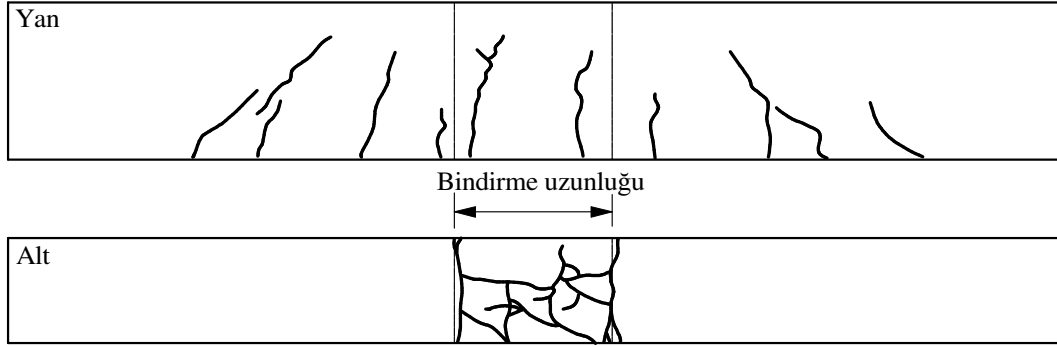


c) III. Numune

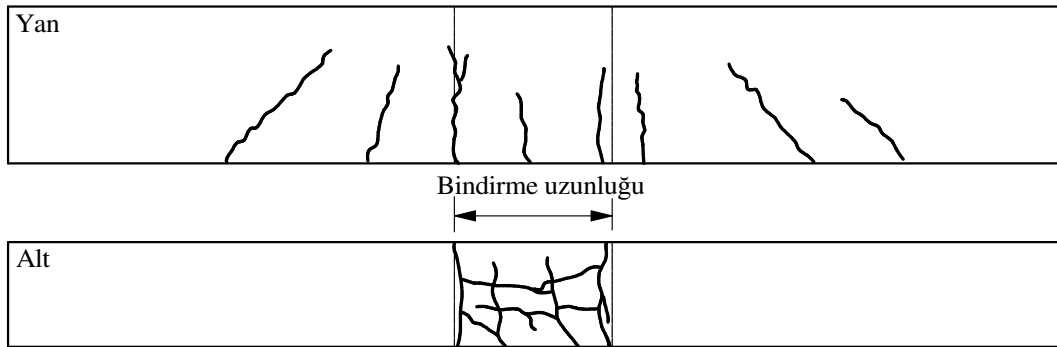
Şekil Ek-1.3 K-KSB-35UK kirişine ait çatlak modelleri



a) I. Numune

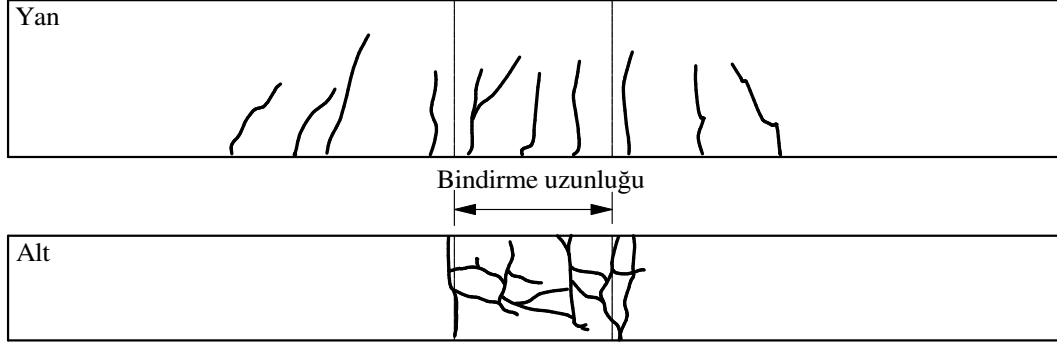


b) II. Numune

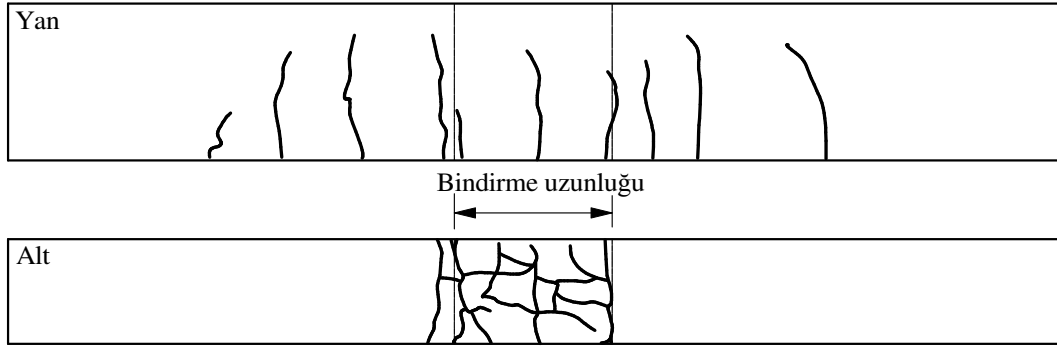


c) III. Numune

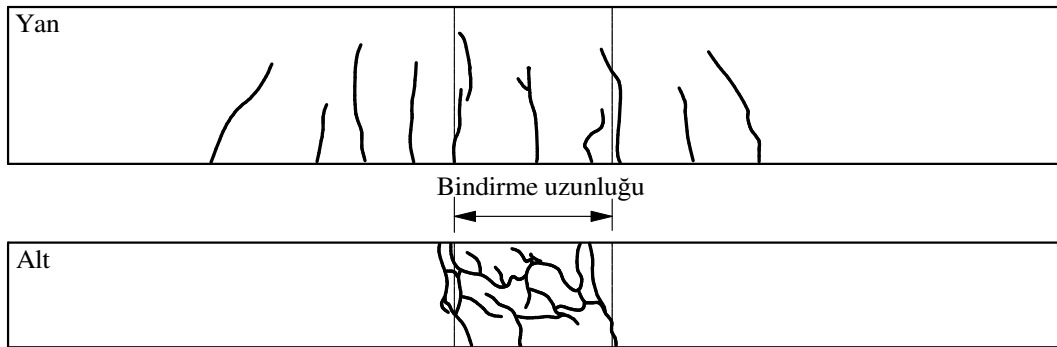
Şekil Ek-1.4 K-KSB-40UK kirişine ait çatlak modelleri



a) I. Numune

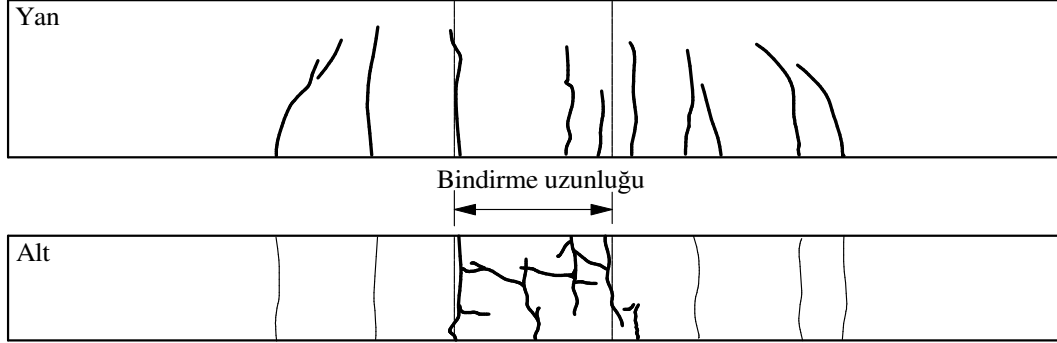


b) II. Numune

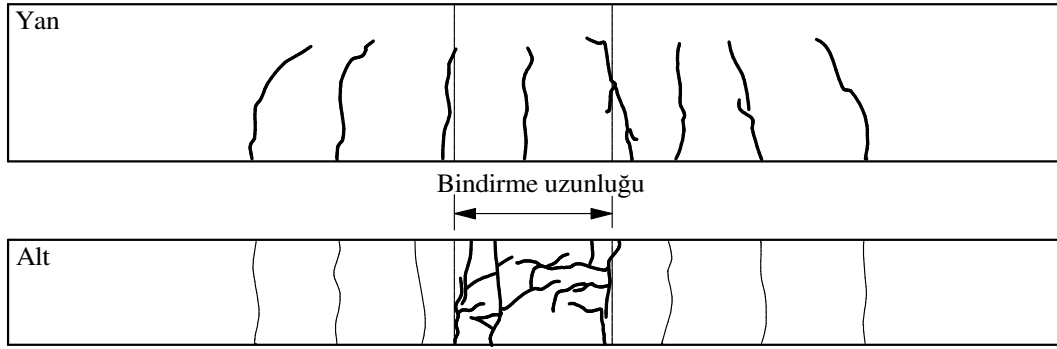


c) III. Numune

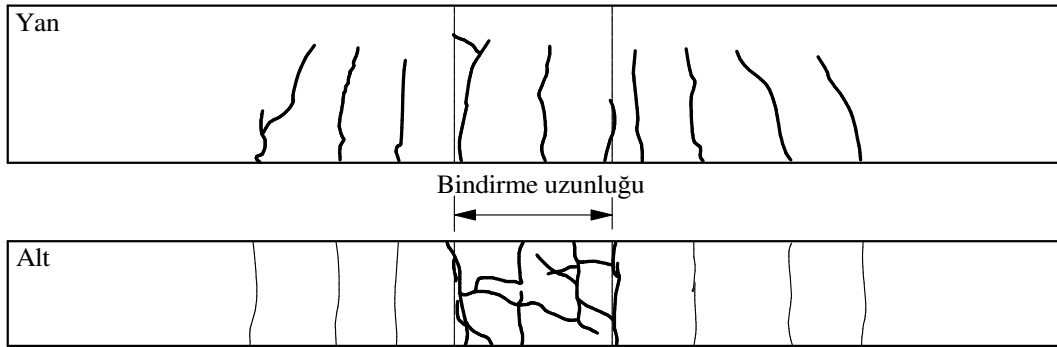
Şekil Ek-1.5 K-KSB-5SD kirişine ait çatlak modelleri



a) I. Numune

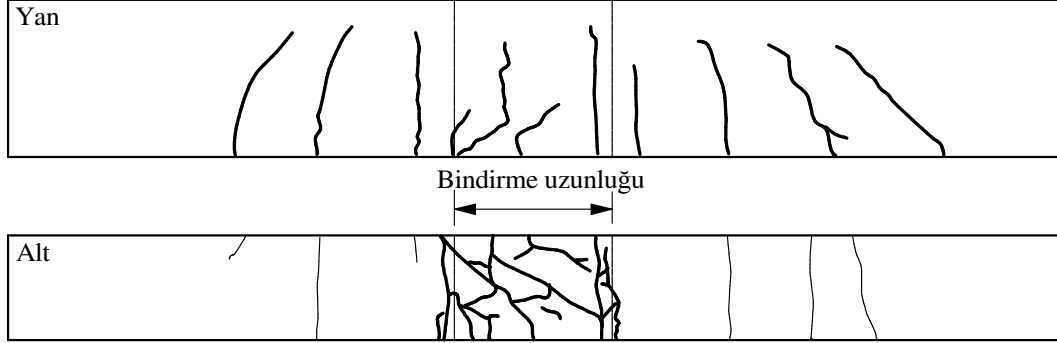


b) II. Numune

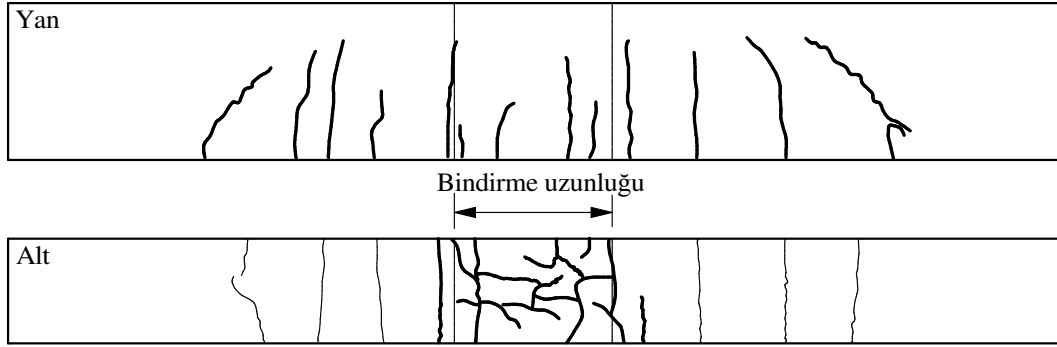


c) III. Numune

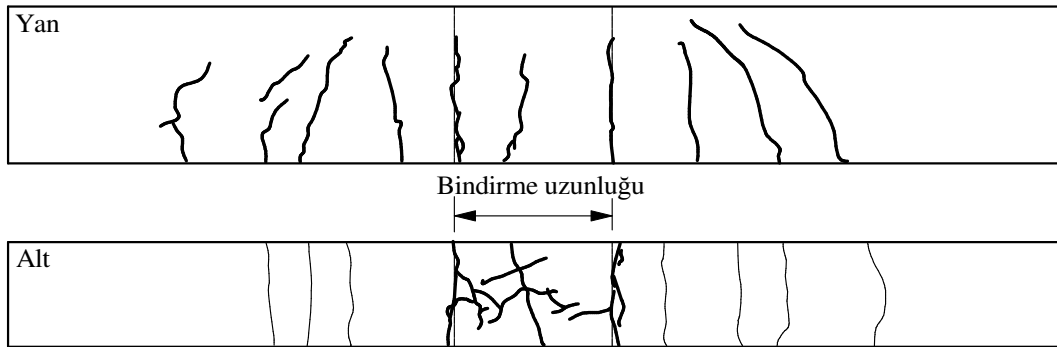
Şekil Ek-1.6 K-KSB-10SD kirişine ait çatlak modelleri



a) I. numune

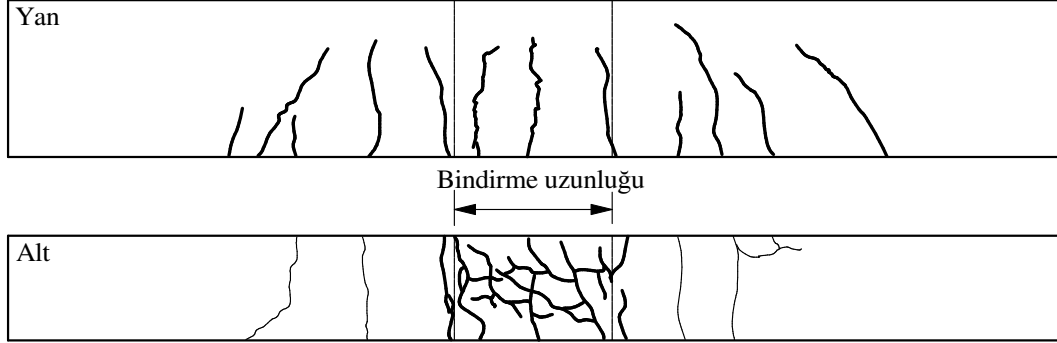


b) II. Numune

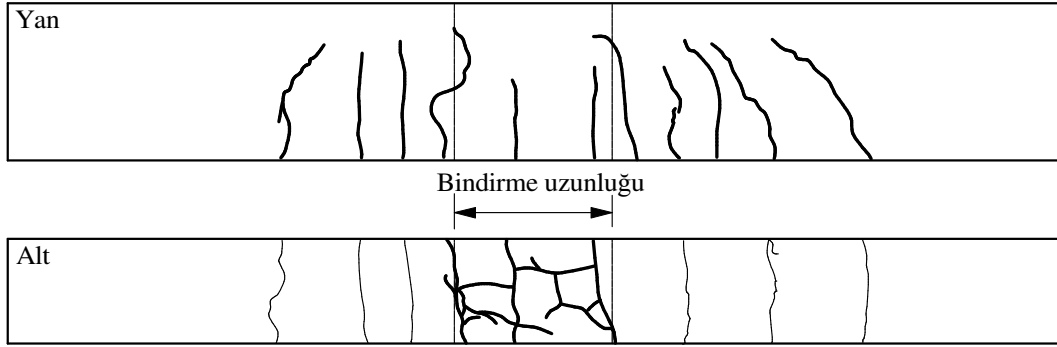


c) III. Numune

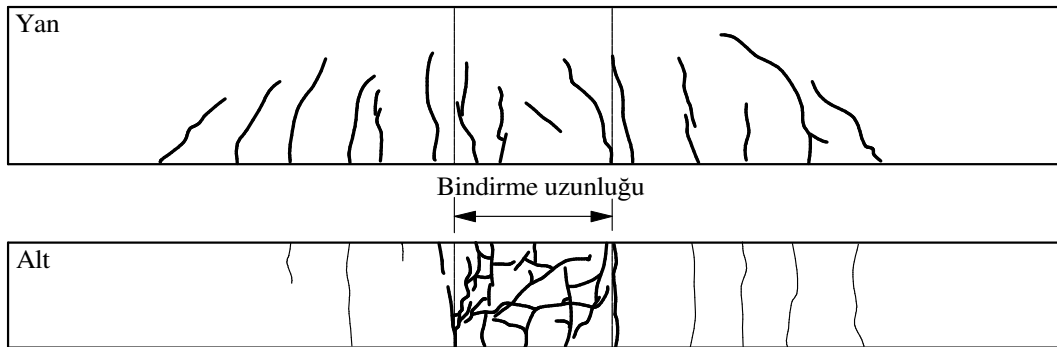
Şekil Ek-1.7 K-KSB-15SD kirişine ait çatlak modelleri



a) I. Numune

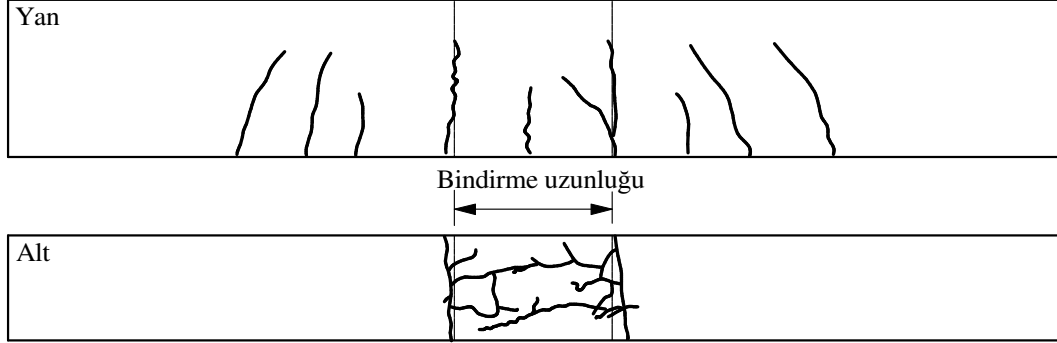


b) II. Numune

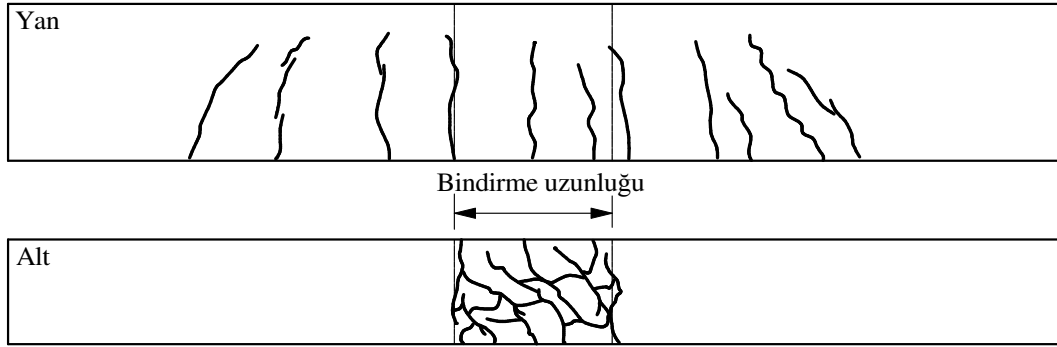


c) III. Numune

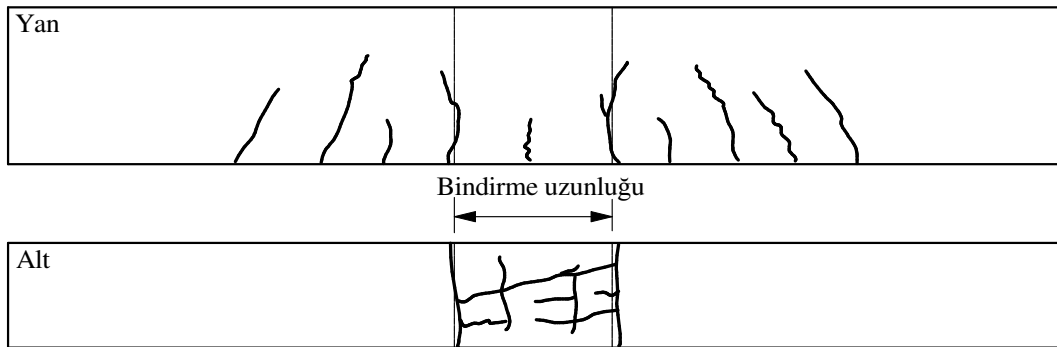
Şekil Ek-1.8 K-KSB-20SD kirişine ait çatlak modelleri



a) I. Numune



b) II. Numune



c) III. Numune

Şekil Ek-1.9 Kontrol betonu kirişine ait çatlak modelleri