

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

116684

BİLEŞİK EĞİLMEYE MARUZ BETONARME ELEMANLARDA  
DONATI ADERANSININ BETON ÖZELLİKLERİNE  
BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ

Kazım TÜRK

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ

2002

116684

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

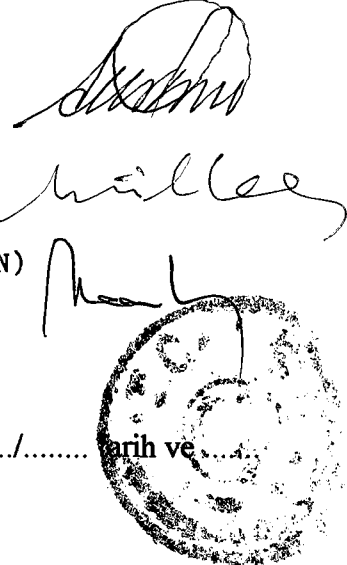
**BİLEŞİK EĞİLMEME MARUZ BETONARME ELEMANLARDA**  
**DONATI ADERANSININ BETON ÖZELLİKLERİNE**  
**BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ**

**Kazım TÜRK**

**DOKTORA TEZİ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu Tez, 20 /03 / 2002 Tarihinde, Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından Oybirliği /  
~~Oyçokluğu~~ İle Başarılı / ~~Beşarısız~~ Olarak Değerlendirilmiştir.

**Jüri Başkanı** : Prof.Dr.Ing.Ahmet DURMUŞ  
(K.T.Ü. Gümüşhane Müh.Fak.Dekanı)  
**Jüri Üyesi** : Prof.Dr.Mehmet ÜLKER  
(F.Ü.Müh.Fak.İnş.Müh.Böl.)  
**Jüri Üyesi** : Yrd.Doç.Dr.M.Şükrü YILDIRIM (DANIŞMAN)  
(F.Ü.Müh.Fak.İnş.Müh.Böl.)



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

## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

#### **BİLEŞİK EĞİLMEYE MARUZ BETONARME ELEMANLARDA DONATI ADERANSININ BETON ÖZELLİKLERİNE BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ**

Kazım TÜRK

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2002, Sayfa: 96

Çalışmanın asıl amacı, donatı aderans dayanımının tanımlanmasında kullanılabilecek bir amprik denklem geliştirmektir.

Bu çalışmada,  $f_c \geq 30$  MPa betondan üretilmiş ve büyük boyutlu 27 adet kiriş numunesi test edilmiştir. Her bir kiriş, açıklık ortasında bindirmeli ekli iki çekme donatısı yerleştirilerek tasarlanmıştır. Ekleme uzunluğu, donatı akma noktasına ulaşmadan önce, ekleme bölgesindeki beton örtünün yarılması ile aderans göçmesi olabilecek şekilde seçilmiştir. Deneyler esnasında, donatı çapı ve yükleme durumu, değişken parametre olarak alınmıştır. Birinci seri deneylerde, 9 adet kiriş numunesi, sabit moment bölgesindeki ekleme uzunluğu kenarlarından pozitif eğilme ile yüklenmiştir. İkinci ve üçüncü seri deneylerde ise, toplam 18 adet kiriş numunesi, pozitif eğilmeye ilaveten, numunenin her iki ucundan merkezi eksenel basınç kuvvete maruz bırakılmıştır.

Sonuç olarak, hem basit hem de bileşik eğilme yüklemesi altında, donatı çapı arttıkça, aderans dayanımının azaldığı fakat eksenel basınç kuvvetin, aynı donatı çaplı numuneler esas alındığında, hem aderans hem de düktiliteyi arttırdığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kirişler, donatı-beton aderansı, nervürlü donatı, bileşik eğilme, ekleme uzunluğu.

**ABSTRACT**

Phd Thesis

**ACCORDING TO CONCRETE FEATURES, THE INVESTIGATION OF BOND  
STRENGTH OF REINFORCEMENT IN REINFORCED CONCRETE  
ELEMENTS SUBJECT TO COMBINED BENDING**

Kazım TÜRK

Fırat University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

2002, Page: 96

The primary aim of this study was to develop an empirical equation, which could be used to define bond strength of reinforcement.

In this study, twenty seven beams, which were produced from  $f_c' \geq 30$  MPa concrete and had large size, 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. In all experiments, the variables used were the reinforcing bar diameter and loading condition. In the first series experiments, nine beam specimens were loaded in positive bending with the splice in a constant moment region. In the second and third series experiments, total eighteen beam specimens were subjected to axial pressure force in addition to positive bending.

As results, bond strength reduced as the bar diameter increased but axial pressure force for the same bar diameter increased both bond strength and ductility.

**Key Words:** Beams, bond of reinforcing bar-concrete, deformed bar, combined bending, splice length.

## TEŞEKKÜR

Bu tezin önerilmesi ve yönlendirilmesinde gerekli yardım ve ilgisini esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. M. Şükrü YILDIRIM'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Çalışmam esnasında ilgi ve desteğini gördüğüm Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden değerli arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Ragıp İNCE'ye teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışma esnasında büyük yardımlarını gördüğüm laboratuvar teknisyeni Sayın Seyfettin ÇİÇEK'e ayrıca teşekkür ederim.

Çalışmaya ait deney düzeneği sistemine eklenen ve deney numunesine eksenel basınç vermek amacıyla hazırlanan projenin yürütülmesini sağlayan üniversitemiz Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR'e ve bu düzeneğin imalatında büyük katkıları bulunan yine üniversitemiz Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Bölümü öğretim üyelerinden Doç. Dr. Halis ÇELİK'e ve Araştırma Görevlisi Soner BUYTOZ'a teşekkürü borç bilirim.

Elazığ Altınova Çimento Fabrikası'nın karşılıksız olarak sağladığı PÇ 42.5 çimentodan dolayı bu kuruluş adına özellikle Kontrol Şefi Kimyager Hasan NAMLI'ya ve aynı şekilde Süperakışkanlaştırıcı Katkı Maddesi sağlayan SİKADETEKS Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye bilim adına yaptıkları bu katkılarından dolayı çok teşekkür ederim.

Ayrıca, tezim hakkındaki değerli tavsiye ve katkılarından dolayı K.T.Ü. Gümüşhane Mühendislik Fakültesi Dekanı Sayın Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ' a ve F.Ü. Mühendislik Fakültesi İnşaat Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Mehmet ÜLKER' e teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                        |      |
|------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET .....                                                             | III  |
| ABSTRACT.....                                                          | IV   |
| TEŞEKKÜR .....                                                         | V    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                      | VI   |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                                 | VIII |
| TABLolar LİSTESİ.....                                                  | XI   |
| SİMGELER LİSTESİ.....                                                  | XII  |
| KISALTMALAR LİSTESİ.....                                               | XV   |
| 1. GİRİŞ .....                                                         | 1    |
| 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI .....                                           | 4    |
| 2.1 Literatürdeki Yapılmış Önemli Diğer Çalışmalar .....               | 4    |
| 3. ADERANS OLAYI VE KENETLENME .....                                   | 18   |
| 3.1 Giriş .....                                                        | 18   |
| 3.2 Aderans Dayanımını Etkileyen Faktörler .....                       | 19   |
| 3.2.1 Donatı ile ilgili etkenler .....                                 | 20   |
| 3.2.2 Betonla ilgili etkenler .....                                    | 21   |
| 3.2.3 Betonarme kesitin geometrik özellikleri ile ilgili etkenler..... | 22   |
| 3.2.4 Kesitin mekanik özellikleriyle ilgili etkenler.....              | 24   |
| 3.2.5 Diğer etkenler .....                                             | 24   |
| 3.3 Aderans Deneyleri .....                                            | 25   |
| 3.3.1 Çekip-çıkarma deneyi .....                                       | 25   |
| 3.3.2 Kiriş deneyleri .....                                            | 26   |
| 3.3.2.1 Bureau of standards deneyi .....                               | 27   |
| 3.3.2.2 Teksas deneyi .....                                            | 27   |
| 3.3.2.3 Standard belçika mafsallı kiriş deneyi .....                   | 28   |
| 3.3.2.4 Kiriş çatlama deneyi .....                                     | 29   |
| 3.4 Çatlama Olayı .....                                                | 30   |
| 3.4.1 Aderansta göçme mekanizmaları (sıyırılma ve yarıma).....         | 31   |

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4.2 Aderans mekanizmaları .....                                                                    | 33 |
| 3.5 Aderans Kırılmasının (yarılma) Mekanığı .....                                                    | 36 |
| 3.6 Kenetlenme .....                                                                                 | 38 |
| 3.6.1 Çubuklarda kenetlenme için CEB-FIP MC 90'nın şartları.....                                     | 40 |
| 3.6.2 Çubuklarda kenetlenme için TS 500'ün şartları .....                                            | 42 |
| 3.6.2.1 Çekme donatısının Kenetlenmesi.....                                                          | 42 |
| 3.6.2.1.1 Düz kenetlenme .....                                                                       | 42 |
| 3.6.2.1.2 Kanca ve fiyongla kenetlenme .....                                                         | 43 |
| 3.6.2.1.3 Kaynaklı enine çubukla kenetlenme .....                                                    | 44 |
| 3.6.2.1.4 Mekanik kenetlenme .....                                                                   | 44 |
| 3.7 Bindirmeli Eklemeler .....                                                                       | 44 |
| 3.7.1 Bindirmeli ekli çubuklar için CEB-FIP MC 90'nın şartları.....                                  | 47 |
| 3.7.2 Bindirmeli ekli çubuklar için TS 500'ün şartları .....                                         | 49 |
| 3.7.2.1 Çekme donatısının eklenmesi .....                                                            | 50 |
| 3.7.2.2 Basınç donatısının eklenmesi .....                                                           | 51 |
| 4. KULLANIM YÜKLERİ ALTINDA ADERANS HESABI .....                                                     | 52 |
| 4.1 Giriş .....                                                                                      | 52 |
| 4.2 Bindirmeli Ekli Kirişlerde Aderans Dayanımının Hesabı.....                                       | 52 |
| 4.3 Elastik Hesap Yöntemi .....                                                                      | 53 |
| 4.4 Eğilme Etkisi Altındaki Tek Donatılı Betonarme Elemanların<br>Çözümlemesi.....                   | 54 |
| 4.5 Bileşik Eğilme Etkisi Altındaki Tek Donatılı Çatlamış Betonarme Elemanların<br>Çözümlemesi ..... | 56 |
| 5. DENEYSEL ÇALIŞMA .....                                                                            | 59 |
| 5.1 Deney Numuneleri .....                                                                           | 59 |
| 5.2 Deney Düzenegi ve Test işlemi .....                                                              | 63 |
| 5.3 Deney Bulguları .....                                                                            | 65 |
| 5.4 Ölçülen Aderans Gerilmesinin ACI 318-83 İle Karşılaştırılması.....                               | 73 |
| 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....                                                                        | 75 |
| KAYNAKLAR .....                                                                                      | 78 |
| EK-1. DENEY KİRİŞ NUMUNELERİNE AİT ÇATLAK MODELLERİ .....                                            | 88 |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 Betona gömülü ve çekmeye maruz nervürlü donatı çubuklarının davranışının idealizasyonu (Azizinamini, Stark, Roller and Ghosh, 1993).....                                                                                                       | 6  |
| Şekil 2.2 Süneklik katsayısının tanımı (Azizinamini, Pavel, Hatfield ve Ghosh, 1999).....                                                                                                                                                                | 7  |
| Şekil 2.3 Nervür önündeki betonun ezilmesi (Lutz ve Gergely, 1967; Akashi ve diğ., 1993).....                                                                                                                                                            | 11 |
| Şekil 2.4 Aderans-kayma eğrisi (Karakoç, 1985).....                                                                                                                                                                                                      | 14 |
| Şekil 3.1 Betona gömülü donatı çubuğu parçasının serbest cisim diyagramı ve aderans dayanımı bileşenleri.....                                                                                                                                            | 19 |
| Şekil 3.2 Beton örtü kalınlığının aderans dayanımına etkisi.....                                                                                                                                                                                         | 23 |
| Şekil 3.3 Çekip-Çıkarma (Pull-out) deneyleri.....                                                                                                                                                                                                        | 26 |
| Şekil 3.4 Bureau of Standards deneyi.....                                                                                                                                                                                                                | 27 |
| Şekil 3.5 Teksas deneyi.....                                                                                                                                                                                                                             | 28 |
| Şekil 3.6 Standart Mafsallı Belçika deneyi.....                                                                                                                                                                                                          | 28 |
| Şekil 3.7 Çekme donatısı sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli olarak yerleştirilmiş kiriş deneyi.....                                                                                                                                                 | 30 |
| Şekil 3.8 Aderans nedeni ile oluşabilecek çatlaklar.....                                                                                                                                                                                                 | 31 |
| Şekil 3.9 Nervürlü çubuğun iki çıkıntısı arasındaki bölgesel davranış a) İki komşu nervür arasında oluşan gerilmeler b) Nervürlerde kesme sıyrılması göçme modu c) Bölgesel ezilme ile betonun yarılması sonucu oluşan göçme (Park ve Paulay, 1975)..... | 32 |
| Şekil 3.10 Kimyasal adezyon çöküşünden sonraki mekanizma a) Yanal aderans çatlakları b) Nervür yakınındaki gerilmeler (Kara koç, 1985).....                                                                                                              | 34 |
| Şekil 3.11 Enine çatlaklar ve yarıma çatlakları (Tepfers, 1979).....                                                                                                                                                                                     | 35 |
| Şekil 3.12 Beton örtü tabakası.....                                                                                                                                                                                                                      | 35 |
| Şekil 3.13 Yarıma kırılmasının modellenmesinde “iç basınçlı boru analojisi” (Ersoy ve Atımtay, 1975).....                                                                                                                                                | 36 |
| Şekil 3.14 Yarıma Çatlakları (Ersoy, 1985).....                                                                                                                                                                                                          | 38 |
| Şekil 3.15 Betona gömülü donatı çubuğunda kenetlenme boyunca etkiyen aderans gerilmeleri.....                                                                                                                                                            | 39 |

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.16</b> Standard kanca ve fiyong (TS 500, 2000).....                                                               | 43 |
| <b>Şekil 3.17</b> Bindirmeli ekli çubuklardaki gerilmelerin birinden diğerine aktarılması<br>(Ersoy, 1985).....              | 45 |
| <b>Şekil 3.18</b> Eklenmiş çubukların yarıılma çatlak modelleri (Eligehausen. 1979).....                                     | 46 |
| <b>Şekil 3.19</b> Eğilmeye maruz bir elemanda çubuk rijitliği sebebiyle beton örtünün göçmesi<br>(Eligehausen. 1979).....    | 47 |
| <b>Şekil 3.20</b> Aynı bölgede şaşırtmalı eklenmiş çubukların yüzdesi<br>(CEB-FIP MC, 1990).....                             | 48 |
| <b>Şekil 3.21</b> Bindirmeli ekleme türleri (Ersoy, 1985).....                                                               | 49 |
| <b>Şekil 4.1</b> Basit eğilmeye maruz tek donatılı tamamen çatlamış kesite ait şekil değiştirme<br>ve gerilme durumları..... | 55 |
| <b>Şekil 4.2</b> Bileşik eğilmeye maruz tek donatılı tamamen çatlamış kesite ait gerilme<br>durumları.....                   | 57 |
| <b>Şekil 5.1</b> Deney numunelerinin geometrik özellikleri.....                                                              | 59 |
| <b>Şekil 5.2</b> Donatının detayı.....                                                                                       | 60 |
| <b>Şekil 5.3</b> Deney düzeneği.....                                                                                         | 64 |
| <b>Şekil 5.4</b> K12. M+(N=7.5) kirişine ait çatlak modelleri : a)yan görünüş ve b)alt (çekme<br>bölgesi) görünüş.....       | 66 |
| <b>Şekil 5.5</b> Lineer regresyon analizi ile deney sonuçlarından elde edilen amprik denkleme<br>ait grafik.....             | 68 |
| <b>Şekil 5.6</b> K12. M+(N=0) kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri .....                                              | 68 |
| <b>Şekil 5.7</b> K16. M+(N=0) kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri.....                                               | 69 |
| <b>Şekil 5.8</b> K22. M+(N=0) kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri .....                                              | 69 |
| <b>Şekil 5.9</b> K12. M+(N=7.5) kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri.....                                             | 70 |
| <b>Şekil 5.10</b> K16. M+(N=8.5) kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri .....                                           | 70 |
| <b>Şekil 5.11</b> K22. M+(N=10) kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri .....                                            | 71 |
| <b>Şekil 5.12</b> K12. M+(N=15) kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri.....                                             | 71 |
| <b>Şekil 5.13</b> K16. M+(N=17) kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri.....                                             | 72 |
| <b>Şekil 5.14</b> K22. M+(N=20) kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri .....                                            | 72 |
| <b>Şekil Ek-1.1</b> K12. M+(N=0) kirişine ait çatlak modelleri.....                                                          | 88 |
| <b>Şekil Ek-1.2</b> K16. M+(N=0) kirişine ait çatlak modelleri.....                                                          | 89 |
| <b>Şekil Ek-1.3</b> K22. M+(N=0) kirişine ait çatlak modelleri.....                                                          | 90 |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil Ek-1.4</b> K12. $M+(N=7.5)$ kirişine ait çatlak modelleri..... | 91 |
| <b>Şekil Ek-1.5</b> K16. $M+(N=8.5)$ kirişine ait çatlak modelleri..... | 92 |
| <b>Şekil Ek-1.6</b> K22. $M+(N=10)$ kirişine ait çatlak modelleri.....  | 93 |
| <b>Şekil Ek-1.7</b> K12. $M+(N=15)$ kirişine ait çatlak modelleri.....  | 94 |
| <b>Şekil Ek-1.8</b> K16. $M+(N=17)$ kirişine ait çatlak modelleri.....  | 95 |
| <b>Şekil Ek-1.9</b> K22. $M+(N=20)$ kirişine ait çatlak modelleri.....  | 96 |



## TABLOLAR LİSTESİ

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 3.1</b> Bir kesitteki bindirme bölgesi içinde bulunan donatı yüzdesine (%)<br>bağlı ( $\alpha_6$ ) katsayıları..... | 48 |
| <b>Tablo 5.1</b> Donatı çubuklarına ait mekaniksel özellikler.....                                                           | 60 |
| <b>Tablo 5.2</b> Beton üretiminde kullanılan çimentonun özellikleri.....                                                     | 61 |
| <b>Tablo 5.3</b> Beton üretiminde kullanılan agregaya ait özellikler.....                                                    | 61 |
| <b>Tablo 5.4</b> Beton karışım oranları.....                                                                                 | 62 |
| <b>Tablo 5.5</b> Deney numunelerine ait özellikler.....                                                                      | 63 |
| <b>Tablo 5.6</b> Deney sonuçlarının özeti.....                                                                               | 66 |
| <b>Tablo 5.7</b> Ölçülen aderans gerilmesinin ACI 318-83 ile karşılaştırılması.....                                          | 73 |



## SİMGELER LİSTESİ

|              |                                                                                   |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| $a$          | : Kesme açıklığı (mm)                                                             |
| $A_s$        | : Donatı kesit alanı ( $\text{mm}^2$ )                                            |
| $A_{s,d}$    | : Gerekli donatı alanı ( $\text{mm}^2$ )                                          |
| $A_{s,m}$    | : Mevcut donatı alanı ( $\text{mm}^2$ )                                           |
| $A_{st}$     | : Çekme donatısı alanı ( $\text{mm}^2$ )                                          |
| $A_{st,min}$ | : Minimum çekme donatısı alanı ( $\text{mm}^2$ )                                  |
| $b$          | : Kiriş numunesi genişliği (mm)                                                   |
| $c$          | : Beton örtü kalınlığı (mm)                                                       |
| $c_{max}$    | : $c_x$ , $c_y$ ve $(c_s + \phi)/2$ 'nin en büyüğü (mm)                           |
| $c_{med}$    | : $c_x$ , $c_y$ ve $(c_s + \phi)/2$ 'nin ortası ( $c_{min} < c_{med} < c_{max}$ ) |
| $c_{min}$    | : $c_x$ , $c_y$ ve $(c_s + \phi)/2$ 'nin en küçüğü (mm)                           |
| $c_s$        | : Donatılar arası mesafe (mm)                                                     |
| $c_x$        | : Yan beton örtü kalınlığı (mm)                                                   |
| $c_y$        | : Alt beton örtü kalınlığı (mm)                                                   |
| $d$          | : Kiriş numunesi faydalı yüksekliği (mm)                                          |
| $d_m$        | : Merdane çapı (mm)                                                               |
| $d'$         | : Paspayı (mm)                                                                    |
| $d_{max}$    | : Maksimum agrega çapı (mm)                                                       |
| $e$          | : Normal kuvvet eksantriklik mesafesi (mm)                                        |
| $E_c, E_s$   | : Beton, donatı elastisite modülü (MPa)                                           |
| $f'_c$       | : 28 günlük beton basınç dayanımı (MPa)                                           |
| $f_{ct}$     | : Beton çekme dayanımı (MPa)                                                      |
| $f_{ctd}$    | : Betonun hesap çekme dayanımı (MPa)                                              |
| $f_{su}$     | : Donatının nihai çekme dayanımı (MPa)                                            |
| $f_y$        | : Donatının gerçek akma dayanımı (MPa)                                            |
| $f_{yd}$     | : Donatı hesap akma dayanımı (MPa)                                                |
| $h$          | : Kiriş numunesi yüksekliği (mm)                                                  |
| $k_1, k_2$   | : Sürtünme katsayıları                                                            |
| $l$          | : Nervürler arası uzaklık (mm)                                                    |

|                             |                                                                                                                          |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $M_{\max}$                  | : Maksimum eğilme momenti (Nmm)                                                                                          |
| $n$                         | : Çelik ve betonun elastiklik modülleri arasındaki oran ( $n=E_s/E_c$ )                                                  |
| $N$                         | : Normal (eksenel) kuvvet (N)                                                                                            |
| $P_{\max}$                  | : Nihai göçme yükü (N)                                                                                                   |
| $R$                         | : Radyal çekme kuvveti (N)                                                                                               |
| $T$                         | : Çekme kuvveti (N)                                                                                                      |
| $u_{318-83}$                | : ACI 318-83 Yapı Şartnamesinin önerdiği aderans dayanımı (MPa)                                                          |
| $u_{318-95}$                | : ACI 318-95 Yapı Şartnamesinin önerdiği aderans dayanımı (MPa)                                                          |
| $u_{ACI}$                   | : ACI Yapı Şartnamesinin önerdiği aderans dayanımı (MPa)                                                                 |
| $u_c$                       | : Beton örtü çatladığı zaman oluşan aderans gerilmesi (MPa)                                                              |
| $u_d$                       | : Hesap aderans dayanımı (MPa)                                                                                           |
| $u_{\text{test}}$           | : Deneysel aderans dayanımı (MPa)                                                                                        |
| $v$                         | : Kiriş numunesi ile çekme donatısı ağırlık merkezi arasındaki mesafe (mm)                                               |
| $v_a$                       | : Beton ve donatı arasındaki aderans kuvveti (N)                                                                         |
| $v_c$                       | : Beton kesme kuvveti (N)                                                                                                |
| $x$                         | : Tarafsız eksen derinliği (mm)                                                                                          |
| $z$                         | : Moment kolu (mm)                                                                                                       |
| $\ell_s$                    | : Donatı ekleme boyu (mm)                                                                                                |
| $\Delta\ell_b$              | : Kanca veya fiyong katkısı (mm)                                                                                         |
| $\ell_b$                    | : Kenetlenme boyu (mm)                                                                                                   |
| $\ell_{bk}$                 | : Kancalı kenetlenme boyu (mm)                                                                                           |
| $\eta_1, \eta_2, \eta_3$    | : Sırasıyla, donatı yüzey şekline, betonlama esnasındaki donatı pozisyonuna ve donatı çapına bağlı katsayılar            |
| $\phi$                      | : Donatı çapı (mm)                                                                                                       |
| $\delta$                    | : Açıklık ortası sehim (mm)                                                                                              |
| $\alpha$                    | : Donatı nervürünün çubuk eksenine yaptığı açı                                                                           |
| $\alpha_1, \dots, \alpha_5$ | : Sırasıyla, kenetlenme tipi, beton örtü kalınlığı, sargı durumu ve çekme ve basınç çubuğu faktörlerine bağlı katsayılar |
| $\alpha_6$                  | : Ekleme bölgesi içerisinde kalan çubuk yüzdesine bağlı katsayı                                                          |
| $\varepsilon_{ck}$          | : Beton kopma uzaması                                                                                                    |
| $\sigma_c$                  | : Beton basınç gerilmesi (MPa)                                                                                           |

#### XIV

- $\epsilon_c$  : Betonun birim kısalması  
 $\sigma_n$  : Nervür yüzeyine etkiyen basınç gerilmesi (MPa)  
 $\epsilon_s$  : Çeliğin birim uzaması  
 $\sigma_s$  : Çelik çekme gerilmesi (MPa)  
 $\sigma_t$  : Yarıлма gerilmesi (MPa)  
 $\partial u / \partial s$  : Aderans rijitliği  
 $\rho$  : Donatı yüzdesi (  $\rho = A_s / bd$  )



## KISALTMALAR LİSTESİ

|       |                                                                                                              |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ACI   | : American Concrete Institute                                                                                |
| AS    | : Australian Standard                                                                                        |
| CEB   | : Committee Europa Beton                                                                                     |
| MC 90 | : Model Code 1990                                                                                            |
| RILEM | : Reunion Internationale des Laoratoires d'Essais et de Resherches sur les<br>Materiaux el les Constructions |
| T.E.  | : Tarafsız eksen                                                                                             |
| TSE   | : Türk Standartları Enstitüsü                                                                                |
| YPB   | : Yüksek performanslı beton                                                                                  |



## 1.GİRİŞ

Betonarme teorisi, donatı çubukları ve çevresini saran beton arasındaki gerilme aktarımına dayanır. Bu yük veya gerilme aktarımı, beton ve betona gömülü donatı çubuğunun yüzeyi arasındaki relatif harekete veya kaymaya karşı direnç ile mümkün olur. Kaymaya karşı direnç ise, aderans veya aderans gerilmesi olarak bilinir. Betonarme yapıların analiz ve tasarımında donatı kenetlenmesinin ve bindirmeli ekli donatıların önemi sebebiyle, beton ve donatı arasındaki aderans, esas teşkil etmektedir.

Betona gömülü donatı çubuklarının aderans özellikleri, hem statik hem de dinamik yüklere maruz betonarme yapı elemanlarının davranışında önemli rol oynar. Bu donatı çubuklarında oluşan aderans gerilmesi kimyasal adezyon, sürtünme direnci ve mekanik kenetlenme ile kontrol edilir. Kimyasal adezyon göçtükten sonra, davranış donatı tipine göre önemli derecede değişir. Düz demirlerde, kaçınılmaz olarak donatı ve beton arayüzeyinde oluşan kesme etkisi sonucu, yapısal açıdan tehlike arzeden 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 (Gambarova ve Giuriani, 1985). Göçme öncesi, nervürün kamalama etkisinden dolayı, yarılma çatlakları meydana gelir (Tepfers, 1979).

Larrard ve diğ., (1993) aderans dayanımı üzerinde donatı çapının etkisini incelemek için, basınç bölgesinde çelik mafsal ve tarafsız eksenin çekme bölgesine yerleştirilmiş donatı ile açıklık ortasında bağlanmış iki dikdörtgen bloktan oluşan kirişler üzerinde aderans deneyleri gerçekleştirmiştir. Deney sonuçlarından, yüksek mukavemetli betondan üretilen numunelere ait aderans dayanımının yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Normal mukavemetli betondan üretilmiş numunelere ait aderans dayanımları ile karşılaştırdıklarında, yüksek mukavemetli betondan üretilen numunelere ait aderans dayanımının 10 mm çaplı nervürlü çubuklar için, % 80 arttığını ve 25 mm çaplı nervürlü çubuklar için ise, % 30 azaldığını tespit etmişlerdir.

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 mukavemeti hakkında çok sayıda deney sonuçları ve teorik bağıntılar yer almaktadır (Orangun ve diğ., 1977). Yapılan deneylerde, bindirmeli ekli kirişlerin davranışının, donatı çubukları boyunca oluşan yarıлма ve donatı ekleme uçlarında gelişen eğilme çatlaklarından önemli bir şekilde etkilendiğini görmüşlerdir (Tepfers, 1973). Bu sebeple, betonarme yapı elemanlarını aderans açısından en iyi karakterize edecek numune şeklinin, basit veya bileşik eğilme etkisine maruz büyük boyutlu ve bindirmeli ekli çekme donatısına sahip kirişler olduğu açıktır.

Esfahani ve Rangan, (1996), çalışmalarında nervürlerin önündeki betonun ezilme yayılmasının, beton mukavemetine bağlı olarak değiştiğini ve yüksek mukavemetli beton durumunda, nervür önündeki betonun daha az ezildiğini tespit etmişlerdir.

Azizinamini ve diğ., (1993), yüksek mukavemetli betondan üretilmiş bindirmeli ekli çekme donatısına sahip kirişlerin davranışını incelemek amacıyla deneyler yapmışlar. Sonuçta, donatı ankraj uzunluğu boyunca üniform olmayan aderans gerilme dağılımını esas alan bir kırılma hipotezi sunmuşlardır.

Bütün bunlara ilave olarak, 1980'nin ortalarından beri, yüksek mukavemetli beton, örneğin, köprüler, çok yüksek binalar, off-shore yapılar, yol kaplamalar gibi çeşitli uygulamalar için popülerite kazandı. Fakat bu noktada temel sorun, yüksek mukavemetli beton için, uygun emniyet ve hizmet edebilirliğin sağlanıp sağlanamadığının anlaşılmasıdır. Yani, tamamen uygun yapısal davranışı temin etmek için, yüksek mukavemetli betonun etkileri hakkında data eksikliğinin giderilmesi zorunlu hale gelmiştir.

Yapılan tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde, tez konusu ile ilgili yapılmış diğer önemli çalışmalar özet olarak sunulmuştur. Üçüncü bölümde, aderans ve kenetlenme hakkında temel bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde, hem basit eğilmeye hem de bileşik eğilmeye maruz kirişlerdeki bindirmeli ekli çekme donatılarda oluşan gerilmelerin hesabı için, elastik hesap yönteminin takdimi yapılmıştır. Beşinci bölümde ise, sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli çekme donatısı yerleştirilerek eğilme ve bileşik eğilme yüklemesine maruz etriyesiz büyük boyutlu betonarme kirişlere ait deneysel çalışmaya yer verilmiş ve deney sonuçlarından elde edilen amprik denklem, ACI 318-83 Yapı Şartnamesine ait aderans dayanımı

bağıntısı ile karşılaştırılmıştır. Altıncı bölümde ise, tez çalışmasının genel bir değerlendirilmesi yapılmıştır.

Aderans ile ilgili yapılan çalışmalarda, bileşik eğilme yüklemesiyle karşılaşılması sunulan tez çalışmasını farklı kılmaktadır. Deney numunelerinin,  $f'_c \geq 30 \text{ N/mm}^2$  betondan üretilmesi ise, deney sonuçlarındaki sapmanın az olmasında büyük rol oynamaktadır.



## 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

### 2.1 Literatürdeki Önemli Diğer Çalışmalar

Aderans, 1900'lerden itibaren incelenmeye başlanmış ve 1950'lere kadar çok uzun bir süre betonarmenin varlığını borçlu olduğu bir olay olarak ele alınmış fakat kapsamlı olarak incelenmemiştir. Ancak daha sonraları bazı araştırmacıların öncülüğünde, aderans mekanizmaları, aderans ve çatlak ile ilgili gerilmeler ve relatif deplasmanlar konularına ağırlık verilmeye başlanmıştır. Son zamanlarda yapılan deneysel çalışmalarda, donatı aderansının incelenmesi ile ilgili daha çok aderans dayanımını etkileyen faktörler değişken parametreler alınarak, bu konu üzerinde irdeleme yapılmaktadır.

Yapılan bu çalışma konusu ile ilgili olarak daha önce yapılmış araştırmalar, literatürde şu şekilde yer almaktadır:

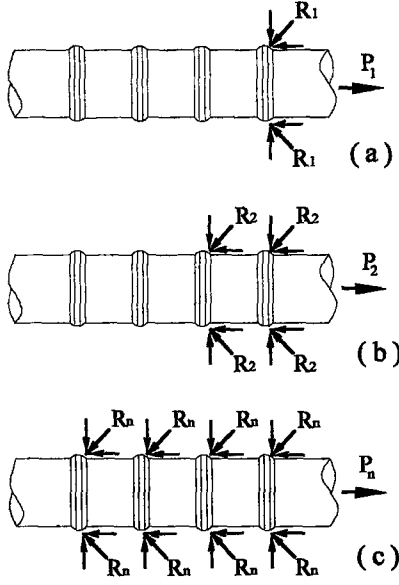
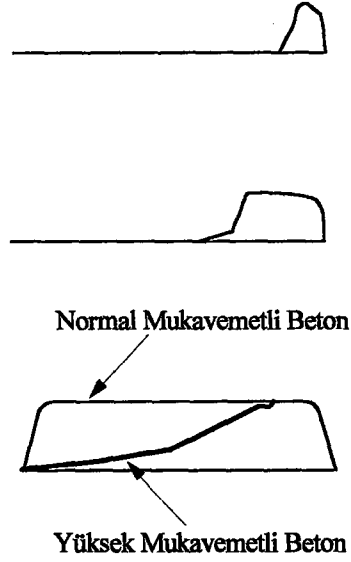
a) Orr (1976), çalışmasında kritik donatı bindirme uzunluğunu tespit etmek için, çubuk bindirme uzunlukları hariç, mümkün olduğu kadar benzer 4 adet kiriş numune dökmüştür. Beton özelliklerinde üniformluğu temin etmek için kirişleri, tek beton grubu şeklinde hazırlamıştır. Deney kirişlerini dört noktalı eğilmeye maruz bırakmıştır. Deneyler esnasında, eğilme momenti ve kirişlerin bindirme uzunlukları boyunca belli aralıklarda donatılara sabitlenmiş elektrik rezistanslı uzama ölçerlerle göçme öncesi donatı şekil değiştirmeleri ölçmüştür. Donatı akmasının, sadece donatı bindirme uzunluğu 1143 mm olan kirişte olduğunu gözlemlemiştir.

Sabit moment bölgelerinde bindirmeli ekli çekme donatısına sahip kirişlere ait deneyler sonucunda, bindirme uzunluğuna bağlı olarak donatı çubuğunda oluşan kuvvetin, donatının akma gerilmesine ulaşmasına kadar bindirme uzunluğu ile doğru orantılı olduğunu tespit etmiştir. Dolayısıyla, çok sayıda bindirmeli ekli kirişlere ait deney dataları ve donatı çubuğunun gerçek akma dayanımının bilinmesi ile kritik bindirme uzunluğunun tayin edilebileceğini saptamıştır. Uzama ölçümlerinin arzu edilen düzeyde olmasına rağmen, esas teşkil etmeyeceği sonucuna varmıştır. Çünkü bindirmeli ekli donatı uçlarında, akma gerilmesinin altındaki seviyelerde donatıda oluşan gerilmelerin, nihai mukavemet analizi kullanılarak hesaplanabileceğini tespit

etmiştir. Kritik bindirme uzunluğunun, ekleme mukavemetini etkileyen çok daha önemli faktörleri de içine alan kapsamlı bir test programı vasıtasıyla sistematik olarak incelenmesinin gerekliliğini görmüştür. Bunun ise, ancak, bindirmeli ekli çekme donatılarının hesabı için kurallar geliştirmekle daha mümkün olacağının sonucuna varmıştır.

b) Azizinamini ve diğ., (1993), yüksek mukavemetli betonda nervürlü donatı çubuklarının aderans performansını tanımlamak için, beton basınç mukavemeti 97 MPa olan ve sabit moment bölgesinde No.11 (35.8 mm) nervürlü donatıların üst üste bindirildiği 12 adet kiriş numunesini basit eğilmeye maruz bırakmışlardır. Elde ettikleri sonuçlardan hipotez şeklinde bir davranışsal model sunmuşlardır. Bu modelin anlaşılması açısından yazarlar, nervürlü donatı çubuğunun bir kısım nervürlerinin betona gömülü ve monoton artan eksenel çekme kuvvetlerine maruz kaldığını kabul etmişlerdir (Şekil 2.1). ACI Yapı Şartnamesi , neticede bütün nervürlerin betona karşı koyma ve donatıya etki eden eksenel kuvvete direnç göstermeye katıldığı anlamına gelen nihai aderans gerilme dağılımının Şekil 2.1c'de ince çizgi ile gösterildiği gibi üniform olduğunu kabul etmektedir. Halbuki, yüksek mukavemetli betonu esas alan bu çalışmada, nervür çıkıntılarının civarındaki çubukları saran betonun yarılmasına sebep olan düşey bileşenin, daha büyük radyal çekme kuvvetleri meydana getirdiğini gözlemlemişlerdir. Bu sebeple, yüklemeye yakın nervürlerin daha çok kuvvet taşıdığını ve daha ileride bulunan nervürlere aynı oranda yük düşmediğini tespit etmişlerdir. Dolayısıyla kırılmanın, Şekil 2.1c'de kalın çizgi ile gösterildiği gibi, üniform olmayan bir şekilde ve bütün donatı nervürleri eksenel kuvvete direnmeye katılmadan önce meydana geldiğini saptamışlardır.

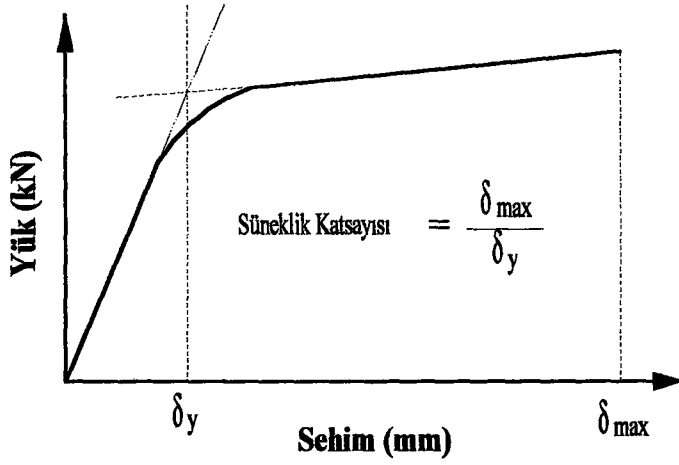
Sonuç olarak, yüksek mukavemetli betona gömülü ve beton örtü kalınlığı az olan donatı çubuklardan, daha yüksek aderans mukavemeti elde etmek için bindirme bölgesi üzerinde minimum enine donatı miktarı sağlanarak bütün çıkıntıların taşımaya katılabileceği bir mekanizma geliştirmişlerdir. Bunun yanında, yüksek mukavemetli beton ve küçük beton örtü kalınlığı durumunda üst-döküm çubukların, aderans açısından daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Normal mukavemetli betonda ise, nervürlü donatı çubukların aderans açısından aksine bir sonuç verdiğini tespit etmişlerdir.

**Donatı Çubuğuna Etki Eden Kuvvetler****Aderans Gerilme Dağılımı**

**Şekil 2.1** Betona gömülü ve çekmeye maruz nervürlü donatı çubukların davranışının idealizasyonu, (Azizinamini, Stark, Roller ve Ghosh, 1993)

c) Azizinamini ve diğ. (1999), ACI 318-95 Yapı Şartnamesinin, donatı kenetlenmesi ve bindirmeli ekli çekme donatısı hesabında beton basınç mukavemeti için getirdiği 69 MPa sınırlamasının kaldırılma imkânını araştırmak amacıyla, yüksek mukavemetli betona gömülü donatı çubuklarının aderans performansını değerlendirmeyi esas alan ve iki safhadan oluşan bir inceleme yürütmüşlerdir. İncelemenin birinci safhasında 19 adet ve ikinci safhasında 51 adet olmak üzere, çekme donatısı sabit moment bölgesine bindirmeli ekli olarak yerleştirilmiş toplam 70 adet kiriş numunesi test etmişlerdir. Deneyler esnasında değişken parametre olarak ekleme uzunluğu, çubuk çapı, deformasyon tipi, betonlama durumu, beton basınç mukavemeti ve ekleme bölgesindeki enine donatı miktarını belirlemişlerdir.

Çalışmanın birinci safhasında, normal ve yüksek mukavemetli betona gömülü donatı nervürleri performansının, aderans karakteristikleri üzerinde meydana getirdiği farklılıkları tanımlamak için, kırılma hipotezi şeklinde bir davranışsal model geliştirmişlerdir.



Şekil 2.2 Süneklik katsayısının tanımı (Azizinamini, Pavel, Hatfield ve Ghosh, 1999)

İncelemenin ikinci safhasının amacını ise, ekleme uzunluğu boyunca minimum enine donatı yerleştirilerek, bu konuyla ilgili deneysel data geliştirmek olarak belirlemişlerdir. Minimum enine donatı ile süneklikte önemli bir artış olduğunu görmüşlerdir. Çalışmanın bu safhasında, süneklik katsayısı tanımlaması da yapmışlardır (Şekil 2.2). Bu oranın 1'den büyük olması, boylamasına çubukların en azından gerçek akma dayanımlarını sağlayacak kapasitede olduğu ve numunelerin belli bir seviyede süneklik sergilediği anlamını ifade etmektedir.

Yaptıkları deneylerden, aşağıdaki sonuçları çıkarmışlardır:

1. Yüksek mukavemetli beton ve özellikle beton örtü kalınlığının küçük olması durumunda ekleme uzunluğunu fazla tutmanın, aderans dayanımını arttırmada etkili bir yaklaşım olmadığını görmüşlerdir. Ancak, yüksek mukavemetli betona gömülü nervürlü donatı çubuklarının aderans dayanımını arttırmak için, çekme etkisindeki ankraj veya ekleme donatısı uzunluğu boyunca, beton örtü kaplamanın yarılmasını geciktirecek olan minimum enine donatı yerleştirilmesi gerektiğini tespit etmişlerdir.
2. Geçmişte araştırmacılar, normal mukavemetli betona gömülü donatı çubuklarının aderans dayanımını inceledikleri zaman, bir indeks olarak  $u_{test} / u_{ACI}$  oranını kullanmışlardır. Bu indeks değeri 1'i aştığı zaman aderans dayanımının yeterli olduğu varsayılmaktadır. Bununla beraber yüksek mukavemetli beton durumunda, 1'i aşan  $u_{test} / u_{ACI}$  oranının gerekli bir kriter olduğu fakat yapılan deneyler sonucunda donatı

ubuklarının aderans mukavemetlerini değerlendirmede etkili olamadığını görmüşlerdir. Bu kriterin, bindirmeli ekli çekme donatıya sahip elemanların düktil bir davranış ile göçmelerini garanti etmeyeceğini saptamışlardır.

3. No.8 ve No.11 donatılarına ve değişen beton örtü kalınlıklarına sahip olan numunelerin deneylerden gözlemlenen davranışları sonucu, daha büyük beton örtü kalınlıklarında da çekme etkisindeki ankraj ve ekleme uzunluğu boyunca minimum enine donatının gerekliliğini tespit etmişlerdir.

d) Hwang ve diğ. (1996), çalışmalarında yüksek mukavemetli betona gömülü nervürlü çubukların ekleme ve ankraj mukavemetini incelemek için, toplam 20 adet kiriş numunesi test etmişlerdir. Değişken olarak ise, beton mukavemeti, ankraj uzunluğu ve enine donatı miktarını seçmişlerdir. Çekme donatısı açıklık ortasında bindirmeli ekli yerleştirilmiş kiriş numuneleri, sabit moment bölgesinden dört noktalı eğilmeyle yüklemişlerdir. Bindirme uzunluklarını, Orangun ve diğerleri (1977) tarafından geliştirilen ampirik denklemleri esas alarak, donatı akmaya ulaşmadan önce aderans kırılması (yarılma) ile göçme olacak şekilde belirlemişlerdir. Çalışmada, yüksek mukavemetli betonun aderans dayanımını tahmin etmek için, mevcut olan modellerin uygulanabilirliğini incelemişlerdir.

Çekme bölgesine yerleştirilen bindirmeli ekli ve ankraj donatı çubuklarının kullanıldığı 20 adet kiriş numunesine ait deney sonuçları ve data sınırlayıcılarını esas alarak aşağıdaki sonuçlara varmışlardır:

1. Silis dumanı kullanılmayan yüksek mukavemetli betonun aderans mukavemetinin, çatılma, yarılma ve donatı ile beton arasındaki ara yüzey davranışı dikkate aldıklarında, donatının üst üste bindirilmesi veya ankraj durumuna bakılmaksızın, normal mukavemetli betonun aderans mukavemetine benzer olduğunu görmüşlerdir. Yüksek mukavemetli betonda, bindirmeli ekli ve ankraj çekme donatısı uzunluklarının aynı olmasının daha iyi olacağı sonucuna varmışlardır.

2. Yüksek mukavemetli betonun aderans davranışında, kabul edilen enine donatı miktarının (ACI 408 ve Orangun ve diğ., 1977) arttırılmasının, olumlu etki meydana getireceğini tespit etmişlerdir. Çünkü, enine donatı sargısının  $\phi$ 'den  $2\phi$ 'ye ve toplam sargının  $3\phi$ 'den  $4\phi$ 'ye arttırılmasıyla, yüksek mukavemetli beton ile ilgili test datalarının ACI 408 tavsiyeleriyle iyi korelasyon sağladığını görmüşlerdir.

3. Yüksek mukavemetli beton durumunda, ankraj uzunluğu kısa olan kirişlerden ölçülen aderans dayanımının, gerekli uzunluğun sağlanamaması durumunda, önemli etkilere maruz kalabileceğini gözlemlemişlerdir. Bu sebeple, ankraj uzunluğunun, aderans dayanımı üzerindeki etkisiyle ilgili tetkikin, gerçek emniyet payının sağlanması bakımından gerekli olduğunu görmüşlerdir.

e) Hamad ve Itani (1998), çalışmalarında, açıklık ortasında üst üste bindirilmiş iki çekme donatısına sahip 16 adet kiriş numunesini test etmişlerdir. Ekleme uzunluğunu, kiriş numunelerindeki göçmenin, donatı akma noktasına ulaşmadan önce bindirme bölgesindeki beton örtünün yarılmaması sonucu oluşacak şekilde seçmişlerdir. Sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli çekme donatısına sahip kirişleri, dört noktalı eğilme ile yüklemişlerdir. Değişkenleri ise, çimento ağırlığı yüzdesi oranında yerleştirilen (%0, 5, 10, 15 ve 20) silis dumanı, donatı pozisyonuna göre betonlama durumu (alt veya üst-döküm), süper akışkanlaştırıcı dozajı (2L veya 4L/100 kg çimento) olarak seçmişlerdir.

Yük-sehim eğrilerinin analiz ve karşılaştırılması ve aderans dayanımlarını esas alarak aşağıdaki sonuçları çıkarmışlardır:

1. Silis dumansız alt ve üst döküm kirişlerin yük-sehim eğrilerinin, bütün yükleme safhaları için hemen hemen aynı olduğunu ve bu gözlemin 2L ve 4L / 100 kg çimento dozajlı süper akışkanlaştırıcının olduğu kirişler için de geçerli olduğunu görmüşlerdir.
2. Çatlak oluşumunun başladığı yük seviyelerinin üstünde, beton karışımına katılan silis dumanı yüzdesine, döküm pozisyonuna ve süper akışkanlaştırıcı dozajına bakılmaksızın kiriş rijitliğinin azaldığını gözlemlemişlerdir.
3. Karışıma giren çimento ağırlığının %5'i ile 20'si oranında kullanılan silis dumanının, betonlama durumuna veya süper akışkanlaştırıcı dozajına bakılmaksızın, aderans dayanımını ortalama %10 oranında azalttığını tespit etmişlerdir.
4. Silis dumansız kiriş numunelerde, üst-döküm çubuk eklemelerin, alt-döküm çubuk eklemelerden az da olsa, daha büyük aderans dayanımı sağladığını gözlemlemişlerdir. Bu durumun, her iki süper akışkanlaştırıcı dozaj için de geçerli olduğunu görmüşlerdir.
5. Süper akışkanlaştırıcı dozajının 2L'den 4L/100 kg çimentoya arttırılmasının, alt-döküm kirişlerin aderans dayanımında negatif ve üst-döküm kirişlerin aderans dayanımında pozitif etkiye sahip olduğunu saptamışlardır.

6. Bindirmeli ekli çubukların ölçülen aderans gerilmelerinin, Orangun ve diğ., (1977) geliştirdiği denklem, ACI 318-89 ve ACI 318-95 Yapı Şartnamelerinin önerdiği denklem kullanılarak hesaplanan değerler ile karşılaştırıldığında, Orangun ve diğ., (1977) denklemi ile çok yakın bir aderans dayanımı tahmini sağladığını görmüşlerdir.

f) Esfahani ve Rangan (1998a), aderans üzerine yaptıkları çalışmalarının bu ilk kısmında, kısa uzunluklu pull-out numuneler kullanarak, özellikle beton ile donatı arasındaki lokal aderans üzerinde  $c_{min} / \phi$  ve  $f'_c$ 'nin etkisini incelemeyi amaçlamışlardır. 5 seri halinde 45 adet numune test etmişler. Her çubuk için relatif nervür alanı oranını yaklaşık olarak 0.07 hesaplamışlardır. Bütün numunelerde, yan kaplama ile alt kaplama ( $c_x / c_y$ ) oranını 2.5 olarak almışlardır.

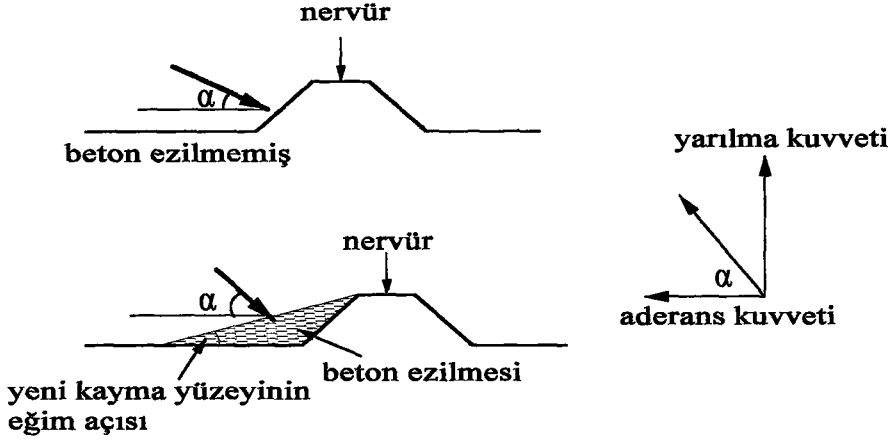
Aderans gerilme dağılımı hemen hemen üniforma yakın olan kısa uzunluklu numunelerin sonuçlarının, maksimum aderans gerilmesinin hesabında kullanılabilmesinin, çalışmanın önemini arttırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca, bu incelemede elde edilen denklemlerin (lokal aderans denklemleri), eklemelerin uçlarındaki maksimum aderans gerilmelerinin hesabında da kullanılabilecek olmasının çalışmayı daha orijinal kıldığını vurgulamışlardır.

Literatürdeki mevcut test sonuçları kullanılarak, normal mukavemetli betonda ezilme açısı değişimini ve betonun çekme plastik deformasyonunu hesaplamak için, Tepfers'in (1980), kısmen çatlamış kalın silindir teorisi yardımıyla, kısmen çatlamış elastik safha ve plastik safha için geliştirdiği denklemleri değiştirmişlerdir. Sonuçta, normal ve yüksek mukavemetli betonlar için lokal çatlama aderans dayanımı denklemlerini elde etmişlerdir.

Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçları çıkarmışlardır:

1. ( $c_{min} / \phi$ ) değerini sabit tuttuklarında, yüksek mukavemetli beton durumunda  $u_c / f_{ct}$  değerinin, normal mukavemetli beton durumunda elde edilen değere göre daha yüksek çıktığını görmüşlerdir.
2. Beton mukavemeti daha düşük olan numunelerde, daha düşük  $u_c / f_{ct}$  değerlerinin elde edilmesine, Şekil 2.3'de görüldüğü gibi nervürlerin önündeki beton ezilmesinden dolayı daha küçük eğim açılı yeni bir kayma yüzeyinin şekillenmesinin sebep olabileceğini saptamışlardır (Lutz ve Gergely, 1967; Akashi ve diğ., 1993). Beton

silindirdeki dairesel çekme şekil değiştirmelerinin ölçümünden, yeni kayma yüzeyinin daha büyük kayma kuvvetine ve böylece küçük aderans dayanımına sebep olduğunu belirlemişlerdir (Akashi ve diğ., 1993).



Şekil 2.3 Nervür önündeki betonun ezilmesi (Lutz ve Gergely, 1967; Akashi ve diğ., 1993).

3. Nervür yüzey açısı  $40^{\circ}$  ile  $47^{\circ}$  arasında olan çubukların kullanıldığı numunelere ait  $u_c / f_{ct}$  değerinin,  $23^{\circ}$  ile  $27^{\circ}$  arasında nervür yüzeyi açısına sahip olan donatı çubuklarının kullanıldığı numunelerden elde edilen değerden daha büyük olduğunu görmüşlerdir.

4. Ayrıca, 75 ve 50 MPa beton mukavemetine sahip numunelerin,  $u_c / f_{ct}$  değerlerinin de birbirine yakın olduğunu gözlemlemişlerdir.

5. Kısa uzunluklu numunelerin test sonuçlarını kullanarak, normal ve yüksek mukavemetli beton durumunda, lokal aderans için ampirik denklemler elde etmişlerdir. Bu denklemleri, incelemenin ikinci kısmında, sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli çekme donatısına sahip kirişlerde, beton ile donatı arasındaki aderansın analizinde kullanmışlardır.

g) Esfahani ve Rangan (1998b), çalışmalarının bu ikinci kısmında, bindirmeli ekli kirişlerin aderansı üzerinde beton mukavemeti, bindirme uzunluğu, beton örtüsü, yan ve

alt beton örtü arasındaki oran, bindirme çubukları arasındaki mesafe, donatı çubuğunun çıkıntı yüzey açısı ve beton karışımındaki katkı maddeleri oranı gibi parametrelerin etkisini dikkate almışlardır. Çalışmayı iki safhada yürütmüşlerdir. Birinci safhada, kısa uzunluklu eklemelerdeki yapışma etkileşimi ve donatı çubuklarının deformasyon özelliklerini dikkate alarak, hem normal hem de yüksek mukavemetli betondan üretilmiş kirişlerdeki eklemelerin aderans dayanımını hesaplayacak bir analitik denklem geliştirmişlerdir. İkinci safhada ise, yüksek mukavemetli betondan yapılmış 22 adet kiriş numunesini test etmişlerdir. Her bir kirişteki çekme donatısını, sabit moment bölgesinde üst üste eklemiş ve kesme açıklıklarını etriye ile sarmışlardır. Boylamasına doğrultuda nervürlerin konfigürasyonu ve çubuk eksenine göre çıkıntı yüzey açıları farklı olan iki donatı tipi kullanmışlardır.

Çalışmanın amacını, normal ve yüksek mukavemetli beton ile kirişlerdeki bindirmeli ekli çubuklar arasındaki aderans dayanımının hesabı için analitik bir model geliştirmek olarak belirlemişlerdir. Çalışmanın önemi açısından, geliştirilen analitik modelde çekmeye çalışan eklemeler için, ekleme uzunluğu boyunca oluşan gerilme değişimini dikkate almışlardır. Ayrıca, yan ve alt beton örtü ve eklemeler arasındaki mesafe oranlarının etkisini modele dahil etmişlerdir. Elde edilen modeli, normal ve yüksek mukavemetli betonlardan üretilen kiriş numunelerine ait test sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

İncelemeyi tümü ile esas aldıklarında, aşağıdaki sonuçları çıkarmışlardır:

1. Ekleme uzunluğu boyunca aderans gerilme dağılımı ve eklemelerin mukavemetinin, donatı yüzeyi konfigürasyonu, donatı çapı, beton basınç mukavemeti ve bindirme uzunluğu ile etkilendiğini görmüşlerdir.
2. Kiriş eklemelerindeki aderans dayanımının hesabı için geliştirilen analitik denklemde, yan kaplama, alt kaplama ve donatı aralığı arasındaki oranların etkisini hesaba katmak için  $c_{med} / c_{min}$  parametresini gözönünde bulundurmuşlardır.
3. Çalışmanın birinci safhasında geliştirilen denklemi, Orangun ve diğ., (1977), Darwin ve diğ., (1992), ACI 318 Yapı Şartnamesi ve AS 3600 Şartnamesi (1994) ile karşılaştırdıklarında, test sonuçlarından elde edilen denklemin, en az sapma ile bindirmeli ekli çekme donatılarının aderans dayanımını iyi tahmin ettiğini görmüşlerdir.

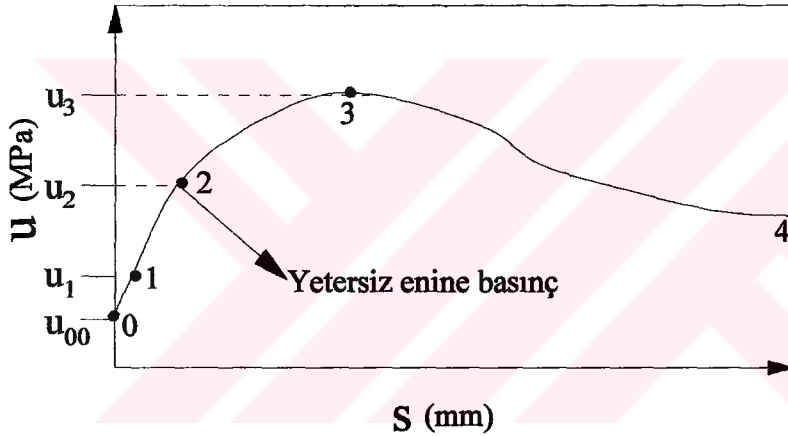
h) Larrard ve diğ., (1993), çalışmalarında silis dumanı kullanarak ürettikleri 95 MPa mukavemetli yüksek performanslı beton (YPB) ile donatı çubukları arasındaki aderans dayanımının tartışılmasını konu almışlardır. Çalışma konusunu, beton tipi (yüksek performanslı beton ve 42 MPa mukavemetli kontrol betonu), donatı çapı (10, 16 ve 25 mm) ve donatı yüzey durumu (nervürlü ve düz) gibi değişkenleri esas alarak değerlendirmişlerdir. Deneyleri, RILEM şartları esaslarına göre hazırlanan normal mukavemetli ve YPB'den üretilen deney kirişleri ile düz ve nervürlü donatı tipi kullanarak yürütmüşlerdir.

Çalışmada, hazırlık testleri sonucu ankraj uzunluğunu, YPB' den dolayı nihai yükte donatının elastik davranışta kalmasını sağlamak için, RILEM' in tavsiyeleri dışında 10 ve 16 mm çubuklar için  $3\phi$ , 25mm çubuklar için  $2.5\phi$  ve 25 mm düz çubuklar için ise,  $3\phi$  ve  $5\phi$  almışlardır. Testler sonucunda elde edilen yük-kayma eğrilerinde, 10 mm çaplı donatının iki farklı beton davranışı için önemli bir fark gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca her bir donatı çapı için, çelik-YPB aderans rijitliğinin, kontrol betonu ile sarılı donatıda yükleme başlangıcında oluşan kaymaların aksine, daha büyük olduğunu belirlemişlerdir. Donatı-beton aderansını değerlendirmek için kriter olarak donatının her bir ucunda 10 ve 100  $\mu$ m kadar kayma olması için belirli bir yük uygulamak şeklinde belirlemişlerdir.

Yapılan deneylerden aşağıdaki sonuçları çıkarmışlardır:

1. YPB kullanılarak elde edilen aderans dayanımının daha büyük olduğunu gözlemlenmiştir. Normal mukavemetli elemanlar ile karşılaştırdıklarında, YPB elemanlarda aderans dayanımının, 10 mm çaplı nervürlü çubuklarda % 80 arttığını ve 25 mm çaplı nervürlü çubuklarda ise % 30 azaldığını tespit etmişlerdir.
2. Aderansın artırılmasının, betonun çekme mukavemetinin düzeltilmesi ve betondaki rötreden dolayı sarma etkisinin daha etkili olduğu az donatı yüzdesi ( $\rho$ ) ile mümkün olacağını tespit etmişlerdir. Yani, betondaki rötrenin, donatı yüzdesinin az olması durumunda donatıyı daha iyi sarma etkisi göstereceğini, yapılan testler sonucunda görmüşlerdir. Bu sebeple, beton karışımında rötreyi arttırdığı tespit edilen silis dumanı kullanmışlardır.
3. Enine donatı kullanılmasının, büyük çaplı çubuklarda da gevrek davranışı önlediğini gözlemlenmiştir.

i) Karakoç (1985), bu çalışmada betonarme bir yapı elemanında çoğu kez yarıma çatlakları ile sonuçlanan, beton ile nervürlü donatı arasındaki mekanik etkileşim olayını konu almışlardır. Çalışmanın amacını, donatı ile beton arasındaki aderansın mekanik etkileşimine ışık tutmak olarak belirlemişlerdir. Bu sebeple, söz konusu olayla ilgili olarak yarıma çatlakları daha önceden oluşmuş bulunan ve kritik bir önem kazanarak aderans göçüşünü tayin edici kriter durumuna gelen, enine basıncın uygulanması gereken elemanların, nihai aderans davranışlarını incelemişlerdir. Ayrıca, aderans davranışları bazı bulgularla uyum içinde bulunmayan ve genel anlamda tahminsel verilere dayanan, Şekil 2.4'de 2-3 ve 3-4 bölümleriyle gösterilen aderans davranışını tanımlamanın bu konuda önemli bir aşama olacağını öne sürmüşlerdir.



Şekil 2.4 Aderans – Kayma eğrisi (Karakoç, 1985)

Aderans olayını, sadece donatı nervürleri ile beton arasındaki mekaniksel etkileşim bakımından incelemek için simüle edilmiş ve açılma doğrultusu numune düzleminde olan yarıma çatlaklarına sahip muhtelif beton numuneler hazırlamışlardır. Çalışmayı, iki seri halinde, yedi adet numune üzerinde çekip-çıkarma deneyleri ile yürütmüşlerdir. Birinci seri deneylerde, yuvarlak enkesitli nervürlü donatı kullanmışlardır. İkinci seri deneylerde ise, düzlem gerilme durumunu gözönünde bulundurmak amacıyla dikdörtgen enkesitli özel bir donatı kullanmışlardır.

Deneylerin değerlendirilmesinden sonra aşağıdaki sonuçlara varmışlardır:

1. Yarıma çatlakları konusunda yapılan deneylerle ilgili sonuçlarda ve çizilen diyagramlarda enine basıncın genel olarak aderans ve özellikle maksimum ve kalıcı aderans üzerindeki olumlu etkisini açıkça gözleyebilmişlerdir.
2. Maksimum aderans gerilmesinin yarıma çatlak genişliğinden bağımsız olduğunu fakat ikinci seri deneylerde çatlak genişliğinin aderans direncine etkisinin daha belirgin olmakla beraber pratik yönden ihmal edilebilecek mertebede olduğunu saptamışlardır.
3. Aderans gerilmesi-kayma diyagramlarını, maksimum gerilme bölgesinde ve donatının sıyrılma durumuna karşı gelen bölgede, sabit gerilmeyi belirleyen yatay bir doğru ile karakterize etmişlerdir. Bu bölgelere karşı gelen sürtünme katsayılarının ( $k_1$ ,  $k_2$ ), yarıma çatlak genişliği ile ters orantılı olarak bölge boyunca sabit kaldığını görmüşlerdir.
4. Enine basıncın, maksimum değerine ulaştıktan sonra sabit kaldığını görmüşlerdir.
5. Özellikle birinci seri deneylerin sonuçlarına göre maksimum enine basınç gerilmelerinin, artan çatlak genişliği değerleri için artma gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Fakat  $\partial u / \partial s$  aderans rijitliğinin azalan çatlak genişliği ile arttığını saptamışlardır.

k) Zuo ve Darwin, (2000), çalışmalarında esas hedefleri, aderans dayanımı üzerinde beton özelliklerinin etkisini daha iyi anlamayı kazandırmak, şu anda uygulamada kullanılan bütün beton mukavemeti değerleri için yüksek relatif nervür alanına sahip çubukların davranışını daha iyi anlamak ve beton elemanı ile donatı çubuklarının geometrik ve malzeme özelliklerine bağlı olarak aderans dayanımını doğru bir şekilde temsil eden dizayn tanımlamasını geliştirmek olmuştur. Bu sebeple, test sonuçları analizlerinin baz alınması yanı sıra, uluslararası veri tabanı oluşturarak aderans dayanımı ile ilgili dizayn tanımları geliştirmişlerdir. Ayrıca bindirmeli ekleme/ankraj uzunluğunu, beton basınç mukavemeti, relatif nervür alanı, donatı hacmi ve hem beton hem de enine donatı ile sağlanan sargının bir fonksiyonu olarak tanımlamışlardır.

Deneylerde değişken olarak giriş genişliği ve yüksekliğini ve bindirme uzunluklarını almışlardır. Giriş numunelerini, basit mesnetli ve sabit moment bölgesine iki ve üç bindirmeli ekli donatı yerleştirerek dört noktalı basit eğilmeyle yüklemişlerdir.

Deney sonuçları ve çalışmada sunulan analizlerden, aşağıdaki sonuçlara varmışlardır:

1. İri agregası daha güçlü olan betonun, bütün sargı (etriye ve beton) durumlarında daha yüksek ekleme mukavemeti sağladığını görmüşlerdir.
2. Enine donatı ile sarılmış donatı eklemelerine ait dayanımın, beton içerisindeki daha büyük iri agrega durumunda daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir.
3. Enine donatı ile sarılmayan eklemeler için  $\sqrt[4]{f'_c}$ , ekleme dayanımı üzerinde beton mukavemetinin etkisini en iyi karakterize ettiğini ve  $\sqrt[4]{f'_c}$  ün ise, enine donatı ile geliştirilmiş ilave edilen ekleme dayanımı üzerinde beton mukavemetinin etkisini karakterize ettiğini görmüşlerdir.
4. Enine donatı ile sarılmış çubukların ekleme dayanımının, relatif nervür alanı ve çubuk çapındaki artma ile arttığını gözlemlemişlerdir.
5. Eleman geometrisi, beton mukavemeti, relatif nervür alanı, hem beton hem de enine donatı ile sağlanan sargının bir fonksiyonu olan ve donatı çubuklarının ekleme dayanımını karakterize eden tanımlamaların, alt-döküm donatıların ankraj/ekleme dayanımını doğru bir şekilde temsil ettiğini saptamışlardır.
6. Bu yeni dizayn tanımlamalarının, hem emniyet hem de ekonomi bakımından ACI 318-99' deki kriterden daha iyi olduğunu görmüşlerdir.

İ) Hamad ve diğ., (2001), yüksek mukavemetli betonda çekme bindirmeli eklemelerin aderans dayanımı üzerinde betona çelik liflerin takviyesinin etkisini incelemek için, 12 adet tam ölçekli kirişi pozitif eğilmeye maruz bırakarak, 3 seri halinde test etmişlerdir. Herhangi bir seride test edilen kirişler arasındaki farkı, beton karışımının hazırlanması esnasında, ekleme bölgesine yerleştirilen çelik liflerin hacim oranı olarak belirlemişlerdir (1 m<sup>3</sup> beton için % 0, 0.5, 1, 2 oranında çelik lif). Ayrıca, herbir seri için farklı olmak üzere üç değişik donatı çapını (20 mm, 25 mm ve 32 mm) değişken olarak seçmişlerdir.

Çalışmada, çelik lif takviyelerin, aderans dayanımı ve yüksek mukavemetli kiriş numunelere yerleştirilen bindirmeli ekli çekme donatıların göçme modlarının düktilitesi üzerinde etkisini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Bu sebeple, bindirmeli ekli bölgede enine donatı kullanmamışlardır.

Sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli yerleştirilmiş çekme donatısına sahip ve yüksek mukavemetli betondan üretilmiş kiriş numunelerin, kırılma modlarının analizi ve karşılaştırılması, nihai yükler, eğilme çatlak genişlikleri, yük-sehim davranışı ve aderans gerilmeleri esas alarak aşağıdaki sonuçları çıkarmışlardır:

1. Bindirme bölgesinde çelik lif olmayan bütün kirişlerin, ani, çok gevrek ve sesli olarak ön ve yan yarıma göçme moduyla kırıldığını gözlemlemişlerdir. Göçmenin, alt ve yan kaplamalarda şekillenen boylamasına çatlaklardan hemen sonra oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bindirme bölgesinde çelik lif yoğunluğu artması durumunda, her ne kadar kırılma sonuçta aynı şekilde, beton örtünün yarıması ile oluşsa da, göçme modunun çok daha düktil ve tedrici olduğunu görmüşlerdir.
2. Genelde, aynı çubuk çapına ve  $c/\phi$  oranına sahip benzer kirişlerde, çelik lif yoğunluğunun artması durumunda, çatlak genişliklerinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Çelik tel içeren kirişlerdeki çatlakların, genellikle boyut olarak daha küçük ve çelik lif içermeyen kirişlere göre, daha çok sayıda oluştuğunu saptamışlardır. Göçme öncesi, küçük genişlikli çok sayıda çatlak gelişiminin, çelik tel içeren kirişlerin düktil davranış gösterebilme kabiliyetlerinden kaynaklandığını tespit etmişlerdir.
3. Beton karışımındaki çelik tel yoğunluğu artarken, ortalama aderans dayanımında belli bir artış olduğunu görmüşlerdir.
4. Çelik liflerden dolayı, ortalama yarıma aderans direncindeki artışların, teknik literatürde yer alan ve kısa uzunluklu çekip-çıkarma numuneleri kullanarak elde edilen dayanımdaki artışları fazlasıyla aştığını gözlemlemişlerdir.
5. Fazla çelik lif ihtiva eden numunelerin aderans dayanımındaki artışın, ekleme bölgesinde enine donatı kullanılarak elde edilebilen ve bir betonarme kirişin aderans dayanımındaki maksimum artış olan  $3\sqrt{f'_c}$  'ü aştığını görmüşlerdir.

### 3. ADERANS OLAYI VE KENETLENME

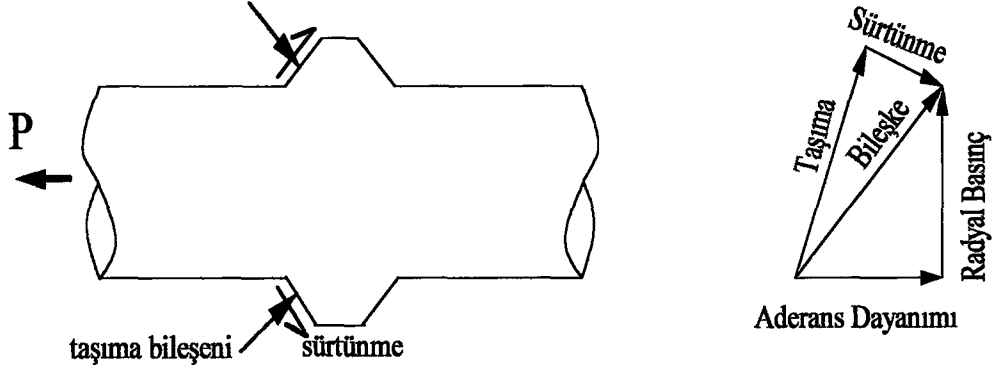
#### 3.1 Giriş

Bilindiği gibi, betonarmenin kompozit bir yapı malzemesi olması ve varoluş yapısına uygun olarak kullanılması, kendisini oluşturan beton ve çeliğin aralarında sürekli kuvvet aktarımı sağlayarak, birlikte çalışmasıyla mümkündür. Bu kuvvet aktarımını, donatının eksenine paralel olarak ve çevresini saran betona göre relatif kaymasına karşı gelen bağ kuvvetleri sağlamaktadır. Aderans adı verilen bu olgu, betonarmenin, direkt olarak varlığının bağlı olduğu ana bir olay olmanın yanı sıra, çatlama durumunu belirleyen ve betonun çatlamasından sonraki durumlarda da birlikte çalışmayı sağlayan bir öge olması nedeniyle, limit durum ve kırılma gücünde kıstas faktörlerden biri olarak ayrı bir önem kazanmaktadır (Karakoç, 1985).

Betonarme bir elemandaki aderans olayı, yüklenme durumlarına bağlı olarak iki şekilde söz konusu olmaktadır. Birincisi ankraj veya dış aderans olarak adlandırılan ve beton içindeki donatı çubuğunun çekme veya basınç tesiri oluşturan yük durumunda betondan sıyrılmasını önleyen aderanstır. Diğeri ise donatı çubuğu sıyrılmaya maruz olmamakla birlikte çekme veya eğilmeye çalışan betonarme elemanlardaki beton ile çeliğin birlikte çalışmasını sağlayan ve elemanın çatlama durumunu belirleyen iç aderanstır. 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 relatif 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 moleküler 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 dış kuvvetleri ve kenetlenme.



**Şekil 3.1** Betona gömülmüş donatı çubuğu parçasının serbest cisim diyagramı ve aderans dayanımı bileşenleri

### 3.2 Aderans Dayanımını Etkileyen Faktörler

Yüksek mukavemetli ve aderansı geliştirilmiş modern betonarme donatıların (nervürlü) meydana çıkması ile aderansın nedenleri ve üzerine etkileyen faktörler gibi pek çok konunun yeniden incelenmesi ihtiyacı doğmuştur. Yapılan araştırmalar eskiden bilinenden daha başka bir çok neden ve etkenlerin var olduğunu göstermiş ve etkenlerin sayısını büyük ölçüde arttırmıştır.

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 ise, bunların birbirleriyle olan bağlantı şekillerine göre  $u$  aderans çözümü gerilmesini veren ifade basit (etkenler birbirinden bağımsız)

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

( $\alpha_i, \beta_i$  ler sabitlerdir)

veya karmaşık (etkenler birbiriyle bağımlı)

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

bir görünüş alabilmektedir. Gerçekte ise  $u$  gerilmesini veren ifade karma bir özellik gösterir; yani bir kısım etkenler diğerlerinden bağımsız, geri kalanlar ise birbirleriyle bağımlıdır (Arda, 1968b).

Aderansın birçok değişkenle etkilendiği yukarıda belirtilmişti. Aderans dayanımında, kesme-aderans etkileşimi ve boyut etkisi çok önemli rol oynadıklarından, yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bulguları genelleştirmenin yanlış ve sakıncalı olacağı açıktır. Bu sebeple sayısal değerlendirmeye girmeden aderans dayanımını etkilediği kabul edilen başlıca faktörler aşağıda açıklanmıştır. Fakat bu etkenlerden bazıları sadece aderansı geliştirilmiş çubuklar veya çok korozyona uğramamış (pas tabakası bağlamamış) düz yüzeyli çubuklar için geçerlidir.

### 3.2.1 Donatı İle İlgili Etkenler

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

Donatı çapı değiştikçe, kenetlenmeyi sağlayan çevrenin, uygulanan kuvveti etkileyen alana oranı değişmektedir. 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 Riessauw (1957) ve Arda (1968a) tarafından yapılan önerilere göre artan donatı çapına göre lineer bir şekilde azalan aderans dayanımı hesaplanarak gözönüne alınabilir. Bu azalma, Ferguson ve diğ., (1965) tarafından verilen bir bağıntıda hiperbolik bir fonksiyon ile ifade edilmiştir.

Donatının akma dayanımı, kenetlenme boyunca aderans gerilmesinin dağılımında ve bindirmeli eklerde ise, gerilme aktarımında büyük rol oynamaktadır.

Çubuğun yüzey geometrisinin (nervür) aderansı arttırdığı kesin olarak bilinmekte ise de hangi profilin en uygun profil olduğu ve profil seçiminde hangi kısıtların 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 (Arda, 1968b).

### 3.2.2 Betonla İlgili Etkenler

Betonun çekme ve basınç dayanımları, bileşimi, yaşı, sıkıştırılması ve korunması aderans dayanımını etkileyen önemli etkenlerdir.

Betonun çekme dayanımı faktörü, aderansı geliştirilmiş çubuklarda önem kazanmaktadır. Çünkü nervürlü çubuklarla donatılmış elemanlarda kırılma, genelde yarıлма ile olacağından, betonun çekme dayanımı özellikle önem kazanmaktadır. Dolayısıyla, beton basınç mukavemetinin artmasının, aderans dayanımını arttıracığı açıktır.

Betonun bileşimi, betonun plastiklik derecesini tayin etmektedir. Aderans dayanımı plastiklikle ters orantılı bir gidiş gösterdiğinden, betonun bileşimi ile önemli derecede etkilenmektedir. Bileşimde kullanılan agreganın cinsi, granülometrisi, maksimum dane çapı, kum-çakıl ve su-çimento oranları, ve katkı maddeleri de aderansı etkiler. Örneğin hafif agregası ile üretilen betonun aderans dayanımı, normal agregası ile üretilene oranla daha düşüktür. Ayrıca, beton bileşimindeki çakıl miktarının azalması da aderansı azaltır. Diğer taraftan, agregası granülometrisinin aderans olayına etkisi sınırlı olmaktadır; çünkü çubuk yüzeyleri granülometrik özelliklerden bağımsız olarak daima en ince agregalarla temas geçmektedir. Pozzolanlı katkı maddelerinden olan silis dumanının da yapılan deneysel bir çalışma sonucunda, aderans dayanımını azalttığı gözlenmiştir (Hamad and Itani, 1998).

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

Betonun sıkıştırılması da betonun plastikliğini etkilemektedir. Vibratör ve kalifiye bir eleman ile yapılan bir sıkıştırma betonun dayanımına önemli ölçüde olumlu yansıyacaktır.

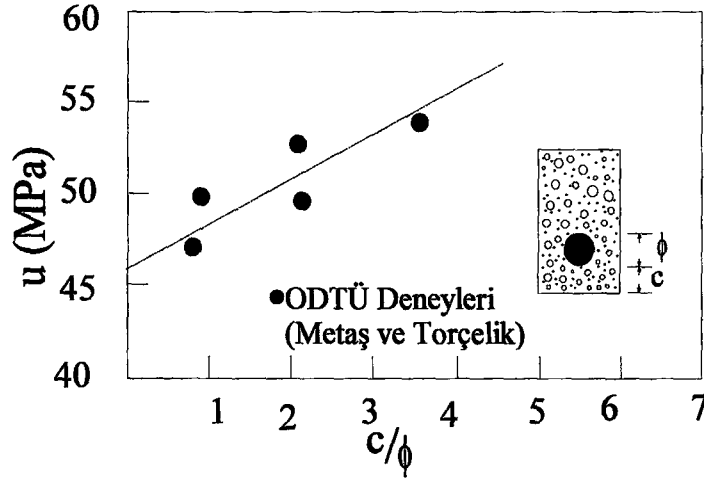
Beton döküldükten sonra, muhafaza edildiği ortamın şartları (ısı, nem, don, kür şartları gibi) aderans dayanımını büyük ölçüde etkilemektedir. Yani, betonun sertleşmesi süresince bakımındaki özen aderansı arttırmaktadır.

### 3.2.3 Betonarme Kesitin Geometrik Özellikleriyle İlgili Etkenler

Kenetlenme boyu, donatıyı örten betonun kalınlığı, çelik çubuğun betonlama sırasındaki konumu ve seviyesi, boyuna donatının kesit alanına ve çekme bölgesi alanına göre yüzdesi, betonarme kesitin şekil ve boyutları, betonarme taşıyıcı sistemin türü, çubuğun diğer kesitteki çubuklara göre konumu ve enine donatı gibi betonarme kesitin geometrik özellikleriyle ilgili faktörler aderans dayanımı üzerinde önemli etkilere sahiptirler.

Genellikle donatı çapının belirli bir katı olarak alınan kenetlenme boyunun, aderansı değiştirdiği günümüze kadar yapılan çalışmalarda gözlenegelmiştir. Ancak aderans dayanımı kenetlenme boyu ile direkt orantılı değildir, yani kenetlenme boyunun belli bir oranda artmasıyla, aderansın da aynı oranda artacağı beklenemez. Çünkü aderans açısından önemli olan, yeterli kenetlenme boyunun sağlanmasıdır.

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 arzermeyen yarıлма göçmesi meydana gelmektedir (Cairns ve Jones, 1996). Yarıлма 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 3.2 de görölmektedir (Ersoy, 1985).



Şekil 3.2 Beton örtü kalınlığının aderans dayanımına etkisi

Çelik çubuğun betonlama sırasındaki konumu, yani düşey, yatay veya eğik olması ve beton üst yüzeyine göre seviyesi, yani, altta veya üstte bulunması çubuğun aderansını ihmal edilmeyecek ölçüde etkiler. Clark A.P., üst sıralardaki yatay çubukların aderanslarının alt sıralardakilerin ancak 2/3'ü kadar olduğunu gözlemlemiştir. Bichara A., deneylere dayanarak, düşey konumdaki çubukların aderanslarının yatay konumdakilerden %50 fazla olduğunu ileri sürmüştür. Çubukların bu belirtilen konumlara göre aderans özelliklerinde oluşan farklılıklar aşağıdaki sebeplere dayandırılabilir:

- prizden önce alt seviyede hidrostatik basıncın daha büyük olması ve bu basıncın betonu alt çubuk sıraları üzerine bastırması,
- betonlama sırasında aşağıdan yukarıya doğru olan terleme sonucu üst yüzeye yakın çubukların altında biriken hava kabarcıkları,
- su ve hava dolu boşlukların sıkıştırma esnasında, hafiflikleri sebebiyle üst seviyede toplanmaları ve üst sıra çubuklarını sarmaları (Aka, Keskinel ve Arda, 1985).

Enine donatı ise, nervürlü çubukların aderansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bu donatı beton kütleyle sararak, yarılmaya karşı dayanımı önemli ölçüde arttırmakta olup, yarıлма çatlaklarının açılmasını da sınırlamaktadır.

### 3.2.4 Kesitin Mekanik Özellikleri ile İlgili Etkenler

Donatıdaki çekme veya basınç gerilmelerinin büyüklüğü ve çubuğu saran betonun çubuk eksenine doğrultusundaki ve bu eksene dik doğrultudaki gerilme durumları, aderansı etkileyen önemli etkenlerdendir.

Aderans gerilmesi, donatıdaki çekme veya basınç gerilmesinin bir fonksiyonu olmasından ayrı olarak, çubuk boyunca oluşan gerilme yayılımının değişmesinden de etkilenmektedir.

Çubuğu 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 mukavemetinin artmasına önemli katkıda bulunur.

### 3.2.5 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 büzülmeye 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 (1963), 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.

### 3.3 Aderans Deneyleri

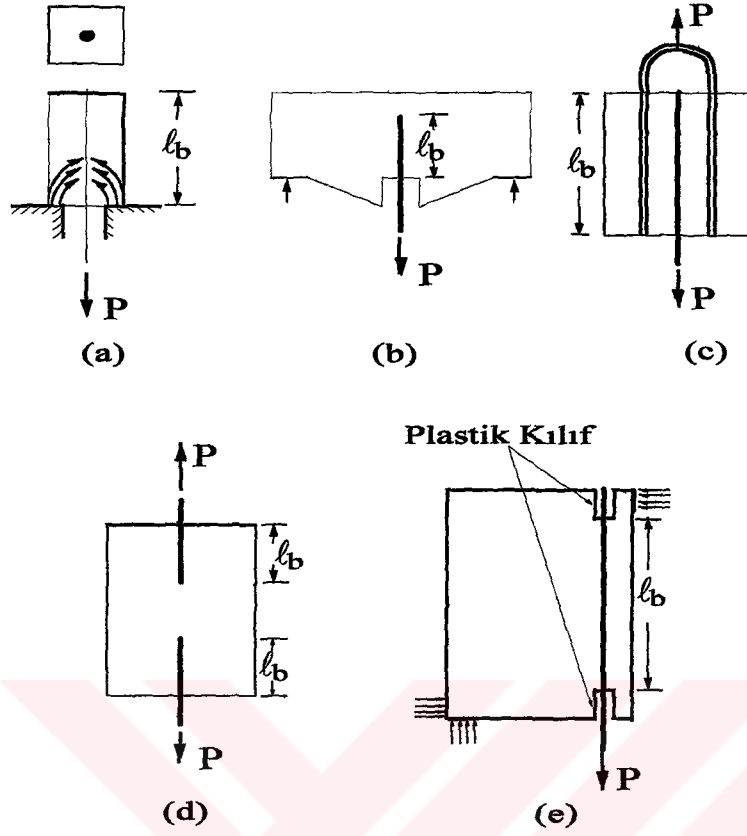
Bu konuda yapılan deneyler genelde dış aderans denilen direkt aderansla ilgili özellikleri (kenetlenme, bindirmeli ekleme, sınır gerilme) konu alan çekip-çıkarma (pull-out) deneyleri ile iç aderans denilen çatlama özelliklerini konu alan giriş deneyleri olmak üzere iki türdür. Yaygınlığı daha az olan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

#### 3.3.1 Çekip-Çıkarma Deneyi

Aderans deneyleri arasında en eskisi, en yaygın olarak kullanılanı, en basit ve en pratik olanı eksenel çekip-çıkarma deneyleridir(Şekil 3.3). 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 kütlesine göre kaymaları (sıyırılma)  $P$  ile bağıntılı olarak ölçülür. Bu ölçmeler ile çelik gerilmesine bağlı gerilme-sıyırılma diyagramları elde edilmektedir. Ayrıca değişik kenetlenme boyları kullanılarak yapılan deneylerle kenetlenme boyunun saptanması da 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.

Fakat Şekil 3.3e deki eksantrik çekip-çıkarma deney elemanı ile gerçekçi beton örtü kalınlığı ayarlanabilmekte ve yerel basınç gerilmeleri, uçlardan donatıya geçirilen kılıflarla yok edilebilmektedir. Ayrıca donatıya dik kesme kuvvetinin bulunması ve eğilme nedeni ile çatlamanın olabilmesi, bu deney elemanının daha gerçekçi sonuçlar vermesini sağlamaktadır.



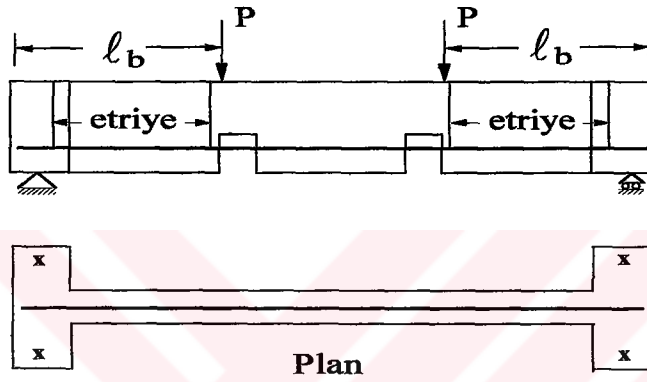
Şekil 3.3 Çekip-Çıkarma (Pull-out) Deneyleri

### 3.3.2 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.

### 3.3.2.1 Bureau of Standards Deneyi

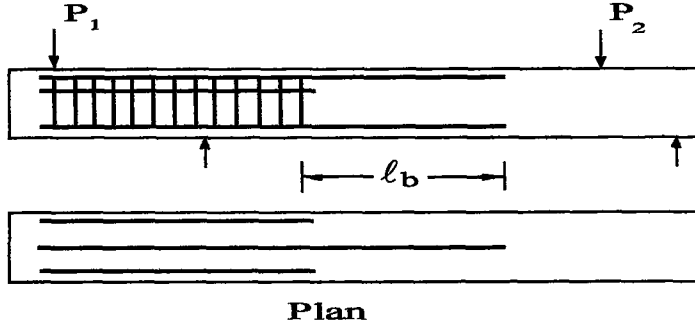
Kenetlenme boyunun saptanmasında daha gerçekçi şartları sağlayan bir deney türüdür. Şekil 3.4 de gösterilen Bureau of Standards deney elemanında kesme kırılmasını önlemek için aşırı etriye kullanmak gerekmektedir. Bu durum ise aderansı büyük ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla, gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmek açısından önemli bir sakınca doğmaktadır.



Şekil 3.4 Bureau of Standards deneyi

### 3.3.2.2 Teksas Deneyi

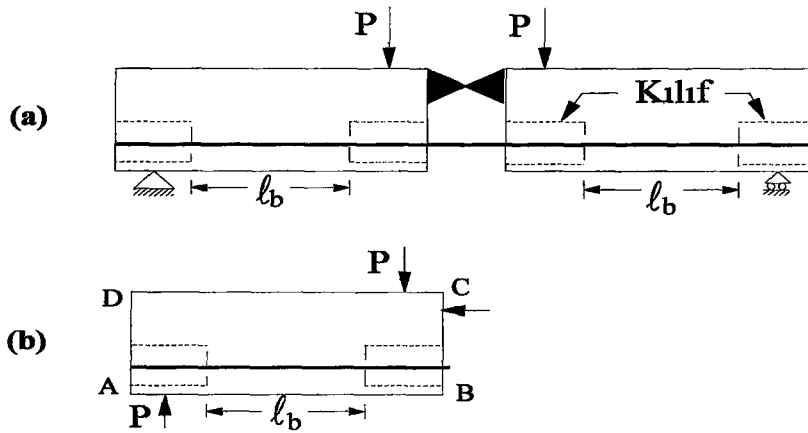
Bureau of Standards deneyine benzer şekilde kenetlenme boyunun incelendiği bu deney türünün sakıncası, donatının gerçeğe bağdaşmayacak genişlikte bir beton kütleyle gömülmüş olmasıdır (Şekil 3.5). Bu kiriş tipinde de başlıca önemli olan, donatıyı örten betonu sınırlayabilecek olan mesnetin uyguladığı yerel basınç gerilmelerinin önlenmesidir. Böylece, yarılmaya göçmesinin önlenmesi ortadan kaldırılmaktadır.



Şekil 3.5 Teksas deneyi

### 3.3.2.3 Standard 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 3.6). Denenen çubuklara etkiyen kuvvet, epruvete yüklenen  $P$  kuvveti ile orantılı olup, kademeli olarak arttırılmaktadır. Kademeler çubukta belirli çekme gerilmeleri oluşturmak üzere düzenlenmiştir.



Şekil 3.6 Standart Mafsallı Belçika Deneyi

Şekil 3.6b deki serbest cisim diyagramından görüleceği gibi, bu deney elemanının yarısı, Şekil 3.3e’de gösterilen eksantrik çekip-çıkarma deney numunesine benzemektedir. Ancak, O.D.T.Ü.’ de yapılan deneyler, bu iki tür deney elemanından elde edile 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 (Ersoy, 1985).

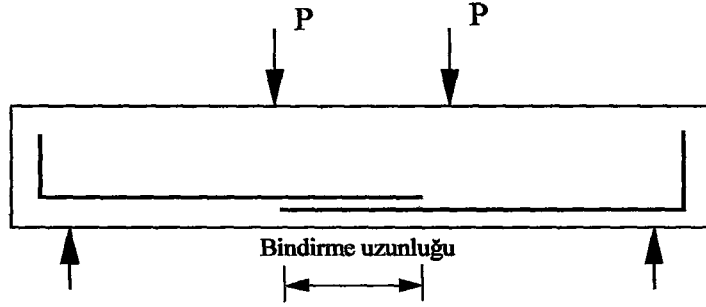
#### 3.3.2.4 Kiriş Çatlama Deneyi

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 kırış 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 3.7’de görüldüğü gibi, çekme donatısı, sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli olarak yerleştirilmektedir. Böylece nihai yükte, donatı akmadan önce, yarıma 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.

Bu çalışmada da kullanılan deney türü, pratikte karşılaşılabilecek ve aderans dayanımını etkileyen bir çok faktörün (donatı çapı ve yüzey şekli, beton basınç mukavemeti, 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.



a) Görünüş



b) Plan

Şekil 3.7 Çekme donatısı sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli olarak yerleştirilmiş kiriş deneyi

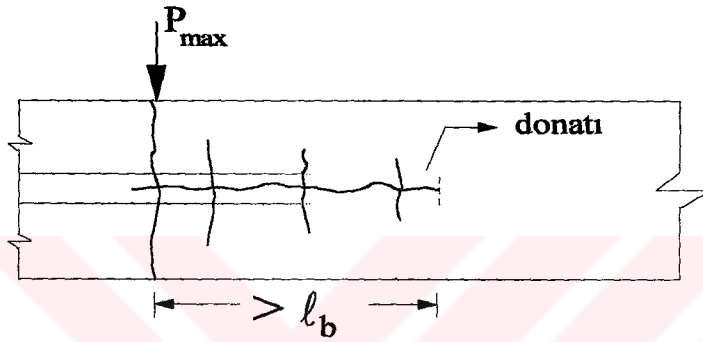
### 3.4 Çatlama Olayı

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 çatlaka bölünmüş olur (Aka, Keskinel ve Arda, 1985).

Aderans gerilmelerinin, yani elemanı yarılmaya zorlayan kuvvetlerin neden olduğu çatlama, kenetlenme boyunun yetersiz olması nedeni ile Şekil 3.8’de

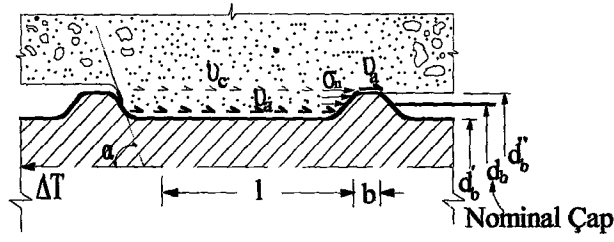
gösterildiği gibi meydana gelir. Bu tür bir çatlama, donatı çubuklarının konumuna ve beton örtü kalınlığına göre elemanın alt veya yan yüzünde gözlenir. Şayet donatı üstte ise, çatlak üst yüzde de görülür. Bu çatlakların nihai yük durumunda ulaştıkları konum, betonarme elemanın göçüşü ile sonuçlanmaktadır. Söz konusu göçüş, ileride de belirtileceği gibi, nervürlü donatı kullanılması durumunda beton ile donatı arasındaki bağ ve etkileşim sonucu oluşan gerilmelerden dolayı sıyrılma veya yarıma şeklinde meydana gelmektedir.



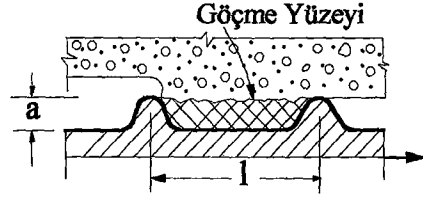
Şekil 3.8 Aderans nedeni ile oluşabilecek çatlaklar

#### 3.4.1 Aderansta Göçme Mekanizmaları (Sıyrılma ve yarıma)

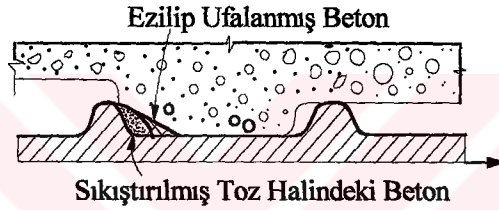
Aderansı geliştirilmiş yüksek mukavemetli donatı çubuğu kullanılması durumunda beton ile donatı arasındaki bağ ve etkileşim ile ilgili olarak oluşan gerilmeler söz konusudur. Nervürlü çubuğun komşu iki dişi arasında sağlanan aderans direnci, bölgesel seviyede, kimyasal adezyon nedeniyle çubuk yüzeyinde 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 ( $\sigma_n$ ) bağlıdır (Şekil 3.9a).



a) İki komşu nervür arasında oluşan gerilmeler



b) Nervürlerde kesme sıyrılması göçme modu



c) Bölgesel ezilme ile betonun yarılması sonucu oluşan göçme

Şekil 3.9 Nervürlü çubuğun iki çıkıntısı arasındaki bölgesel davranış (Park ve Paulay, 1975)

Rehm (1961), aderans probleminin birçok yönlerinin dişler arası uzaklık ( $l$ ) ile diş yüksekliği ( $a$ ) oranı geometrik parametresine göre ele alınabileceğini göstermiştir. Park ve Paulay (1975), Rehm' in bulguları ışığında ve  $l/a$  değerine göre aderans göçüşünü veren iki türlü mekanizmayı önermişlerdir (Karakoç, 1985).

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 3.9b'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 yarılma 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 3.9c). 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 yarıması sonucu, aderans göçmesi oluşur.

Bunun yanında, söz konusu bu kamanın üst yüzeyi boyunca sıyrılma olabileceğinden yarıma çatlağı oluşabilmesi için Şekil 3.9a' da gösterilen  $\alpha$  açısının  $40^\circ$  den büyük olması koşulunun sağlanması zorunludur (Park ve Paulay, 1975).

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.

### 3.4.2 Aderans Mekanizmaları

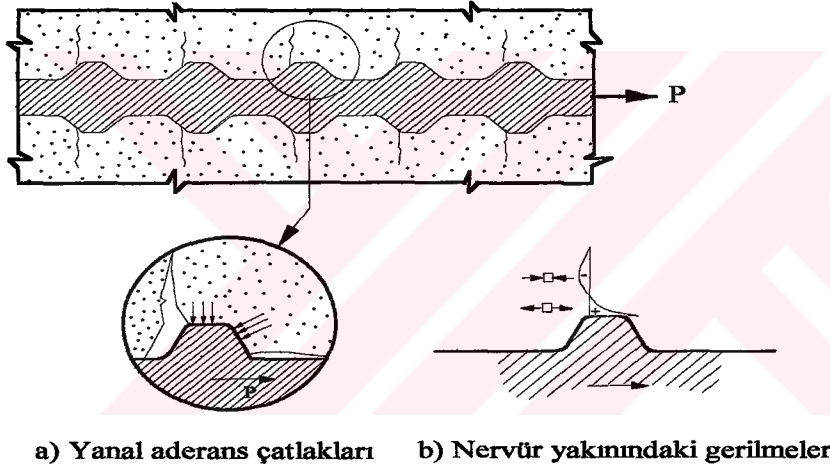
Aderans mekanizmaları sırasıyla, donatı ile beton arasındaki bağı sağlayan kimyasal yapışmanın çözülmesi ve sonuçta donatının betondan sıyrılması ile meydana gelir.

Kimyasal adezyon, nervürlü çubuk kullanılması durumunda ortalama aderans gerilmesinin çok küçük değerlerinde kaymaya karşı koyan tek mekanizma olmaktadır. Kimyasal adezyon nedeniyle beton, aralarında relatif bir kayma olmaksızın veya ihmal edilecek bir kayma olacak şekilde çelikle aynı deformasyonu yapar. Kimyasal adezyonun göçmesine neden olan aderans gerilmesi, Mikhailov ve Taylor-Broms' a göre  $0.5 - 1.5 \text{ N/mm}^2$  arasında olmaktadır (Gambarova ve Karakoç, 1981).

Kimyasal adezyon, ortalama aderans gerilmesinin artan değerlerinde nervürlerin kamalama etkisi oluşturan davranışı nedeniyle göçmeye başlamaktadır. Bu arada

nervürlerin kamalama etkisi sonucu beton, kayarak çubuktan sıyrılma durumuna gelmektedir (Şekil 3.10a)

Kimyasal adezyonun çöküşünden sonraki mekanizma çubuk nervürleri ile beton arasındaki etkileşimden doğmaktadır. Bu etkileşim, nervürlerin altında büyük basınç gerilmeleri ve hemen üstünde ise, enlemesine çatlakların açılmasına neden olan yüksek yerel çekme gerilmelerini meydana getirmektedir (Şekil 3.10b). Bu etkileşim sonucu oluşan ilk çatlaklar, çubuk yakınındaki gerilme durumuna büyük çapta bağlı olarak ve normal basınç uygulanmadığı durumlarda, kayma gerilmesinin  $0.5f_{ct}$  ile  $0.8f_{ct}$  arasında olan değere ulaşmasıyla hızla büyümeye başlamaktadır (Karakoç, 1985).



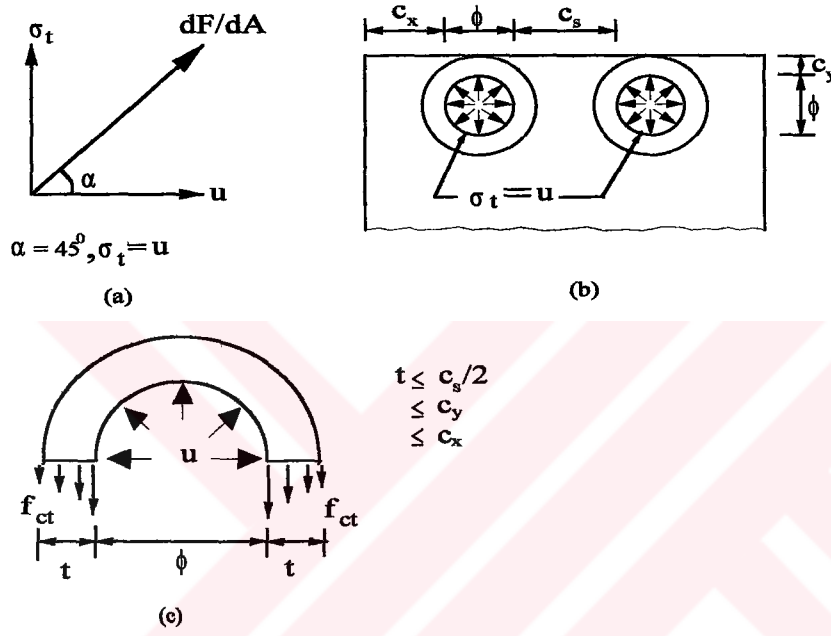
Şekil 3.10 Kimyasal adezyon çöküşünden sonraki mekanizma (Karakoç, 1985)

İlk çatlamadan sonra beton dayanımını azaltan ve kaymayı arttıran enine çatlaklar, nervürlerin önünde ezilmiş durumda ve üçgen bir şekil almış olan parçalanmış beton ile birlikte nervürlü çubukların, etrafını saran beton karşısındaki kama etkisi gösteren davranışlarını arttırıcı bir etki oluşturmaktadır (Şekil 3.9c). Bu kamalama davranışı sonucu, çubuğun etrafındaki beton tabakasında oluşan halka gerilmeleri, çubuk gerilmelerini içine alan düzlemlerde uzunlamasına olarak yer alan yerel yarıma çatlaklarının başlamasına neden olmaktadır (Şekil 3.11 ).



### 3.5 Aderans Kırılmasının (Yarılma) Mekanîği

Aderans göçüşünün, yarılma ile olması için, kullanılan donatının nervürlü olması,  $l/a$  oranının 10' dan büyük olması ve  $\alpha$  açısının  $40^\circ$  den büyük olması şartlarının sağlanması gerekir (Şekil 3.9).



Şekil 3.13 Yarılma kırılmasının modellenmesinde “iç basınçlı boru analogisi” (Ersoy ve Atımtay, 1975)

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 3.13a). Donatıya dik bileşeni, yarılma gerilmesi, paralel olan ise klasik aderans gerilmesidir. Betona uygulanan dış kuvvetlerinin eğimi genelde  $45^\circ$  dolaylarındadır. Bu sebeple,  $\sigma_t = u$  varsayımı yapılabilir.

$\sigma_t$  gerilmesi, iç basınç etkisi altındaki bir borunun iç basınç şiddetine eşittir. Kamalama kuvvetlerinin bu radyal bileşkeleri ( $\sigma_t$ ), boru olarak düşünebileceğimiz beton örtü tabakasına basınç kuvvetleri şeklinde etkir (Şekil 3.13b). Bu beton örtünün

(borunun) birimleri olarak tasarlanabilecek beton halkalarda ise, çekme gerilmeleri oluşur (Şekil 3.13c). Yarıлма olarak adlandırılan kırılma, betonda oluşan bu çekme gerilmelerinin, betonun çekme dayanımını aşması sonucu oluşur ve ana donatı boyunca çatlama şeklinde görülür. Yarıлма çatlaklarının tüm çubuk eksenini boyunca yayılmaları ile sonuçlanan bu göçüş ani ve tahripkar olmaktadır.

Bu tür kırılmanın modellenmesinde uygun görülen “iç basınçlı boru analojisi” 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 3.13b). 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  $t = c_s/2$  olarak alınmalıdır. Yani boru et kalınlığı  $c_s/2$ ,  $c_x$  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.

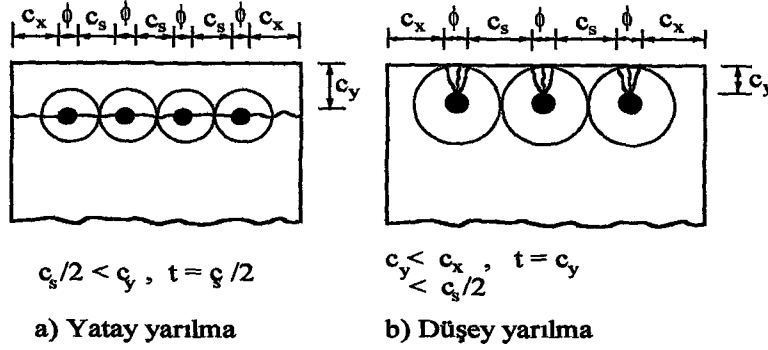
$u$  iç basıncı etkisinde, kalın çeperli bir silindirde oluşan maksimum ve minimum çekme gerilmelerinin ortalaması, Şekil 3.13c’ den faydalanarak Denklem (3.3) ile ifade edilebilir.

$$f_{ct} = \frac{ur_1}{\left(\frac{r_2}{r_1}\right)r_2 - r_1} \left(1,5 + 0,5 \frac{r_2^2}{r_1^2}\right) \quad (3.3)$$

Burada  $r_1$ , boru iç yarıçapını ( $r_1 = \phi/2$ ),  $r_2$  dış yarıçapını ( $r_2 = \phi/2 + t$ ) göstermektedir (Ersoy ve Atımtay, 1975).

Çekmeye maruz aderansı geliştirilmiş donatının betondan sıyrılması ve yukarıda bahsedilen şartlar gözönüne alındığında, betonarme bir kirişte aderans nedeni ile meydana gelecek yarıłmanın, donatı sıklığına bağlı olarak değişeceği açıktır. Bu durumda yarıłma, donatı dizisi düzeyinde yatay bir düzlemde veya donatı çubuklarının beton örtüyü yırtması ile düşey bir düzlemde oluşabilir (Şekil 3.14a, b). Yarıłmanın nasıl olacağı  $c_s/c_y$  oranına bağlıdır. Yani,  $c_s/c_y > 2.0$  olduğunda yatay yarıłma,  $c_s/c_y < 2.0$  olduğunda ise, düşey yarıłma (beton örtünün yırtılması) meydana

gelir. Prof. Ferguson' un deneyleri bu yargının doğruluğunu kanıtlamaktadır (Ersoy, 1985).



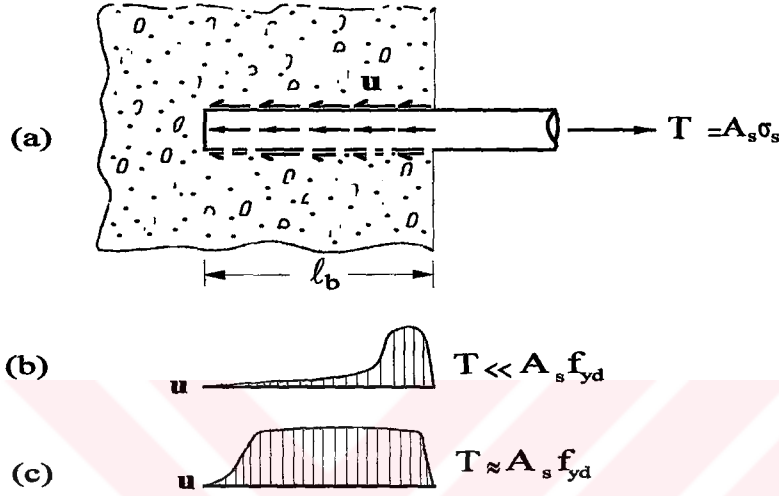
Şekil 3.14 Yarıma çatlıkları (Ersoy, 1985)

### 3.6 Kenetlenme

Bu çalışma konusuyla az da olsa, alakalı olan kenetlenme, beton örtünün yarıması ile beraber çubuğun sıyrılması sonucu elde edilecek test sonuçlarına dayanan çekip-çıkarma deneyleri ile değerlendirilebilir. Betonarme bir elemandaki donatı, beton kütle içine yeterli uzunlukta gömülmüşse, çubuğu çekip çıkartmak mümkün olmaz. Gömülme boyunun yeterli olmadığı durumlarda ise, çubuk yüzeyinin geometrisine bağlı olarak çubuk sıyrılıp çıkabilir veya beton kütleyle yarabilir. Çubuğun betona gömülü uzunluğuna “kenetlenme boyu” ve bu tür aderansa da “kenetlenme aderansı” denir. Kenetlenme boyunun yeterli olabilmesi için, donatı akma gerilmesine ulaştığında çubuk betondan sıyrılmamalı ve betonu yarmamalıdır.

Şekil 3.15a'daki beton kütleyle gömülü olan çubuğa kenetlenme boyunca etkiyen (u) bağ kuvvetleri, uygulanan (T) çekme kuvvetini dengelemek durumundadır. Yeterli kenetlenmenin sağlanması için  $\sigma_s = f_{yd}$  olduğunda, çubuk çevresinde oluşan bağ kuvvetlerinin toplamının çekme kuvvetine eşit olması gerekir ( $\Sigma u = A_s f_{yd}$ ). 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 ile temel kenetlenme boyu arasındaki ilişkiyi yaklaşık olarak saptayabilmek için, aderans gerilmelerinin, kenetlenme boyunca düzgün bir şekilde yayıldığı varsayılarak donatı çubuğu dengesinden elde edilir (Ersoy, 1985).



Şekil 3.15 Betona gömülü donatı çubuğunda kenetlenme boyunca etkiyen aderans gerilmeleri

$$\sum u = T$$

$$u(\pi\phi)\ell_b = A_s f_{yd}$$

$$u\pi\phi\ell_b = \frac{\pi\phi^2}{4} f_{yd}$$

$$\ell_b = \frac{\phi f_{yd}}{4u} \quad (3.4)$$

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 (Schießl, 1975).

Yine bir çalışmada, donatı çubuğunun nispi nervür alanının artmasıyla, belirli bir kayma değeri için oluşacak aderans gerilmelerinin aynı oranda arttığı gözlenmiştir (Martin, 1973).

Ayrıca, kenetlenmiş çubuktaki enine basınç ve beton örtüsünün artması, donatı çubuğunun sarılmasının artmasıyla, aderans kapasitesini arttıracak aşıkardır. Çünkü, beton örtünün 1φ'den 2φ'ye veya 2φ'den 3φ'ye artmasıyla aderans mukavemeti artışı %15 civarında olmaktadır. (Eligehausen vd, 1989).

### 3.6.1 Çubuklarda Kenetlenme İçin CEB-FIP MC 90'nın Şartları

CEB-FIP Model Code 1990'da, Denklem (3.4)'deki (u)'yu, beton çekme mukavemetinin ( $f_{ctd}$ ) dizayn değerinin bir fonksiyonu olarak tanımlar:

$$u = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ctd} \quad (3.5)$$

Beton çekme mukavemeti, beton basınç mukavemetinin bir fonksiyonu olarak tanımlandığından dolayı  $f_{ctd} = k f_c'^{2/3}$ , dizayn aderans gerilmesi de  $f_c'^{2/3}$  ile orantılıdır. Bu yöntemde, beton mukavemetinin aderans üzerindeki etkisi fazlasıyla önemlidir. Çünkü, ekleme dayanımı, sadece  $\sqrt{f_c'}$ 'ye oranla artar (Eligehausen, 1979).

CEB-FIP Model Code 1990,  $\eta_1=1.0$  (düz yüzeyli çubuklar),  $\eta_1=1.4$  (çentikli çubuklar) ve  $\eta_1=2.25$  (nervürlü çubuklar) değerlerini esas alır.

Kenetlenmiş çubukların mukavemetine etki eden önemli diğer bir parametre ise, beton döküm esnasında, çubukların pozisyonudur. CEB-FIP MC 90, betonlama esnasında yatay eksen ile 45°-90° veya 45° den daha fazla açıya sahip olan fakat alttan 250 mm ve beton tabakasının üstünden en azından 300 mm'ye kadar yerleştirilen ve aderans bakımından iyi durumda olan çubukları dikkate alır. Söz konusu durumda  $\eta_2=1.0$  alınır. Diğer durumlarda  $\eta_2=0.7$  alınarak %30 azaltılır.

$\eta_3$ , çubuk çapına göre belirlenir. 32 mm' den daha küçük çubuklar için  $\eta_3=1.0$  alınır. Eğer  $\phi>32$  mm ise,  $\eta_3 = (132 - \phi)/100$  olarak alınır.

Temel kenetlenme boyu, kancalı veya fiyonglu çubukların ( $\alpha_1$ ), enine kaynaklanmış çubukların ( $\alpha_3$ ), betonun veya enine donatının oluşturduğu sargının ( $\alpha_4$ ), yarıлма düzlemine olan enine basıncın ( $\alpha_5$ ) ve gerekli ( $A_{sd}$ ) ve mevcut donatı ( $A_{s,m}$ ) miktarındaki farkın, yararlı etkileri dikkate alınarak azaltılabilir. Bu etkiler gözönünde bulundurularak elde edilen uzunluk, “dizayn kenetlenme boyu” olarak adlandırılır:

$$\ell_{b,net} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \ell_b \frac{A_{s,d}}{A_{s,m}} \geq \ell_{b,min} \quad (3.6)$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  ve  $\alpha_5$  katsayıları, kenetlenme tipi, beton örtüsüne, enine donatı veya enine basınç ile sağlanan sargı durumuna ve çekme ve basınç çubuğu olması gibi faktörlere bağlı olarak değerler almaktadır. Bu katsayılar, 0.7 ile 1.0 arasında değişmektedir. Örneğin, temel kenetlenme boyu, düz kenetlenmiş çubuklar için  $\alpha_1=1.0$  katsayısı ile çarpılır. Kanca düzlemine dik beton örtünün dökülmesini önlemek için etkili bir şekilde betona sarılan çekmeye maruz kıvrımlar veya kancalı çubuklar için ise,  $\alpha_1=0.7$  alınabilir. Bununla beraber, eğer kanca veya kıvrım betona yeterince sarılı değilse, kenetlenme boyunun azaltılmasına müsaade edilmez ve  $\alpha_1=1.0$  alınır.  $\alpha_3 \alpha_4 \alpha_5$  çarpımı, yüksek aderanslı çubuklar için 0.7 ve düz, çentikli çubuklar veya pratik olarak sadece nervürlü çubuklar için uygulanabilir olan azaltma faktörü sargı teller için ise, 1.0 ile sınırlandırılır (Eligehausen and Balazs, 1980).

Dizayn kenetlenme uzunluğu ile ilgili sınırlamalar,  $\ell_{b,min}$  gerektirir:

$$\text{çekmeye maruz çubuklar için, } \ell_{b,min} < \max[0.3\ell_b, 10d_b, 100mm] \quad (3.7)$$

$$\text{basınca maruz çubuklar için, } \ell_{b,min} < \max[0.6\ell_b, 10d_b, 100mm] \quad (3.8)$$

### 3.6.2 Çubuklarda Kenetlenme İçin TS 500'ün Şartları

TS 500' de ise, temel kenetlenme boyu, donatı çubuğunun yüzey geometrisine ve betonlama esnasındaki konumuna göre belirlenmektedir. Donatı için Konum I ve Konum II olmak üzere iki ayrı konum tanımlanmaktadır. Konum II, betonlama sırasında eğimi yatayla 45°-90° arasında olan çubuklar ile daha az eğimli veya yatay olup da kesitin alt yarısında veya kesitin serbest yüzünden 300 mm uzaklıkta yer alan çubukları kapsar. Konum I ise, Konum II' de olmayan tüm çubukları kapsar.

#### 3.6.2.1 Çekme Donatısının Kenetlenmesi

Herhangi bir betonarme kesitinde, donatının öngörülen çekme veya basınç gerilmesini güvenle taşıyabilmesi için her iki yönde yeterli kenetlenme boyuna sahip olması gereklidir. Kenetlenme, düz kenetlenme ile, manşon ve benzeri mekanik bağlantılarla veya kanca ile sağlanabilir.

##### 3.6.2.1.1 Düz Kenetlenme

Kenetlenme, donatının gereksinme duyulmayan noktadan düz olarak  $\ell_b$  kadar uzatılması ile sağlanabilir. Kenetlenme boyu olarak tanımlanan bu boy, nervürlü çubuklar için aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmalıdır.

$$\ell_b = 0.12 \frac{f_{yd}}{f_{ctd}} \phi \geq 20\phi \quad (3.9)$$

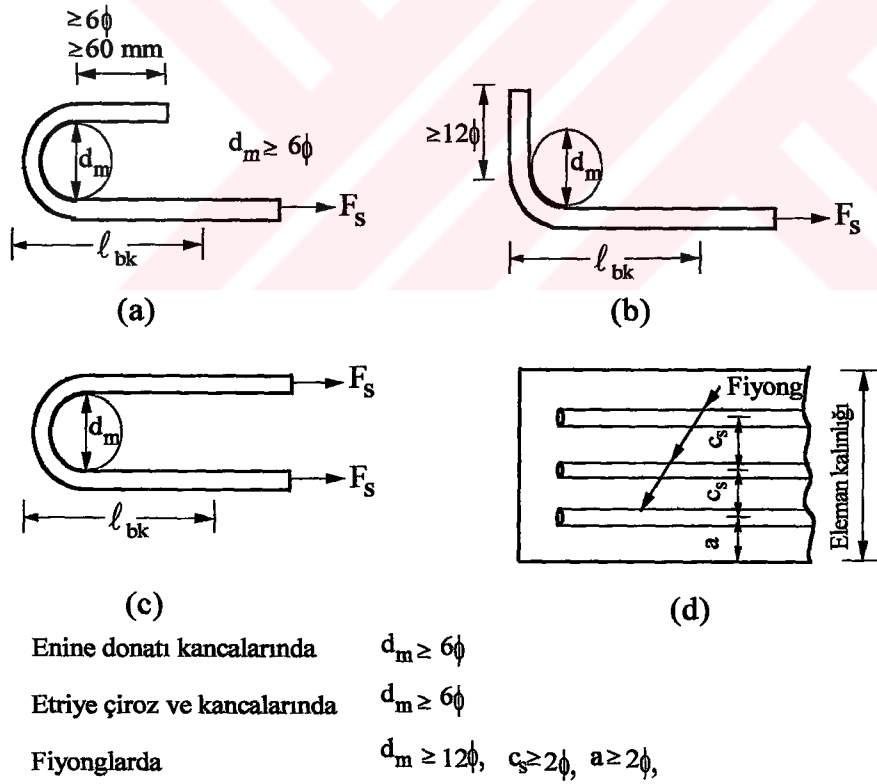
Düz yüzeyli çubuklarda bu değerin iki katı kullanılmalıdır.

Donatı çapının  $32 \text{ mm} < \phi \leq 40 \text{ mm}$  arasında olduğu durumlarda yukarıdaki denklemlerden hesaplanan kenetlenme boyu,  $100/(132-\phi)$  ile çarpılarak büyütülür. Konum I' deki çubuklar için, Denklem (3.9)' dan elde edilen kenetlenme boyu, 1.4 ile çarpılmalıdır.

Kesitteki donatının, hesaplanan gerekli donatıdan fazla olduğu durumlarda, Denklem (3.9) ile belirlenen kenetlenme boyları, gerekli donatı alanının, mevcut donatı alanına oranı ile çarpılarak azaltılabilir. Ancak, bu azaltma ile bulunan kenetlenme boyu, Denklem (3.9)'dan bulunan boyun  $\frac{1}{2}$ 'sinden ve  $20\phi$ 'den az olamaz. Düz kenetlenmeye ancak nervürlü çubuklarda izin verilir.

### 3.6.2.1.2 Kanca ve Fiyongla Kenetlenme

Donatının ucu bükülerek kanca veya fiyong yapılıyorsa gerekli kenetlenme boyu azaltılabilir. Şekil 3.16'da gösterilen standart kancaların bulunduğu durumlarda, kenetlenme boyu  $\ell_{bk}$  Denklem (3.9)'dan bulunacak değerin  $\frac{3}{4}$ 'ü kadar alınabilir.



Şekil 3.16 Standart kanca ve fiyonglar (TS 500, 2000)

### 3.6.2.1.3 Kaynaklı Enine Çubukla Kenetlenme

Gerekli kenetlenme boyu çubuğa kaynaklanmış enine çubuklar ile sağlanabilir. Nokta kaynaklı hasır çeliklerde bu tür kenetlenme yaygın olarak kullanılır.

### 3.6.2.1.4 Mekanik Kenetlenme

Özel durumlarda kenetlenme, donatı ucuna kaynaklanan veya vidalanan plaklarla da sağlanabilir. Bu gibi durumlarda öngörülen düzenleme, bir laboratuvar da denenmeli ve projede kullanılacak çubuk hesap kuvveti, kırılma yükünün %70'ini geçmemelidir. Bu tür kenetlenmenin kullanılabilmesi için özel izin gereklidir.

### 3.6.2.2 Basınç Donatısının Kenetlenmesi

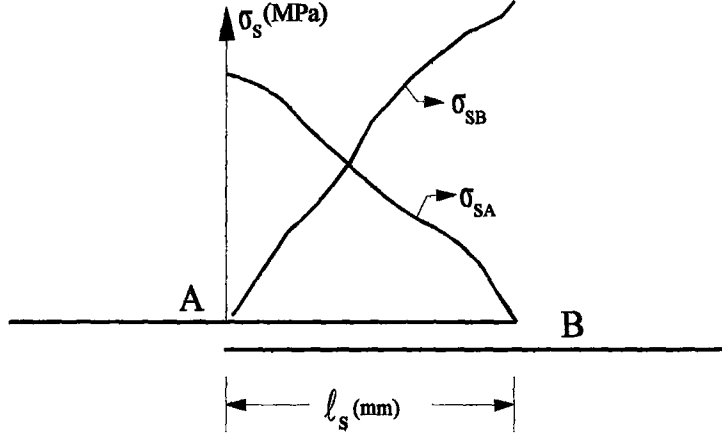
Basınç donatısına kanca yapılamaz. Donatı çubuğu bütün yük düzenlemeleri altında basınca çalışıyorsa, kenetlenme boyu Denklem (3.9)'dan hesaplanan değerin  $\frac{3}{4}$ 'üne kadar azaltılabilir.

## 3.7 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”  $\ell_b$ ’ye göre belirlenir.



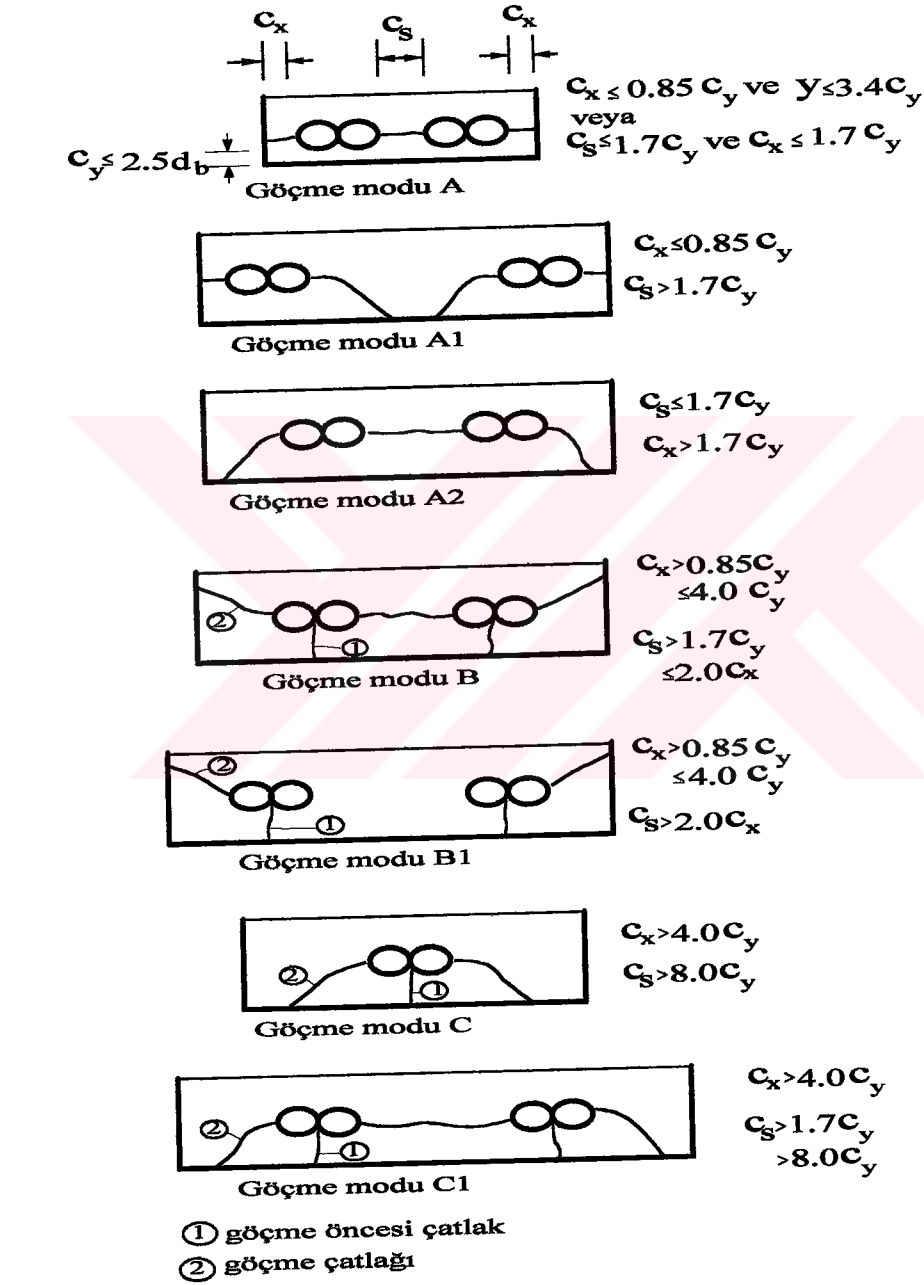
**Şekil 3.17** Bindirmeli eklemelerde çubuklardaki gerilmelerin birinden diğerine aktarılması (Ersoy, 1985)

Eklenmiş çubuklarda meydana gelen gerilmeler sonucu, olası yarılma çatlak modelleri Şekil 3.18’de gösterilmektedir. Şekil 3.19’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.

Ayrıca donatı çubuk gerilmesi, beton basınç mukavemeti, 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 (Eligehausen, 1979). 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.

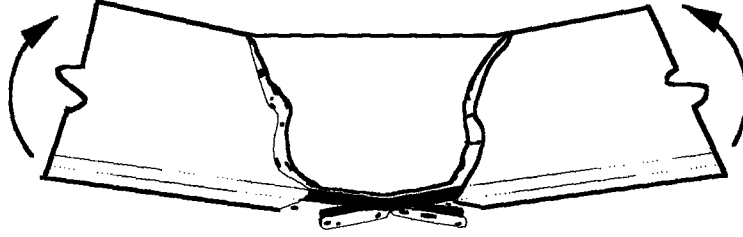
Kenetlenme davranışı ve uzunluğu ile ekleme davranışı ve uzunluğunu farklı kabul edilmektedir (Orangun ve diğ., 1977). Bununla beraber, CEB-FIP MC90'da kenetlenme uzunluğu ile ekleme uzunluğu aynı kabul edilmektedirler.



Bindirmeli Ekli Kirişlerde Göçme modları

Şekil 3.18 Eklenmiş çubukların yarıılma çatlak modelleri (Eligehausen, 1979)

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 3.19** Eğilmeye maruz bir elemanda çubuk rijitliği sebebiyle beton örtünün göçmesi (Eligehausen, 1979)

Bindirmeli eklemelerin, bindirme boyunca etriye ile sarılması son derece yararlı olacaktır. Bu tür etriyeler betonu sararak yarılmaya karşı dayanımı artırmalarının yanı sıra, özellikle büyük çaplı donatı durumunda, Şekil 3.19 'da gösterildiği gibi, rijit cisim dönmesi sonucu betonun yırtılmasını da önler (Ersoy, 1985).

### 3.7.1 Bindirmeli Ekli Çubuklar İçin CEB-FIP MC 90'nın Şartları

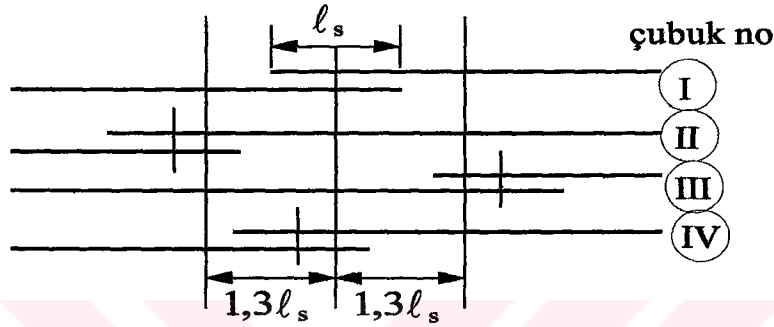
Bindirmeli eklemeler, kenetlenme boyu gibi hemen hemen aynı faktörlerden etkilendiğinden dolayı CEB-FIP Model Code 1990, dizayn bindirme uzunluğu ( $\ell_s$ ) için dizayn kenetlenme boyu olan Denklem (3.6)'nın benzerini kullanmaktadır:

$$\ell_s = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6 \ell_b \frac{A_{s,d}}{A_{s,m}} \geq \ell_{s,min} \quad (3.10)$$

$\ell_b$ , Denklem (3.4)'den hesaplanabilir.  $\alpha_4$ 'ün hesabı için  $\sum A_{st,min}$ , bir tane eklenmiş çubuğun alanı olan  $A_s$  olarak alınmalıdır. Gerekli minimum bindirme uzunluğu ise,

$$\ell_{s,\min} = \max[0.3\alpha_6\ell_b, 15\phi, 200\text{ mm}] \quad (3.11)$$

olarak alınır. Denklem (3.11), Denklem (3.6)'dan fazla olarak, bindirme uzunluğunun merkezinden ve her iki taraftan ölçülen  $1.3\ell_s$  mesafe içindeki bindirilmiş donatı yüzdesini hesaba katan  $\alpha_6$  faktörünü dikkate alır.



Şekil 3.20 Aynı bölgede şaşırtmalı eklenmiş çubukların yüzdesi (CEB-FIP MC, 1990)

Şekil 3.20'deki, I nolu çubuğun bindirme uzunluğunu dizayn eden yüzde değeri (%) tayin etmek gerekirse; II ve III nolu çubuklar, ekleme bölgesi dışıdır fakat IV nolu çubuk,  $1.3\ell_s$  mesafesi içindedir. Bu sebeple, yüzde değeri,  $50\alpha_6$  ise, 1.8 olur. Tablo 3.1'de, bir kesitteki bindirme bölgesi içinde bulunan donatı yüzde (%) değerlerine karşılık gelen ( $\alpha_6$ ) katsayıları verilmiştir.

Basınç etkisinde olan eklemelerin dizayn bindirme uzunluğu  $\ell_s > \ell_b$  olmalıdır.

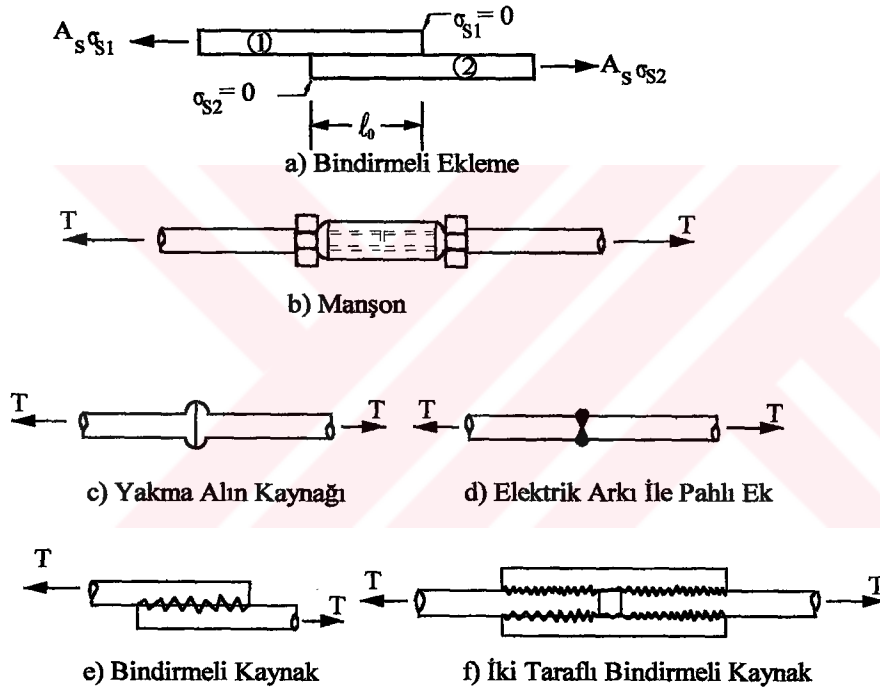
Tablo 3.1 Bir kesitteki bindirme bölgesi içinde bulunan donatı yüzdesine (%) bağlı  $\alpha_6$  katsayıları

| %          | $\leq 20$ | 25  | 33  | 50  | $> 50$ |
|------------|-----------|-----|-----|-----|--------|
| $\alpha_6$ | 1.2       | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2.0    |

### 3.7.2 Bindirmeli Ekli Çubuklar İçin TS 500'ün Şartları

TS 500, beton donatısının eklenmesi için, bindirmeli eklem ve mekanik eklem (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 3.21b).



Şekil 3.21 Bindirmeli eklem türleri (Ersoy, 1985)

Kaynaklı eklerde bu konuda denenmiş iş gücü kullanılmalı ve donatıya uygulanacak kaynaklama için mümkün olduğunca Şekil 3.21c ve d'de gösterilen türler kullanılmamalıdır. Şekil 3.21e 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 3.21a). Bireysel çubuklardan oluşan bindirmeli eklerde, iki çubuk arasındaki uzaklık hiçbir zaman  $4\phi$ 'yi geçmemelidir. Aynı kesitteki iki bindirme ekinin arasındaki serbest uzaklık en az  $2\phi$  veya 20 mm olmalıdır.

Birden fazla çubuğun ek yapılması gerekliliğinde, ekler mümkün olduğu kadar şaşırtılarak yapılmalıdır (Şekil 3.20). İki ek arasında eleman ekseni boyunca ölçülen uzaklık  $1.5\ell_s$  veya daha büyük olursa, ek şaşırtılmış varsayılabilir.

### 3.7.2.1 Çekme Donatısının Eklenmesi

Bindirmeli eklerde bindirme boyu  $\ell_s$ , Denklem (3.12)'den hesaplanır.

$$\ell_s = \alpha_1 \ell_b \quad (3.12)$$

$$\alpha_1 = 1 + 0.5r$$

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

Bindirmeli ek yapılan çubukların uçları kancalı ise, bindirme boyu Denklem (3.12)'den 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  $\frac{1}{3}$ 'ü veya  $\phi 8$  olmalıdır. Bindirme boyunca en az 6 sargı donatısı bulundurulmalı ve sargı donatısı aralığı eleman yüksekliğinin  $\frac{1}{4}$ '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 metalurjik analizi yapılmalı ve çeliğin özellikle karbon içeriği açısından kaynaklamaya uygun olduğu kanıtlanmalıdır. Kaynaklı ekler TS 708' e uygun olarak yapılmalıdır.

### 3.7.2.2 Basınç Donatısının Eklenmesi

Bindirmeli eklerde bindirme boyu, Denklem (3.9)' 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.

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

## 4. KULLANIM YÜKLERİ ALTINDA ADERANS HESABI

### 4.1 Giriş

20. y.y.'ın başlarından itibaren ortalama aderans dayanımının ve kenetlenme boyunun saptanmasında çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, daha çok kenetlenme ve ekleme boyunun belirlenmesinde önemli gelişmeler sağlamıştır. Kullanılan deney türlerinin sadece relatif 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

Bölüm 3.3'te belirtildiği gibi, 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 noktalı 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 yarıma 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 ( $\sigma_s$ ) 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:

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

Denklem (4.1) ile deneylerden elde edilen datalar kullanılarak ortalama aderans dayanımı belirlenir. Bu değerler ise, gerçek aderans dayanımının tayininde gerekli olan ampirik denklemin elde edilmesinde kullanılır.

#### 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 (Celep ve Kumbasar, 1996).

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 4.1a)
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 Tek Donatılı Betonarme Elemanların Çözümlemesi

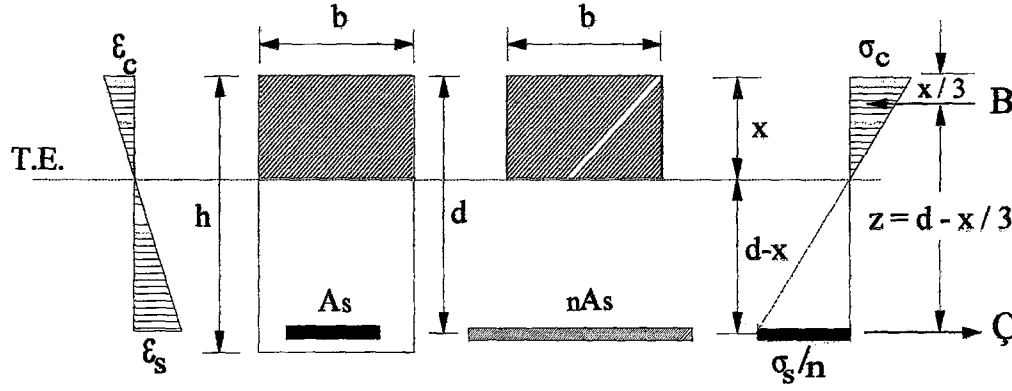
Kesit, sadece basit eğilmeye maruz bırakıldığında, tarafsız eksen, kesiti basınç ve çekme bölgelerine ayırır (Şekil 4.1). Kesitteki basınç kuvveti, tamamen beton gerilmeleri veya betondaki gerilmelerin kombinezonundan ve mevcutsa basınç donatısından oluşur. Çekme kuvveti ise, bütünüyle çekme donatısında meydana gelen gerilmelerden kaynaklanır. Bu tür kesitlerin analizini yapmak için, denge ve uygunluk bağıntılarından faydalanılabilir (Şekil 4.1d).

Şekil 4.1d'deki kesite etkiyen çekme ve basınç kuvvetleri, basit eğilme durumunda birbirine eşittir. Dolayısıyla,

$$B = \zeta$$

$$0.5\sigma_c bx = \sigma_s A_s$$

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_s} = \frac{2A_s}{bx} \quad (4.1)$$



a)şekil değıştirme b)gerçek kesit c)dönüştürölmüş kesit d)gerilmeler

**Şekil 4.1** Basit eğilmeye maruz tek donatılı tamamen çatlamış kesite ait şekil değıştirme ve gerilme durumları

olur.  $\sigma_c / \sigma_s$  için ikinci bir ifade, uygunluk bağıntısı olarak bilinen Şekil 4.1a'daki şekil değıştirmelerin orantılı olduğı yazılarak elde edilir; Hooke kanunundan,  $\varepsilon_c = \sigma_c / E_c$  ve  $\varepsilon_s = \sigma_s / E_s$  ve elastik hesap yönteminde  $E_s / E_c = n$  olarak kabul edilir:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_s / n} = \frac{x}{d - x}$$

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_s} = \frac{x}{n(d - x)} \quad (4.2)$$

Denklem (4.1) ve Denklem (4.2)'nin sol tarafları eşit olduğundan, sağ tarafları da birbirine eşittir. Yani,

$$\frac{x}{n(d - x)} = \frac{2A_s}{bx}$$

$$bx^2 + 2nA_s(x - d) = 0 \quad (4.3)$$

$x$  tarafsız eksen derinliğini veren 2. dereceden denklem yazılabilir. Tarafsız eksen derinliği Denklem (4.3) yardımıyla bulunduktan sonra, Şekil 4.1d'den çekme donatısına göre moment alınarak  $\sigma_c$  bulunur:

$$Bz = M_{\max}$$

$$0.5\sigma_c bx(d - x/3) = M_{\max}$$

$$\sigma_c = \frac{6M_{\max}}{(3bdx - bx^2)} \quad (4.4)$$

$\sigma_c$ , Denklem (4.2)'de yerine konursa; donatıdaki gerilme  $\sigma_s$ , bulunur:

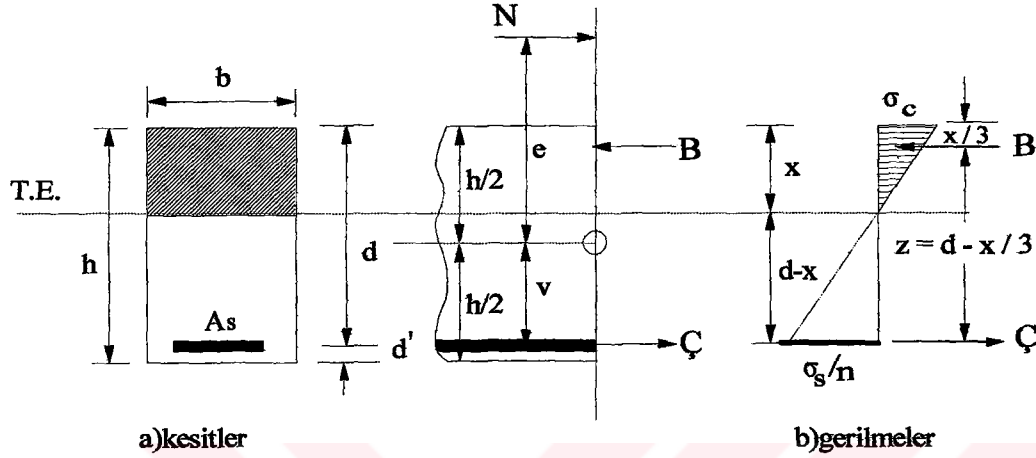
$$\sigma_s = \frac{n\sigma_c(d - x)}{x} \quad (4.5)$$

#### 4.5 Bileşik Eğilme Etkisi Altındaki Tek Donatılı Çatlamış Betonarme Elemanların Çözümlemesi

Bilindiği gibi, eğilme momenti ve eksenel kuvvet, aynı türden gerilme (kesite dik - normal- gerilme) oluşturur. Dolayısıyla, bu iki kesit kuvveti birlikte gözönüne alınabilir ve eğilme ile eksenel yükten oluşan etki, bileşik eğilme olarak tanımlanır. Betonarme yapılar bir bütün olarak çalıştıkları için (monolitik özellik), bu tür yapılarda, bileşik eğilme etkisinde kalan taşıyıcılara çok rastlanır. Bu bileşik etkiyi oluşturan normal kuvvet, çoğu zaman basınçtır (Gündüz, 1978).

Bu bileşik mukavemet halinde kesitin merkezine etkiyen eksenel kuvvetle eğilme momentini kesit merkezi dışında bir başka noktaya tek bir normal kuvvet olarak indirgemek olanağı vardır. Bu nokta, eğilme momentine ait kuvvetler çizgisi üzerinde olup, kesit merkezinden  $e = M / N$  uzaklığındadır. Böylece, kesite etkiyen tek iç kuvvet, artık kesit merkezi dışındaki bir noktadan geçen ve şiddetçe  $N$  eksenel kuvvetine eşit ve kesit eksenine paralel bir tek  $N$  normal kuvvetinden oluşur (Şekil 4.2a). Bu nedenle, eksenel kuvvetli eğilme haline Eksantrik Normal Kuvvet Hali

adı da verilir. Eksantrik normal kuvvetin, tatbik noktasından kesit merkezine olan uzaklığına eksantrik normal kuvvetin eksantrikliği adı verilir. Bu  $e$  eksantrikliği,  $M / N$  oranına göre küçük veya çok büyük değerler alabilir (Kayan, 1992).



Şekil 4.2 Bileşik eğilmeye maruz tek donatılı tamamen çatlamış kesite ait gerilme durumları

Normal kuvvet basınç ise,  $N$  normal kuvvet, kesit merkezinden  $e$  eksantrikliği kadar maksimum basınca çalışan kesit kenarına doğru kayar. Normal kuvvetin çekme olması halinde,  $N$  normal kuvvet, çekme gerilmeleri bölgesine doğru olur.

Ayrıca, büyük normal kuvvet ile küçük momentin bileşkesi, küçük  $e$  eksantrikliğini verir ve gerilme diyagramı yalnız normal kuvvete maruz kesitlerde meydana gelen gerilme diyagramına yakındır. Büyük moment ile küçük normal kuvvetin bileşkesi ise, büyük  $e$  eksantrikliğini verir ve gerilme diyagramı basit eğilme durumundaki gerilme diyagramına yakındır.

Bu çalışmada yapılan deneylerde, kiriş numuneleri,  $e$  eksantrikliği büyük olan yüklemeye maruz bırakıldılar. Bu sebeple, deney numunelerine ait tarafsız eksen derinliği ve gerilmeler, kesit durumu ve gerilme diyagramının gösterildiği Şekil 4.2 esas alınarak, dönüştürülmüş kesit üzerinden denge ve uygunluk denklemleri yazılarak bulunabilir. Öncelikle, kesite etkiyen kuvvetlerin dengede olduğu yazılır:

$$N - B + C = 0$$

$$N = B - \zeta$$

$$N = 0.5\sigma_c bx - \sigma_s A_s \quad (4.6)$$

Şekil 4.2b'den gerilmelerin orantılı olduğu yazılarak,  $\sigma_s$ ,  $\sigma_c$  türünden belirlenir:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_s / n} = \frac{x}{d - x}$$

$$\sigma_s = \frac{n\sigma_c(d - x)}{x} \quad (4.7)$$

Denklem (4.7), Denklem (4.6)'da yerine konulursa,

$$N = \frac{\sigma_c}{2x} [bx^2 - 2nA_s(d - x)] \quad (4.8)$$

bulunur. Şekil 4.2a'daki dengede olan kuvvetlerin çekme donatısına göre momenti yazılırsa,

$$N(e + v) - Bz = 0 \quad (4.9)$$

bağıntısına ulaşılır. Denklem (4.8), Denklem (4.9)'da yerine konulur;  $v = h/2 - d'$ ,  $z = d - x/3$  yazılır ve bağıntı düzenlenerek tarafsız eksen derinliğinin belirleneceği 3. dereceden denklem elde edilir:

$$x^3 + 1.5(2e - h)x^2 + 3nA_s[(2e + h - 2d')/b](x - d) = 0 \quad (4.10)$$

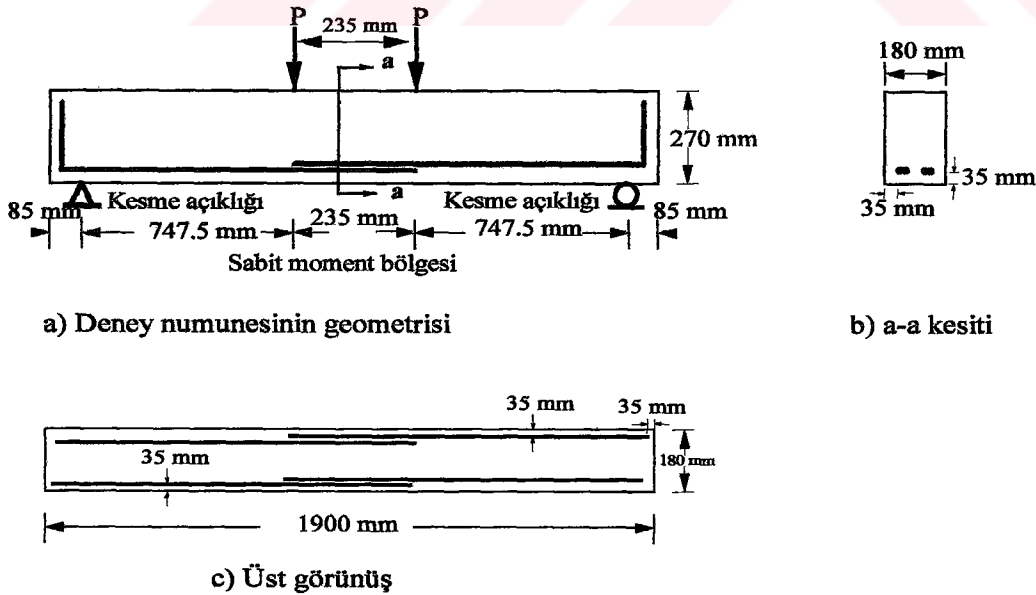
Tarafsız eksen derinliği  $x$ , belirlendikten sonra  $\sigma_c$  gerilmesi, Denklem (4.8)'den bulunur.  $\sigma_c$ , hesaplandıktan sonra  $\sigma_s$  gerilmesi, Denklem (4.7)'den hesap edilir.

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Günümüze kadar yapılan çalışmalarda çoğunlukla aderans dayanımı ile ilgili basit eğilmeye maruz betonarme elemanlar incelenmiştir. Bu sebeple, bu çalışma  $f'_c \geq 30 \text{ N/mm}^2$  betondan üretilmiş, basit ve bileşik eğilmeye maruz kirişlerdeki aderans dayanımının incelenmesini esas almıştır.

### 5.1 Deney Numuneleri

Bu çalışmada, toplam 27 adet büyük boyutlu ve dikdörtgen kesitli kayma donatısız kiriş numunesi test edilmiştir. Deneyler Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Şekil 5.1'de, deney kiriş numunelerine ait geometrik durum, kesit ve görünüş verilmiştir. Her bir kiriş, açıklık ortasında üst üste bindirilmiş çekmeye maruz iki donatı çubuğunun yerleştirilmesiyle tasarlanmıştır. Bindirme uzunluğu, donatı akmaya ulaşmadan önce, bindirme bölgesindeki beton örtüyü yararak, aderans göçmesi olabilecek şekilde seçilmiştir.



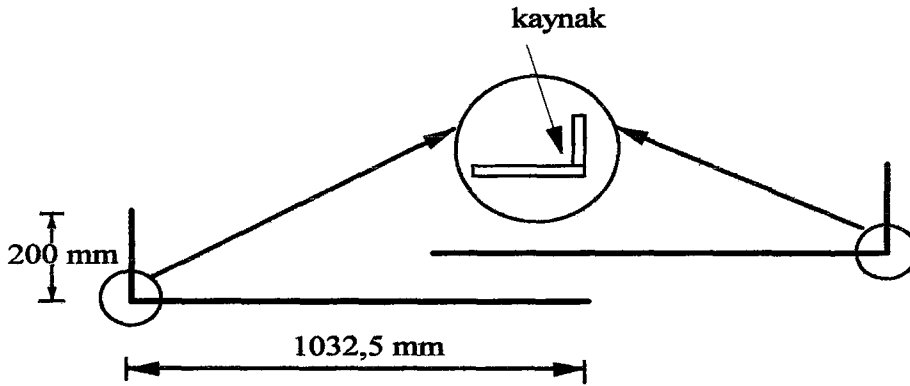
Şekil 5.1 Deney numunelerinin geometrik özellikleri

Deney kiriş numunelerinde çekme donatısı olarak kullanılan farklı çaplardaki çubuklara ait numuneler üzerinde, üniversitemiz Teknik Eğitim Fakültesi Metal Bölümü Laboratuvarı'nda TS 708'e göre çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri sonucunda, donatı çubuklarının, Tablo 5.1'de gösterilen mekanik özelliklere sahip oldukları tespit edilmiştir. Bütün numuneler için, donatı elastisite modülü, 203.000.000 N/mm<sup>2</sup> olarak alınmıştır (ACI 318-89).

**Tablo 5.1** Donatı çubuklarına ait mekaniksel özellikler

| Donatı<br>Tipi | $\phi$<br>(mm) | $A_s$<br>(mm <sup>2</sup> ) | $f_y$<br>(MPa) | $f_{su}$<br>(MPa) | Uzama<br>Yüzdesi |
|----------------|----------------|-----------------------------|----------------|-------------------|------------------|
| BÇ III         | 12             | 113.10                      | 476.48         | 719.97            | 33.7             |
|                | 16             | 201.06                      | 454.63         | 671.63            | 34.3             |
|                | 22             | 380.13                      | 446.13         | 663.18            | 35.8             |

Kiriş numunelerde kullanılan çekme donatılarının detaylandırılması ise, Şekil 5.2'de görüldüğü gibi yapılmıştır. Daha iyi bir kenetlenme sağlamak için, yan kollar ana donatıya alın kaynağı ile sabitleştirilmiştir. Bütün çubuk çapları için, donatıların kalıba yerleştirilmesi çekme bölgesinde bindirmeli ekli olarak gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 5.2** Donatının detayı

Deney numunelerine ait beton, laboratuvar ortamında üretilmiştir. Beton üretiminde çimento olarak Elazığ Atınova Çimento Fabrikası'nda üretilen ve 2 günlük basınç dayanımı 24.6 MPa olan Normal Portland Çimentosu kullanılmıştır. Kiriş deney numunelerinin üretiminde kullanılan çimentonun kimyasal analizi sonucu elde edilen değerler Tablo 5.2' de verilmiştir.

**Tablo 5.2** Beton üretiminde kullanılan çimentonun özellikleri

| Çimento<br>Tipi | Fiziksel<br>Özellikler                     |                                         | Kimyasal Özellikler                        |                                                         |                                                     |                            |                             |                     |
|-----------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------|
|                 |                                            |                                         | Analiz Sonuçları (%)                       |                                                         |                                                     |                            |                             |                     |
|                 | Özgül<br>ağırlığı<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | Özgül<br>yüzey<br>(cm <sup>2</sup> /gr) | Silisyum<br>dioksit<br>(SiO <sub>2</sub> ) | Alüminyum<br>oksit<br>(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | Demir<br>oksit<br>(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | Kalsiyum<br>oksit<br>(CaO) | Magnezyum<br>oksit<br>(MgO) | Tayin<br>edilemeyen |
| PÇ 42.5         | 3.03                                       |                                         | 20.8                                       | 5.21                                                    | 3.67                                                | 61.09                      | 2.23                        | 6.97                |

Beton üretiminde kullanılan agreg, minerolojik olarak nehir kumu niteliğindedir. Agreg maksimum dane çapı 8 mm olarak seçilmiş ve granülometrik dağılımın standarda uygun hale getirilebilmesi için, TS 706'daki sınır eğrilerinden faydalanılmıştır. Maksimum dane çapı küçük seçilerek, hem nervürlü donatı ile beton arasındaki mekanik aderans için mümkün olduğu kadar tam doluluğun hem de betonun kalıba daha iyi yerleşmesinin sağlanması amaçlanmıştır. Elazığ ili, Palu ilçesinden geçen Murat Nehri'nden temin edilen agregaya ait fiziksel, kimyasal ve mekaniksel özellikler Tablo 5.3' te görülmektedir.

**Tablo 5.3** Beton üretiminde kullanılan agregaya ait özellikler

| Agrega<br>türü | Özgül ağırlığı<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | Su emme<br>(%) | Aşınma kaybı<br>(%) | Kil miktarı<br>(%) | Donma kaybı<br>(%) |
|----------------|-----------------------------------------|----------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Nehir kumu     | 2.05                                    | 4              | 16.6                | 2.0                | 1.83               |

Beton karışımına, katkı maddesi olarak çimento ağırlığının %2 si oranında süper akışkanlaştırıcı da katılmış olup, beton mukavemetinde önemli bir faktör olan Su / Çimento oranını büyük ölçüde düşürdüğü görülmüştür. Katkı maddesi, SİKADETEKS Yapı Kimyasalları A.Ş.'den temin edilmiştir. Kahverengi ve sıvı halde olan bu katkı maddesinin yoğunluğu 1.21kg/lt' dir. Bu süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi, aderans açısından da önemli olan beton yoğunluğunu yükseltip, kapalı düzgün yüzey oluşturmaktadır. Ayrıca, klor içermeyen bu katkı maddesi, su geçirmezliği ve dona karşı dayanıklılığı arttırmaktadır. Çimento ağırlığının % 0.8-3'ü oranında kullanılabilir. Bu çalışmada esas alınan katkı maddesi miktarı, 15\*30 cm ön silindir beton numune deneyleri sonucunda belirlenmiştir.

Tablo 5.4'te ise, kiriş deney numunelerinin karışım oranları verilmiştir. Beton basınç mukavemeti, her bir kiriş serisi için dökülen 3'er adet 150\*300 mm'lik standart silindir numuneler üzerinden yapılan testlerle belirlenmiştir. Dökülen silindir numunelerin fazla olması sebebiyle, dayanımlar arasında az da olsa sapmalar görülmüş olup, ortalama beton basınç dayanımı 30.81 N/mm<sup>2</sup> olarak hesap edilmiştir. Beton Elastisite modülünün hesabı için,  $E_c = 4730\sqrt{f'_c}$  (N/mm<sup>2</sup>) formülü kullanılmıştır (ACI 318-89).

**Tablo 5.4 Beton karışım oranları**

| Ortalama Beton Basınç Dayanımı | Çimento | Kum 0-2 (mm) | Kum 2-4 (mm) | Çakıl 4-8 (mm) | Su  | Su/Çimento | Katkı maddesi | Birimler          |
|--------------------------------|---------|--------------|--------------|----------------|-----|------------|---------------|-------------------|
| 30.81 N/mm <sup>2</sup>        | 350     | 943          | 377          | 566            | 116 | 0.33       | 7             | Kg/m <sup>3</sup> |

Kirişler 3'er adet olmak üzere 3 seri halinde ve çelik kalıplar içinde dökülmüştür. Beton, el arabası ile karıldığı yerden taşınarak kalıplara yerleştirilmiştir. Betonlama esnasında bindirmeli ekli donatılar, aderans açısından olumlu bir etkiye sahip olan yatay ve beton üst yüzeyine göre altta olacak şekilde konumlandırılmıştır. Yine döküm esnasında beton, bütün numunelerde vibratörle sıkıştırılmıştır.

Test edilecek olan kiriş numunelerine ait yükseklik ( $h$ ) ve genişlik ( $b$ ) ile birlikte beton basınç mukavemeti ( $f'_c$ ), donatı çapı ( $\phi$ ), çekme donatısı bindirme uzunluğu ( $l_s$ ) ve donatı oranı ( $\rho$ ) gibi detaylar, Tablo 5.5'te verilmiştir.

**Tablo 5.5** Deney numunelerine ait özellikler

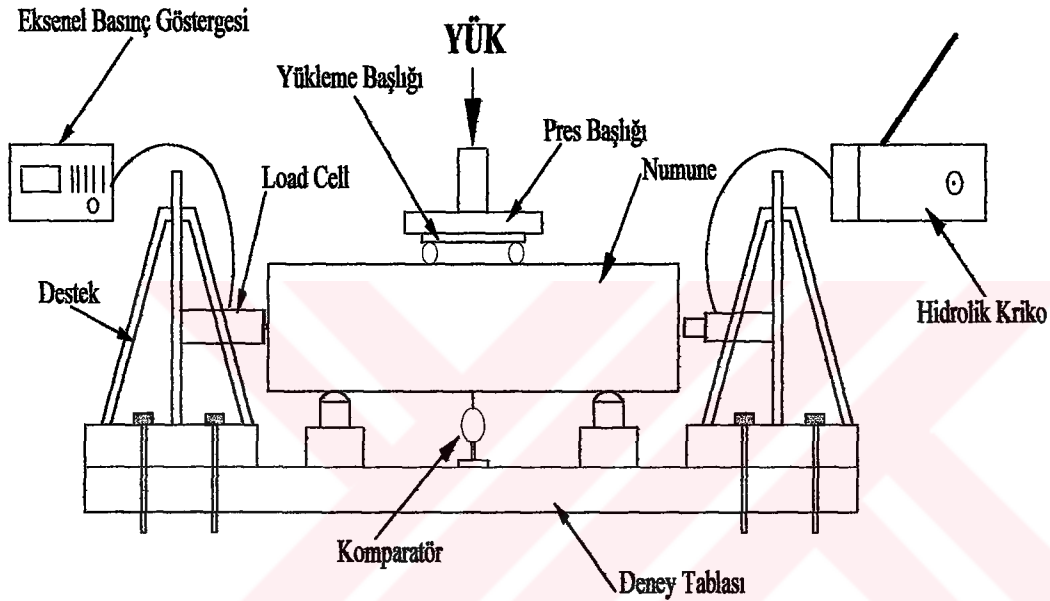
| Numune No      | $f'_c$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\phi$<br>(mm) | $l_s$<br>(mm) | $b$<br>(mm) | $h$<br>(mm) | $\rho$ |
|----------------|--------------------------------|----------------|---------------|-------------|-------------|--------|
| K12. M+(N=0)   | 30.4                           | 12             | 235           | 180         | 270         | 0.0054 |
| K16. M+(N=0)   | 30.1                           | 16             | 235           | 180         | 270         | 0.0095 |
| K22. M+(N=0)   | 30.5                           | 22             | 235           | 180         | 270         | 0.0180 |
| K12. M+(N=7.5) | 32.1                           | 12             | 235           | 180         | 270         | 0.0054 |
| K16. M+(N=8.5) | 32                             | 16             | 235           | 180         | 270         | 0.0095 |
| K22. M+(N=10)  | 30                             | 22             | 235           | 180         | 270         | 0.0180 |
| K12. M+(N=15)  | 31.1                           | 12             | 235           | 180         | 270         | 0.0054 |
| K16. M+(N=17)  | 31                             | 16             | 235           | 180         | 270         | 0.0095 |
| K22. M+(N=20)  | 30.4                           | 22             | 235           | 180         | 270         | 0.0180 |

Kiriş numuneleri priz için bir gün kalıpta bekletilip daha sonra ıslak çuval bezler ile laboratuvar sıcaklığı olan 8 ile 20 ° C arasında kür edilmiştir. 150\*300 mm standard silindir numuneler ise, özel kür tankında bekletilmiştir. Bir hafta sonra, numuneler, test öncesi kuru havaya maruz bırakılarak nemliliği giderilmiştir.

## 5.2 Deney Düzeneği ve Test İşlemi

Deney kirişleri, 1730 mm açıklıklı, basit mesnetli kirişlerdir (Şekil 5.1). Numuneler, yükleme kapasitesi 150 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. Eksenel basınç kuvveti ise, bir tarafında yük hücresi (load cell) ve diğer tarafında hidrolik krika bulunan ve sonradan deney tablası üzerine monte edilmiş olan

düzenek yardımıyla, kiriş numunesinin her iki yan yüzeyinden merkezi olarak verilmiştir (Şekil 5.3). Sehimler ise, açıklık ortasına yerleştirilen komparatör yardımıyla ölçülmüştür. Bileşik eğilmeli yükleme, kiriş numunenin önce aksel basınç kuvvete ve daha sonra basit eğilmeye maruz bırakılması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Her bir testte pik yüke, ortalama 4 dakika civarında erişilmiştir. Şekil 5.3’de deney düzeneğine ait detaylar görülmektedir.



Şekil 5.3 Deney düzeneği

Bu çalışmada, eğilme ve bileşik eğilme yüklemesi altında yüksek mukavemetli betondan üretilmiş ve çekme donatısı üç farklı çaptan oluşan toplam 27 adet kayma donatısız kiriş numunesi kullanılarak aderans olayı incelenmiştir. Deney numunelerinin tanımlanmasında, ilk harf K, kiriş numunesi olduğunu, daha sonraki sayısal değer 12, 16 ve 22, donatı çapını, M harfi basit eğilmeyi, N harfi aksel basınç kuvvetini ve N harfinin yanındaki sayısal değerler ise, kN cinsinden aksel basınç kuvveti değerini temsil etmektedir. Örneğin, K16.M+(N=8.5) tanımlaması, 16 mm çaplı donatı kullanılan, 8.5 kN aksel basınç kuvvetinde bileşik eğilmeye maruz kiriş numunesini temsil etmektedir.

Deneyler üç seri halinde gerçekleştirilmiştir. Birinci seri deneylerde, 9 adet kiriş numunesi, donatı çubuklarının üst üste bindirildiği sabit moment bölgesinden pozitif eğilme ile yüklenmiştir. İkinci seri deneylerde, yine her donatı çapı için 3'er adet olmak üzere 9 adet kiriş numunesi, basit eğilme ile birlikte kirişin her iki ucundan merkezi eksenel basınca da maruz bırakılmıştır. Kiriş numuneleri, üçüncü seri deneylerde de bileşik eğilmeye maruz bırakılmış olup, eksenel basınç kuvveti, ikinci seri deneylerde uygulanan kuvvetin iki katı olarak etki ettirilmiştir. İkinci seri deneylerde, eksenel basınç kuvvet değeri belirlenirken, çatlamış kesit durumunun elde edilebilmesi ve laboratuvar şartları etkili olmuştur.

Deneyler esnasında kiriş numunelerine ait genişlik ( $b$ ), yükseklik ( $h$ ), faydalı yükseklik ( $d$ ) ve beton karışım oranları bütün testlerde sabit tutulmuş olup, değişken parametreler olarak ise, donatı çapı ( $\phi$ ) ve yükleme durumu (basit veya bileşik eğilme) seçilmiştir. Uygulanan yükler ve 200 kg yük artımındaki açıklık ortası sehimleri, yükleme esnasında sürekli olarak göçme anına kadar kaydedilmiş olup, çatlak gelişimi ve kırılma türü gözlenmiştir. Bütün kirişler, gevrek bir davranış ile bindirme uzunluğu üzerindeki beton örtünün yarılması sonucu, aderans göçmesiyle kırılmıştır.

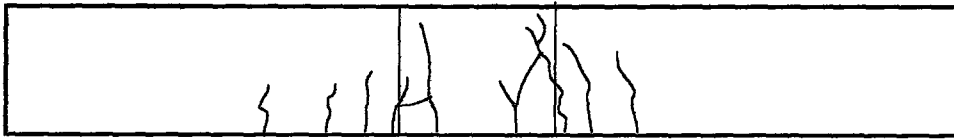
### 5.3 Deney Bulguları

Tablo 5.6'daki deney sonuçlarından, kiriş numunelerde, her iki yükleme durumunda da donatı çapı arttıkça, tarafsız eksen derinliğinin ( $x$ ) ve göçme yükünün ( $P_{max}$ ) artmasına karşılık, donatıda oluşan gerilmelerin ( $\sigma_s$ ) ve dolayısıyla aderans dayanımların azaldığı görülmektedir. Bunun yanında, eksenel basınç kuvvetinin artmasıyla, aynı donatı çapları için, donatı aderans dayanımlarının ve numunelere ait sünekliğin arttığı da deney sonuçlarından anlaşılmaktadır. Hesaplamalarda kullanılan maksimum momente ( $M_{max}$ ), kiriş zati ağırlığı ve yükleme sisteminden dolayı oluşan moment dahil edilmiştir.

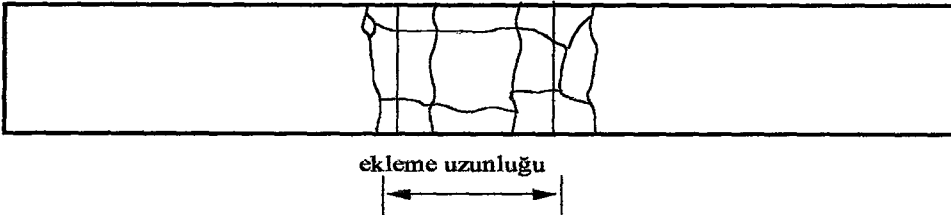
Tablo 5.6 Deney sonuçlarının özeti

| Deney<br>Seri No | Numune No      | $f'_c$<br>(MPa) | $N$<br>(kN) | $P_{max}$<br>(kN) | $e$<br>(mm) | $\delta$<br>(mm) | $x$<br>(mm) | $\sigma_s$<br>(MPa) | $u_{test}$<br>(MPa) |
|------------------|----------------|-----------------|-------------|-------------------|-------------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|
| 1                | K12. M+(N=0)   | 30.4            | 0           | 50.30             | -           | 1.97             | 58.68       | 394.38              | 5.03                |
|                  | K16. M+(N=0)   | 30              | 0           | 60.80             | -           | 1.74             | 74.85       | 273.95              | 4.66                |
|                  | K22. M+(N=0)   | 30.4            | 0           | 71.50             | -           | 1.51             | 95.69       | 175.75              | 4.11                |
| 2                | K12. M+(N=7.5) | 32.1            | 7.5         | 54.20             | 2756        | 2.60             | 60.00       | 408.02              | 5.21                |
|                  | K16. M+(N=8.5) | 32              | 8.5         | 66.70             | 2981        | 1.87             | 76.01       | 289.67              | 4.93                |
|                  | K22. M+(N=10)  | 30              | 10          | 78.60             | 2979        | 1.69             | 98.40       | 187.30              | 4.38                |
| 3                | K12. M+(N=15)  | 31.1            | 15          | 57.70             | 1465        | 2.97             | 62.24       | 417.84              | 5.33                |
|                  | K16. M+(N=17)  | 31.3            | 17          | 73.60             | 1643        | 2.28             | 78.15       | 310.34              | 5.28                |
|                  | K22. M+(N=20)  | 30              | 20          | 86.80             | 1643        | 2.02             | 100.40      | 201.17              | 4.71                |

Şekil 5.4'te, bir kiriş numunesine ait tipik çatlama modeli gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, tüm numunelerin yan yüzlerinde eğilme çatlakları oluşmuş olup, deneyler esnasında yapılan gözlemlerden bütün numunelerin donatı bindirme bölgesindeki beton örtünün yarılması sonucu, ani ve gevrek bir kırılmayla göçtüğü tespit edilmiştir. Diğer kiriş numunelere ait çatlak modelleri için, Bölüm Ek 1'e bakılabilir.



a) Yan görünüş



b) Alt (çekme bölgesi) görünüş

Şekil 5.4 K12. M+(N=7.5) kirişine ait çatlak modelleri : a)yan görünüş ve b)alt (çekme bölgesi) görünüş

Yarılma göçme modu, bindirmeli ekli donatıların maksimum kapasitesine ulaştığını göstermektedir. Bu sebeple, aderans dayanımı direkt olarak donatıda meydana gelen gerilmelerden tayin edilebilir. Donatıdaki gerilme ( $\sigma_s$ ) ise, Bölüm 4'te değinilen, elastik hesap yöntemi esaslarına göre tamamen çatlamış kesit analizi ile hesaplanmıştır. Analizde, tarafsız eksenin altındaki betonda çekme gerilmeleri ihmal edilmiş olup, lineer gerilme-şekil değiştirme davranışı varsayımı esas alınmıştır.

Bu sebeple, Tablo 5.6'daki ortalama aderans dayanımı ( $u_{test}$ ), Denklem (4.1) ile bulunmuştur. Elde edilen bu değerler kullanılarak, Şekil 5.5'de gösterildiği gibi,  $u/\sqrt{f'_c}$  değerlerine karşılık,  $1/\phi$  apsis olmak üzere elde edilecek amprik denklem için en uygun eğri çizilmiştir. Korelasyon katsayısı  $r=0.801$  olan deney sonuçlarına ait dataların lineer regresyon analizi sonucu elde edilen Şekil 5.5'deki eğriye ait amprik denklem,

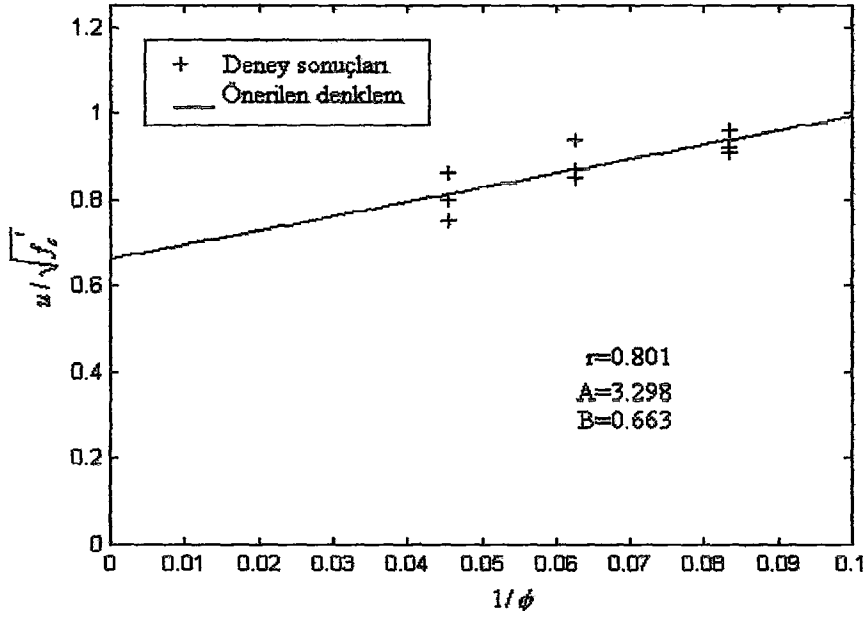
$$\frac{u}{\sqrt{f'_c}} = 0.663 + \frac{3.298}{\phi}$$

veya

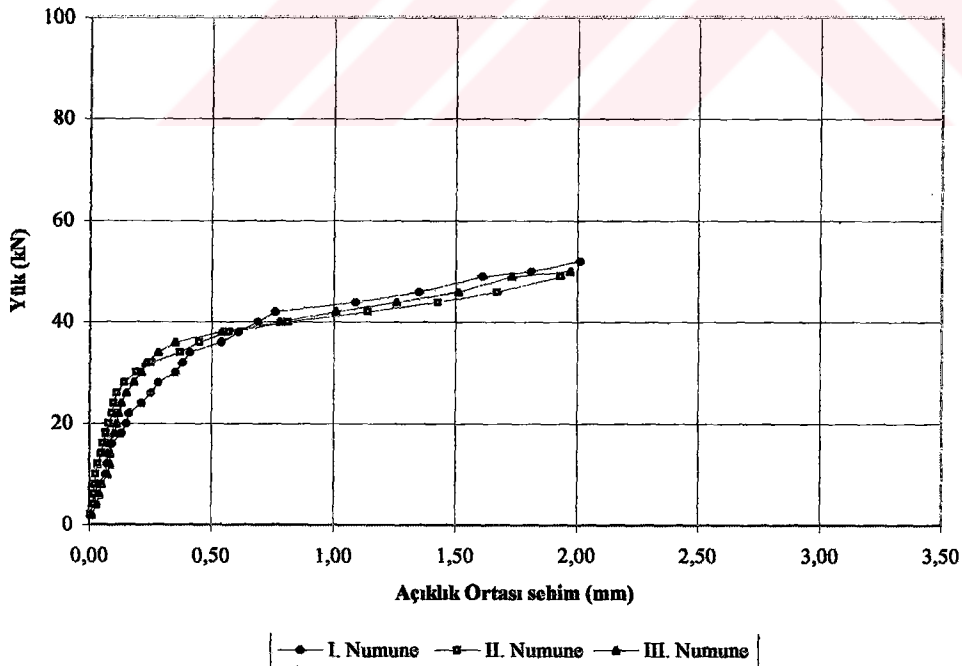
$$u = \left( 0.663 + \frac{3.298}{\phi} \right) \sqrt{f'_c} \quad (5.2)$$

olarak bulunmuştur.

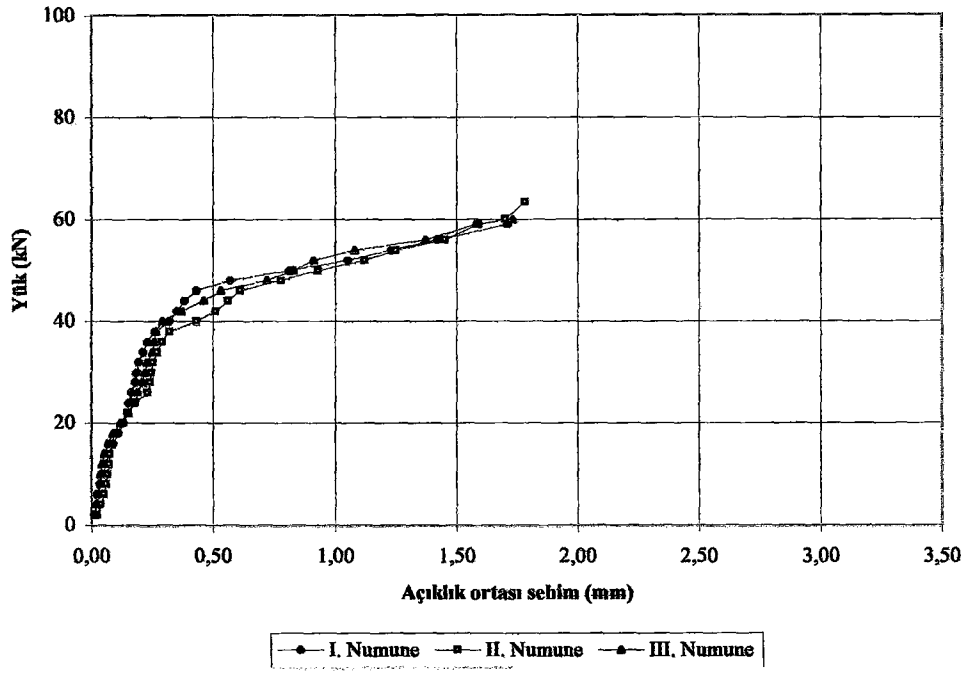
Şekil 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14'deki deney numunelerine ait yük-sehim eğrilerinden, hem basit hem de bileşik eğilme yükleme durumu için, donatı çapı arttıkça, kiriş numunelerine ait rijitliğin arttığı fakat düktilitenin azaldığı görülmektedir. Her bir deney serisinde, bütün donatı çapları için ayrı ayrı 3'er adet dökülen numunelere ait yük-sehim eğrileri, bir grafik içinde I., II. ve III. numune şeklinde verilmiştir.



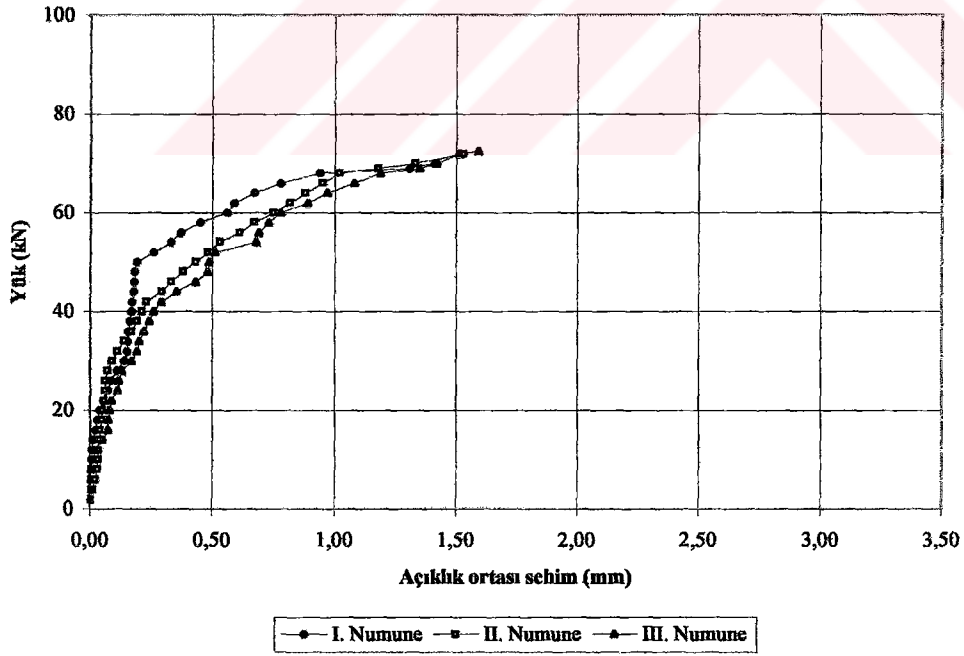
Şekil 5.5 Lineer regresyon analizi ile deney sonuçlarından elde edilen ampirik denkleme ait grafik



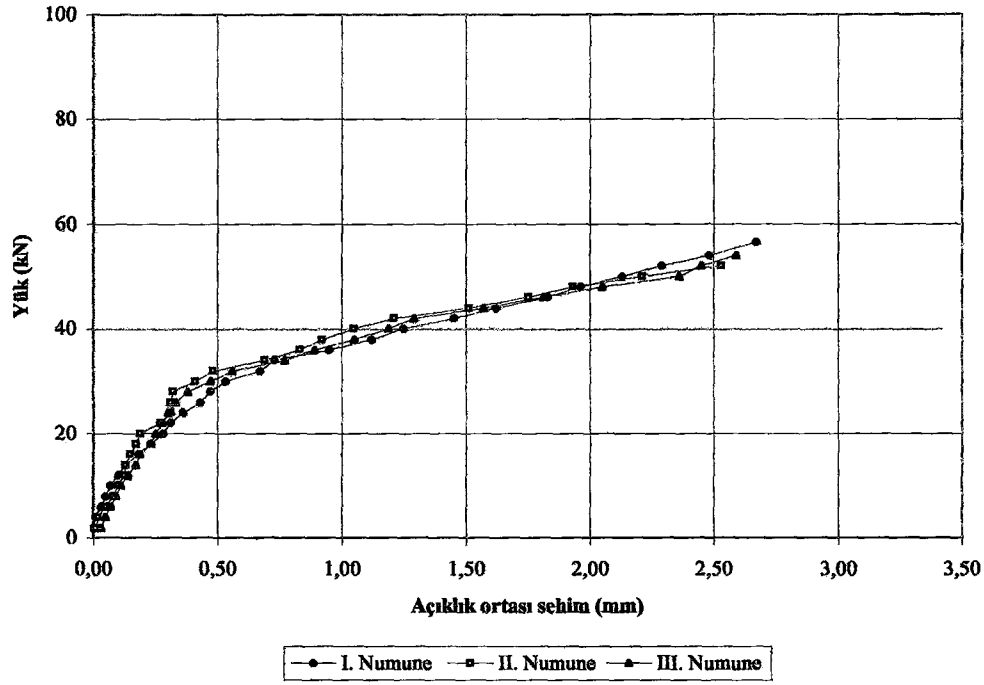
Şekil 5.6 K12. (M+N=0) kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri



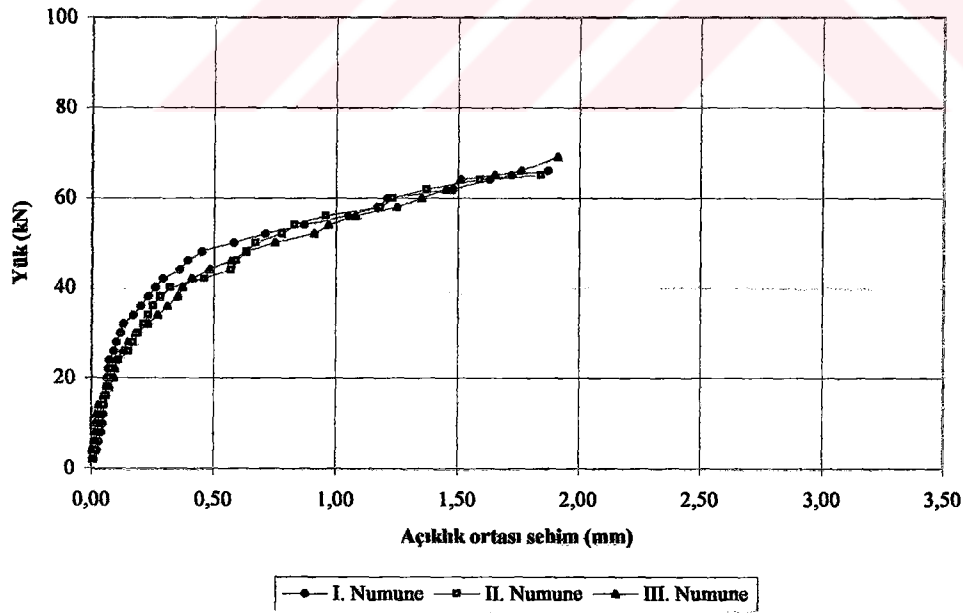
Şekil 5.7 K16. M+(N=0) kirişine ait numunelerin yük-sehım eğrileri



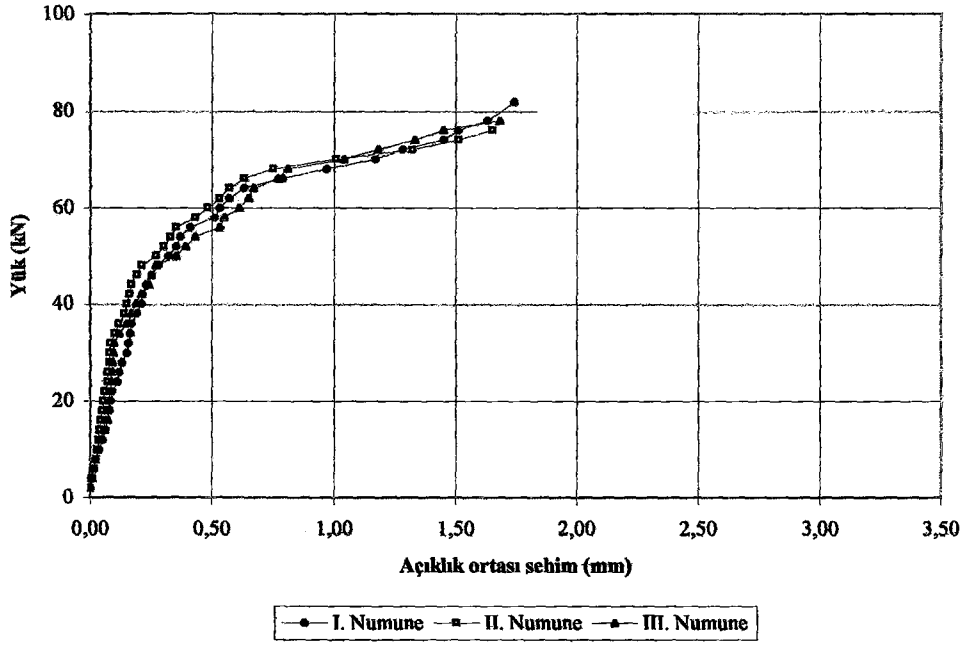
Şekil 5.8 K22. M+(N=0) kirişine ait numunelerin yük-sehım eğrileri



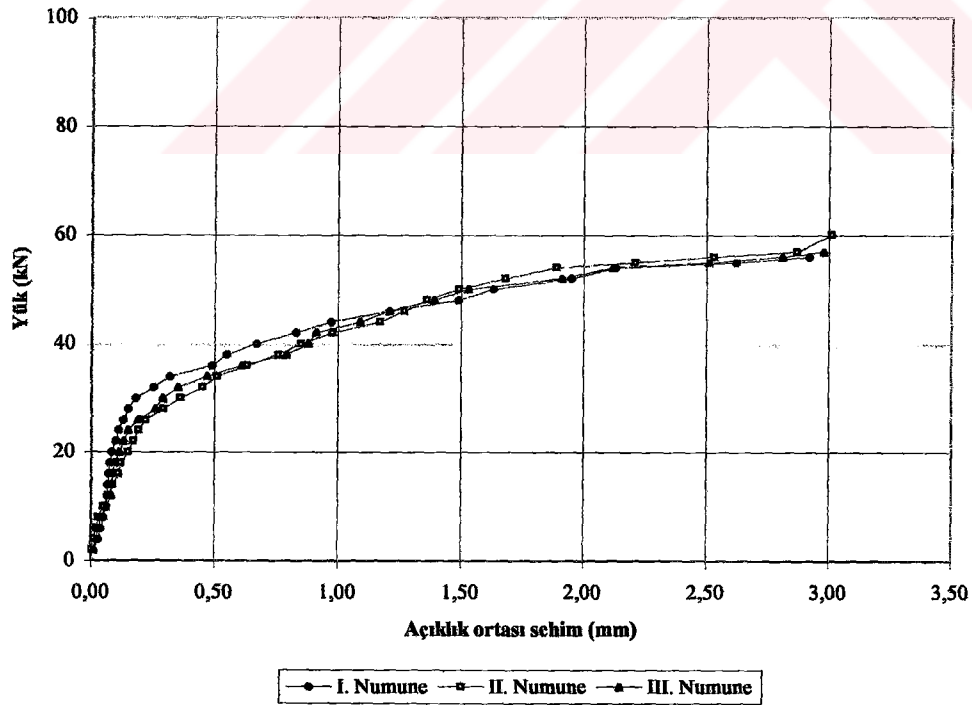
Şekil 5.9 K12. M+(N=7.5) kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri



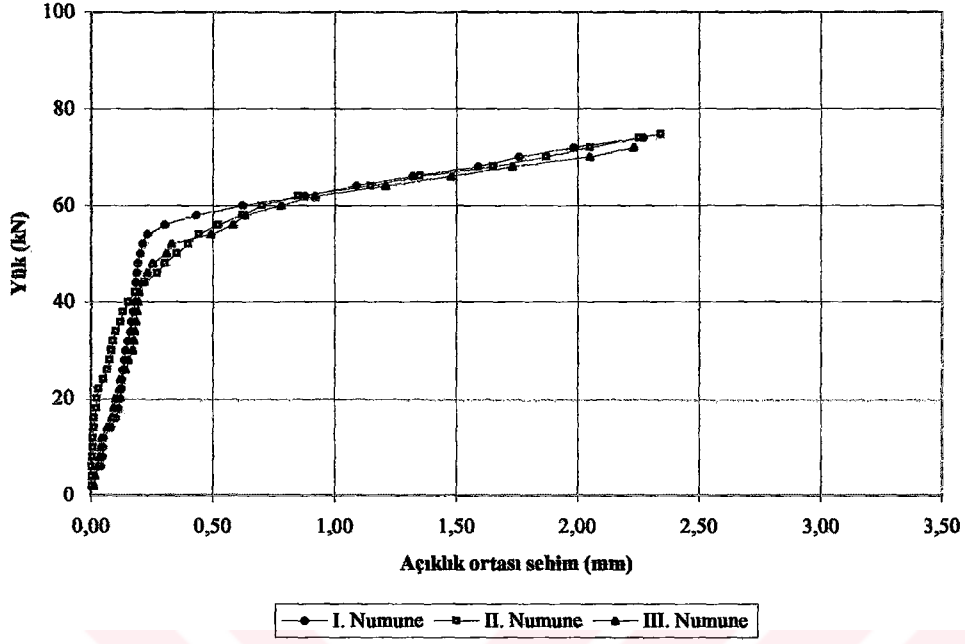
Şekil 5.10 K16. M+(N=8.5) kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri



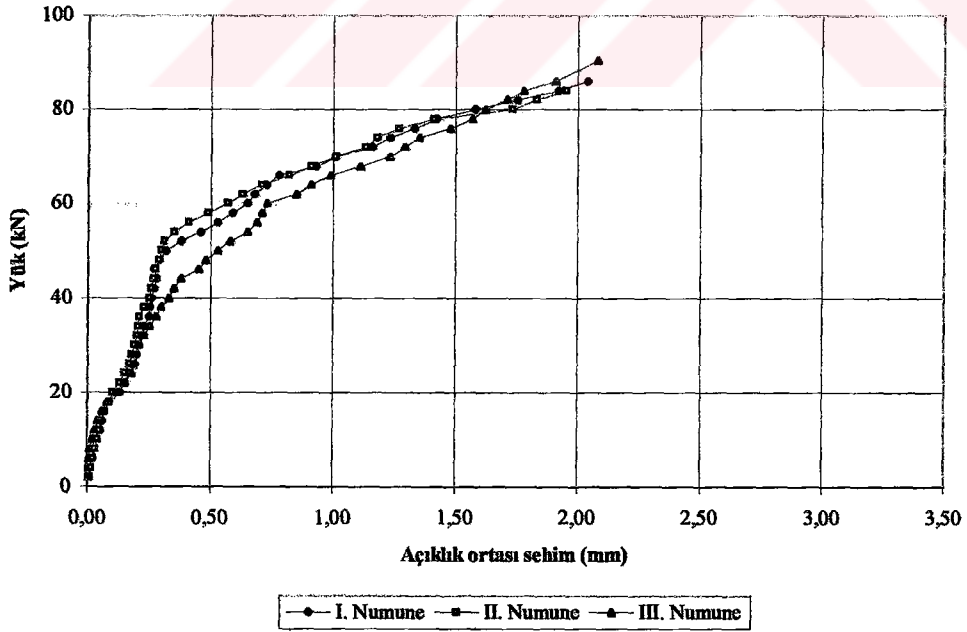
Şekil 5.11 K22. M+(N=10) kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri



Şekil 5.12 K12. M+(N=15) kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri



Şekil 5.13 K16. M+(N=17) kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri



Şekil 5.14 K22. M+(N=20) kirişine ait numunelerin yük-sehim eğrileri

#### 5.4 Ölçülen Aderans Gerilmesinin ACI 318-83 ile Karşılaştırılması

ACI Yapı Şartnamesi, kayma donatısız ve çekme donatısının beton üst yüzeyine göre altta olduğu çubuklara ait aderans dayanımının hesabı için ve dizayn amaçlı olarak aşağıdaki denklemi önermektedir (Everard ve Tanner, 1966):

$$u_{318-83} = \frac{9.5}{d_b} \sqrt{f'_c} \leq 5.52 \text{ N/mm}^2 \quad (5.3)$$

Deney sonuçlarına ait dataların lineer regresyon analizi sonucu elde edilen Denklem (5.2)'nin geçerliliğinin belirlenmesi için, ACI 318-83 Yapı Şartnamesi'nin önerdiği Denklem (5.3) ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, Denklem (5.2) ve Denklem (5.3)'ten elde edilen değerlerin oranlanması şeklinde yapılmıştır (Tablo 5.7).

**Tablo 5.7** Ölçülen aderans gerilmesinin ACI 318-83 ile karşılaştırılması

| Numune No      | $f'_c$<br>MPa | Denklem (5.2)<br>$u_d = \left(0.663 + \frac{3.298}{d_b}\right) \sqrt{f'_c}$ | ACI 318-83<br>$u_{318-83} = \frac{9.5}{d_b} \sqrt{f'_c}$ | Aderans                           |
|----------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------|
|                |               |                                                                             |                                                          | Yeterliliği<br>$u_d / u_{318-83}$ |
| K12. M+(N=0)   | 30.4          | 5.17                                                                        | 4.36                                                     | 1.19                              |
| K16. M+(N=0)   | 30            | 4.76                                                                        | 3.25                                                     | 1.46                              |
| K22. M+(N=0)   | 30.4          | 4.48                                                                        | 2.38                                                     | 1.88                              |
| K12. M+(N=7.5) | 32.1          | 5.31                                                                        | 4.49                                                     | 1.18                              |
| K16. M+(N=8.5) | 32            | 4.92                                                                        | 3.36                                                     | 1.46                              |
| K22. M+(N=10)  | 30            | 4.45                                                                        | 2.37                                                     | 1.88                              |
| K12. M+(N=15)  | 31.1          | 5.23                                                                        | 4.41                                                     | 1.19                              |
| K16. M+(N=17)  | 31.3          | 4.86                                                                        | 3.32                                                     | 1.46                              |
| K22. M+(N=20)  | 30            | 4.45                                                                        | 2.37                                                     | 1.88                              |

ACI 318-83 Yapı Şartnamesine ait Denklem (5.3) esas alınarak, deney numunelerine ait bütün çubuk eklemeler için ortalama aderans dayanımı yeterliliği, 1.51 ve standart sapması, 0.30 olarak bulunmuştur. Görüldüğü gibi, ACI 318-83 Yapı Şartnamesine ait Denklem (5.3) ve deney sonuçlarından elde edilen Denklem (5.2) karşılaştırıldığında, şartnamenin yaklaşık 1.5 kat daha emniyetli tarafta kaldığı ortaya çıkmaktadır. Donatı aderansı ile ilgili yapılan önceki çalışmalarda da hemen hemen benzer gözlemler yapılmıştır (Hamad ve Seferian, 2000).



## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, çekme donatısı sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli olarak yerleştirilmiş kayma donatısız 27 adet kiriş numunesi test edilerek, donatı aderans dayanımı incelenmiştir. Dikdörtgen kesitli bu kiriş numuneleri,  $f'_c \geq 30 \text{ N/mm}^2$  betondan üretilmiş olup, deneyler esnasında değişken olarak donatı çapı ve yükleme durumu seçilmiştir.

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. Hem basit eğilme hem de bileşik eğilme durumunda, kiriş numunelerinde kullanılan boyuna donatının çapı arttıkça, donatı aderans dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. Çünkü, donatı çapının artmasıyla birlikte, hem kesit alanı artan donatıya gelen kuvvetin artması sonucu kenetlenme azalacak, hem de donatı dış kuvvetlerinin oluşturduğu ve yarıma çatlağına sebep olan radyal gerilmeler artacaktır.
3. Bileşik eğilmeye maruz kiriş numunelerine ait donatı aderans dayanımlarının, sadece basit eğilme etkisi altındaki numunelerin donatı aderans dayanımlarından daha büyük olduğu görülmüştür. Bu ise, eksenel basınç kuvvetiyle birlikte tarafsız eksen derinliğinin artması ve dolayısıyla beton basınç bölgesindeki gerilmenin artmasından kaynaklanmaktadır.
4. Yük-sehim eğrilerinden görüldüğü gibi, her iki yükleme durumunda ve bütün deney serilerinde, donatı çapı arttıkça kiriş numunelerinin rijitliği (herhangi bir sehim değerine karşılık gelen yük) artmakta fakat sünekliği azalmaktadır. Bunun ise, deneyler esnasında yapılan gözlemlerden, relatif bakımdan büyük çaplı donatıya sahip numunelerde, çatlak oluşumuna kadar hızlı bir yük artışından sonra, az sayıda büyük genişlikli çatlakların meydana gelmesiyle birlikte, numunenin deplasman yapma özelliğini kaybetmesinden kaynaklandığı tespit edilmiştir.

5. Ayrıca, bütün deney serilerindeki aynı donatı çapına sahip numuneler karşılaştırıldığında, eksenel kuvvetin daha büyük olduğu numunelerin, sünekliğinin de fazla olduğu görülmüştür. Bu durumun çatlamamış kesit için (yani, büyük eksenel yük durumunda) geçerli olmadığı bilinmektedir.

6. Sünekliği fazla olan giriş numunelerinin, donatı aderans dayanımlarının da büyük olduğu deney sonuçlarından ve yük-sehim eğrilerinden görülmektedir. Bu numunelerin, relatif bakımdan daha küçük çaplı donatıya sahip numuneler olması, olaya açıklık kazandırmaktadır. Çünkü, söz konusu giriş numunelerinde, kesit alanı azalan donatıya gelen kuvvetin azalması sonucu kenetlenme artacağı gibi, donatı dış kuvvetlerinin oluşturduğu ve yarıma çatlağına sebep olan radyal gerilmeler de azalacaktır. Böylece, az açılmış çok sayıda çatlakların oluşması, hem sünekliği arttıracak, hem de kenetlenmeden dolayı donatı aderansını arttıracaktır.

7. Korelasyon katsayısı  $r=0.801$  olan deney sonuçlarından elde edilen dataların lineer regresyon analizi sonucu olarak, Denklem (5.2) çıkarılmıştır. ACI 318-83 Yapı Şartnamesinin önerdiği Denklem (5.3) esas alınarak, deney numunelerine ait bütün çubuk eklemeler için ortalama aderans yeterliliği, 1.51 ve standart sapması, 0.30 olarak hesaplanmıştır. Önceki araştırmacılar tarafından yapılan benzer gözlemlerde olduğu gibi, bu çalışmada da şartnamelerin daha emniyetli tarafta kaldığı tespit edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışma daha önce yapılan literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında, parametrelerin az olmasına karşın, deney numunelerinin eğilme momentine ek olarak eksenel kuvvet etkisine de maruz bırakılması, çalışmayı farklı kılmaktadır. Ayrıca, deney numunelerinin büyük boyutlu olması ve yüksek mukavemetli beton kullanılması çalışmaya ayrı bir önem kazandırmaktadır. Deney sonuçlarındaki sapmanın az olmasının : nervürlü donatı ile beton arasındaki mekanik aderansın sağlanması amacıyla maksimum agrega çapı 8 mm olan beton kullanılması, su/çimento oranının düşük tutulması, uygun kür şartları ve sistemli bir deney düzeneğinden kaynaklandığı açıktır. Bunlara ilave olarak, bu çalışmada elde edilen denklem, 1963 ACI Yapı Şartnamesinin önerdiği denklem ile karşılaştırıldığında, deney numunelerine ait bütün çubuklar için şartnamenin daha emniyetli tarafta kalması, deney sonuçlarından elde edilen bu amprik denklemin güvenilirliğini ortaya koymaktadır. Tüm deney numunelerine ait nihai göçme yükünün, klasik hesapla bulunan değerlerden daha düşük olması, yani, kırılmanın donatı akmadan önce beton örtütünün yarılmaları

sonucu ekleme donatısının göçmesiyle meydana gelmesi, deneyin amacına ulaştığını göstermektedir.

Bununla beraber, deney numune sayısını arttırmak, numune boyutlarını daha büyük tutmak, kayma donatısı kullanmak ve dolayısıyla parametre sayısını fazlalaştırmak laboratuvar imkanları ölçüsünde mümkün olmamakla birlikte, bu çalışmadaki parametre sayısına göre yeterince numune kullanılarak pratik hesaplar için, basit ama gerçekçi bir aderans mukavemeti formülü elde edilmiştir.



## KAYNAKLAR

Ahmed, T., Burley, E. and Ridgen, S., 1999, **Effect of Alkali-silica reaction on tensile bond strength of reinforcement in concrete tested under static and fatigue loading.** ACI Materials J. 1999, 419-428.

Aka, İ., Keskinel, F. ve Arda, T. S., 1985, **Betonarmeye giriş.** İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yayını, yayın no: 7, İstanbul, 424 s.

Akashi, J., Fuji, S. And Morita, S., 1993, **First meeting of the multi-lateral project on the use of high-strength concrete.** Topic 1, Kyoto, Japan, 1993, 2-13.

Alan, M. L., 1993, **Toughness of reinforcement/concrete bond in tensile loading.** Cement and Concrete Research 93, vol. 23, 609-617.

Amleh, L. and Mirza, S., 1999, **Corrosion influence on bond between steel and concrete.** ACI Structural J. 1999, 415-423.

Arda, T. S., 1968a, **Betonarmede aderans konusunda bir derleme.** İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Yayını, İstanbul.

Arda, T. S., 1968b, **Enine donatının aderansa etkisi.** Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bil. Enst., İstanbul, 97 s.

Arda, T. S., 1973, **Bitişik donatı çubuklarının aderansı.** İstanbul Teknik Üniversitesi yayını, İstanbul, 39 s.

Azizinamini, A., Pavel, R., Hatfield, E. and Ghosh, S. K., 1999, **Behavior of lap-spliced reinforcing bars embedded in high-strength concrete.** ACI Structural Journal 93, 826-834.

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, 554-561.

Benmokrane, B., Tighiouart, B. and Chaallal, O., 1996, **Bond strength and load distribution of composite GFRP reinforcing bars in concrete.** ACI Materials J. 1996, 246-253.

Buenfeld, N. R. and Broomfield, J. P., 2000, **Influence of electrochemical chloride extraction on the bond between steel and concrete.** Magazine of Concrete Research, 52, no. 2, 79-71.

Cairns, J. and Jones, K., 1996, **An evaluation of the bond-splitting action of ribbed bars.** ACI Materials J. 1996, 10-19.

Cairns, J. and Jones, K., **The splitting forces generated by bond.** Magazine of Concrete Research, 1995, No. 171, 153-165.

Cairns, J. and Rafeeqi, S. FA., 1997, **Behaviour of reinforced concrete beams strengthened by external unbonded reinforcement.** Construction and Building. Mater. 97, Vol. 11, 309-317.

Celep, Z. ve Kumbasar, N., 1996, **Betonarme yapılar.** Sema Matbaacılık, İstanbul, 852s.

Chapman, R. A. and Shah, S. P., 1987, **Early-Age bond strength in reinforced concrete.** ACI Mater. Journal 87, 501-510.

Choi, O. C., Hadje-Ghaffari, H., Darwin, D. and McCabe, S. L., 1991, **Bond of epoxy-coated reinforcement: bar parameters.** ACI Materials J. 1991, 207-217.

Darwin, D. and Zavadzky, S. S., 1996, **Bond strength of grouted reinforcing bars.** ACI Structural Journal 96, 486-495.

Darwin, D., Idun, E. K., Zuo, J. and Tholen M. L., 1998, **Reliability-Based strength reduction factor for bond.** ACI Structural Journal 98, 434-443.

Darwin, D., Tholen, M. L., Idun, E. K. and Zuo, J., 1996, **Splice strength high relative rib area reinforcing bars.** ACI Structural J. 1996, 95-107.

Darwin, D., Zuo, J., Tholen, M. L. and Idun, E. K., 1996, **Development length criteria for conventional and high relative rib area reinforcing bars.** ACI Structural J. 1996, 347-359.

De Larrard, F., Seashaller, I. And Fuchs, J., 1993, **Effect of bar diameter on the bond strength of passive reinforcement in high-performance concrete.** ACI Mater. Journal 93, 333-339.

Dunham, C. W., 1966, **The theory and practice of reinforced concrete.** Fourth edition, McGraw-Hill book company, Newyork, 629 s.

Eligehausen, R., 1979, **Tensile Lapped-Spliced of Ribbed Bars with Straight Ends.** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 301, Berlin.

Eligehausen, R., Balazs, G., L., 1980, **Bond and Detailing.** CEB Bulletin d'Information 1980, Stuttgart, 173-226.

Eligehausen, R., Kreller, H., H. und Langer, P., 1989, **Untersuchungen zum Verbundverhalten gerippter Bewehrungsstäbe mit praxisüblicher Betondeckung.** Mitteilungen of the Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, No.5

Ersoy, U. ve Atımtay, E., 1975, **Betonarme (Temel ilkeler ve hesap yöntemleri)**, ODTÜ yayını, yayın no:1, Ankara, 623 s.

Ersoy, U., 1985, **Betonarme (Temel ilkeler ve taşıma gücü hesabı)**. O.D.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü yayını, yayın no: 3, Ankara, 634 s.

Esfahani, M. R. and Rangan, B. V., 1998a, **Local bond strength of reinforcing bars in normal strength and high-strength concrete**. ACI Structural J. 98, 96-106

Esfahani, M. R. and Rangan, B. V., 1998b, **Bond between normal strength and high-strength concrete and reinforcing bars in splices in beams**. ACI Structural J. 98, 272-280

Everard, N. J. and Tanner, J. L., 1966, **Theory and problems of reinforced concrete design**. Schaum publishing company, Newyork, 325 s.

Ferguson, P. M., 1979, **Reinforced concrete fundamentals**. John Wiley and Sons, 4. th Edition, New York, 169-210 s.

Fu, X. and Chung, D. D. L., 1997, **Effect of corrosion on the bond between concrete and steel rebar**. Cement and Concrete Research, 1997, Vol. 27, No. 12, 1811-1815.

Fu, X. and Chung, D. D. L., 1997, **Improving the bond strength between steel rebar and concrete by increasing the water/cement ratio**. Cement and Concrete Research, 1997, Vol. 27, No. 12, 1805-1809.

Fu, X. and Chung, D. D. L., 1998, **Decrease of the bond strength between steel rebar and concrete with increasing curing age**. Cement and Concrete Research, 1998, Vol. 28, No. 2, 167-169.

Fu, X. and Chung, D. D. L., 1998, **Effect of water-cement ratio, curing age, silica fume, polymer admixtures, steel surface treatments and corrosion on bond between concrete and steel reinforcing bars.** ACI Materials J. 1998, 725-734.

Fu, X. and Chung, D. D. L., 1998, **Improving the bond strength of concrete to reinforcement by adding methylcellulose to concrete.** ACI Materials J. 1998, 601-607.

Gambarova, G. P. and Giuriani, E., 1985, Discussion of “**Fracture mechanics of bond in reinforced concrete**” by Ingrassia, A. R., Gerstle, W. H., Gergely, P. and Saouma, V., ASCE Journal of Structural Engineering, 1985, 1161-1163.

Gambarova, G. P. and Karakoç, C., 1981, **In tema di aderenza fra barre nervate e calcestruzzo, in presenza di fessure longitudinali da spacco.** Studi e Ricerche, n. 3, 1981, Corso di Perfezionamento per le Costruzioni in c.a. Fratelli Pesenti, Politecnico di Milano, pp. 143-176.

Ghio, V. A. and Monteiro, P. J. M., 1997, **Bond strength of reinforcing bars in reinforced shotcrete.** ACI Materials J. 1997, 111-118.

Gjorv, O. E., Monteiro, P. J. M. and Mehta, P. K., 1990, **Effect of condensed silica fume on the steel-concrete bond.** ACI Materials J. 1990, 573-580.

Gündüz, A., 1978, **Betonarme.** Matbaa Teknisyenleri Basımevi, yayın no: 2, İstanbul, 454 s.

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, 499-511

Hamad, B. S. and Mansour, M. Y., 1996, **Bond strength of noncontact tension lap splices.** ACI Structural J. 1996, 316-326.

Hamad, B. S. and Seferian, Z. S., 2000, **Role of casting position on bond strength of confined tension lap splices in silica fume concrete.** Materials and Structures, Vol.33, 2000, 584-593.

Hamad, B. S., 1995, **Bond strength improvement of reinforcing bars with specially designed rib geometries.** ACI Structural J. 1995, 3-13.

Hamad, B. S., 1995, **Comparative bond strength of coated and uncoated bars with different rib geometries.** ACI Materials J. 1995, 579-590.

Hamad, B. S., Harajli, 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, 638-647.

Hamza, A. M. and Naaman A. E., 1996, **Bond characteristics of deformed reinforcing steel bars embedded in sifcon.** ACI Materials J. 1996, 578-588.

Harajli, M. H., 1994, **Development/splice strength of reinforcing bars embedded in plain and fiber reinforced concrete.** ACI Structural J. 1994, 511-520.

Hester, C. J., Salamizavaregh, S., Darwin. D. and McCabe, S. L., 1993, **Bond of epoxy-coated reinforcement.** ACI Structural J. 1993, 89-102.

Hwang, S. J., Leu, Y. R. and Hwang, H. L., 1996, **Tensile bond strengths of deformed bars of high-strength concrete.** ACI Structural J. 96, 11-20.

Karakoç, C., 1985, **Aderansta mekanik etkileşim olayı.** Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bil. Enst., İstanbul, 83 s.

Kayan, İ., 1992, **Cisimlerin Mukavemeti.** İstanbul Teknik Üniv. Yayını, yayın no: 2, İstanbul, 732 s.

Kolek, J., 1963, **Zn effect on bond**. Structural Concrete, vol. 1, no: 9 – Research Committy of Cast Stone and Cast Concrete Products Industry, London

Lees, J. M. and Burgoyne, C. J., 1999, **Experimental study of influence of bond on flexural behavior of concrete beams pretensioned with aramid fiber reinforced plastics**. ACI Structural J. 1999, 377-385.

Lin, T. Y., 1963, **Design of prestressed concrete structures**, John Wiley and Sons, Second Edition, New York, 614 s.

Lutz, L. A. and Gergely, P., 1967, **Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete**. ACI Journal 67, 711-721.

Manfredi, G. and Pecce, M., 1996, **Behaviour of bond between concrete and steel in a large post-yelding field**. Materials and Structures, vol. 29, 506-513.

Martin, H., 1973, **Zusammenhag zwischen Oberflächenbeschaffenheit, Verbund und Sprengwirkung von Bewehrungstahlenunten Kurzzeitbelanstuung**. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 228, Berlin.

Mertol, A., 1972, **Betonarme hesap esaslari**. Kurtulmuş Matbaası, yayın no: 2, İstanbul, 414s.

Opara, N. K., Watson, K. A. and LaFave, J. M., 1994, **Effect of increased tensile strength and toughness on reinforcing-bar bond behavior** Cement&Concrete Composites 94, 129-141

Orangun, C. O., Jirsa, J.O. and Breen, J. E., 1977, **A reevaluation of test data on development length and splices**. ACI Journal 77, 114-122

Orr, D. M. F., 1976, **Lap splicing of deformed reinforcing bars**. ACI Journal 76, 622-627

Özden, K., 1971, **Betonarme I**. İstanbul Teknik Üniv. Yayını, yayın no: 1, İstanbul, 583 s.

Park, R. and Paulay, T., 1975 **Reinforced Concrete Structures**. John Wiley and Sons, New York.

Plizzari, G. A., Deldossi, M. A. and Massimo, S., 1998, **Transverse reinforcement effects on anchored deformed bars**. Magazine of Concrete Research, 50, no. 2, 161-177.

Plizzari, G. A., Marchina, E. and Giuriani, E., 1996, **Experimental study of splitting and flexural cracks in a RC beam with overlapped splices**. Materials and Structures, vol. 29, 19-27.

Rehm, G., 1961, **Über die grundlagen des verbundes zwischen stahl und beton**. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Heft 138 – Verlag Wilhelm Ernst und Shon, Berlin.

Riessauw, F., 1957, **Essais comparatifs d'adherence entre acier tor verrous 40 et acier a. 37 lisse**. Symposium on bond and crack formation in reinforced concrete – Vol. III, subject I Tekniska Högskolans Rotaprinttryckeri – RILEM – Stockholm.

Schießl, P., 1975, **Nachrechnung von Verankerungen mit Verbundgrundgesetzen**. Report of the Institut für Betonstahl-und Stahlbeton-bau München, Sept. 1975, München

Soretz, S., Hölzenbein, H., 1979, **Influence of Rib Dimensions of Reinforcing Bars on Bond and Bendability**. ACI Journal 79, Vol.76., no.1, 111-128

Soroushian, P., Choi, K. B., Park, G. H. and Aslani, F., 1991, **Bond of deformed bars to concrete : effects of confinement and strength of concrete**. ACI Materials J. 1991, 227-232.

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.

Tepfers, R., 1979, **Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars**. Magazine of Concrete Research, 1979, No. 106, 3-12.

Tepfers, R., 1980, **Bond stress along lapped reinforcing bars**. Magazine of Concrete Research, 1980, No. 112, 135-142.

Treece, R. A. and Jirsa, J. O., 1989, **Bond strength of epoxy-coated reinforcing bars**. ACI Materials J., 1989, 167-174.

TS 130, 1978, **Agrega karışımlarının elek analizi deneyi için metot**. Türk standartları enstitüsü, Ankara.

TS 500, 2000, **Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları**. Türk standartları enstitüsü, Ankara.

TS 706, 1980, **Beton Agregaları**. Türk standartları enstitüsü, Ankara.

TS 708, 1996, **Beton çelik çubukları**. Türk standartları enstitüsü, Ankara.

TS 802, 1985, **Beton karışım hesap esasları**. Türk standartları enstitüsü, Ankara

Walker, P. R., Batayneh, M. K. and Regan, P. E., 1999, **Measured and design bond strength of deformed bars, including the effect of lateral compression**. Magazine of Concrete Research, 51, no. 1, 13-26.

Wang, C. K. and Salmon, C. G., 1965, **Reinforced concrete design**. International textbook company, Scranton, Pennsylvania, 754 s.

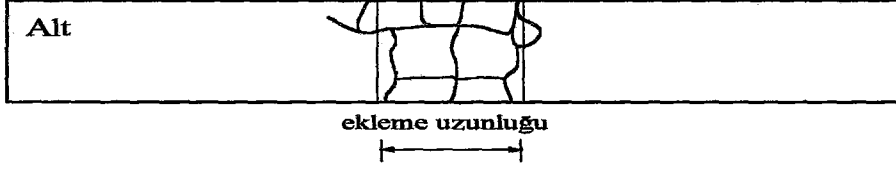
Yerlici, V. A. and Özturan T., 2000, **Factor affecting anchorage bond strength in high-performance concrete.** ACI Structural J. 2000, 499-507.

Yıldırım, M. Ş. ve Türk, K., 1995, **Elazığ ilindeki beton agregası kaynaklarının incelenmesi ve beton üretimindeki aksaklıkların irdelenmesi.** F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1995, 236-250.

Zuo, J. and Darwin, D., 2000, **Splice strength of conventional and high relative rib area bars in normal and high-strength concrete.** ACI Structural J. 2000, 630-641.



# **EK-1. DENEY KİRİŞ NUMUNELERİNE AİT ÇATLAK MODELLERİ**



a) I. Numune



b) II. Numune



c) III. Numune

**Şekil Ek-1.1 K12.  $M+(N=0)$  kirişine ait çatlak modelleri**



a) I. Numune



b) II. numune



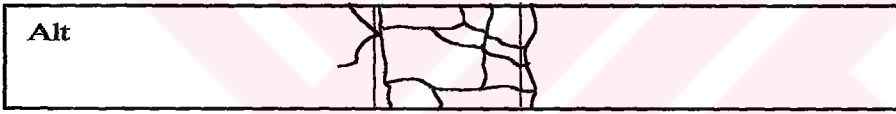
b) III. Numune

Şekil Ek-1.2 K16.  $M+(N=0)$  kirişine ait çatlak modelleri



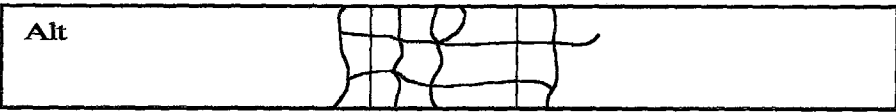
ekleme uzunluğu

a) I. numune



ekleme uzunluğu

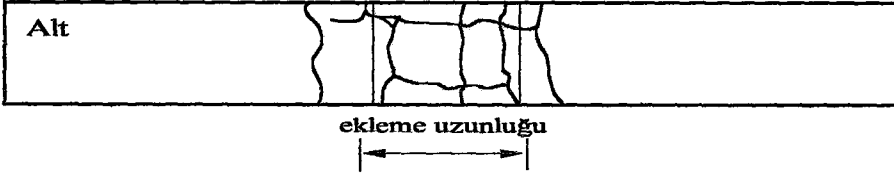
b) II. numune



ekleme uzunluğu

c) III. numune

Şekil Ek-1.3 K22.  $M+(N=0)$  kirişine ait çatlak modelleri



a) I. Numune

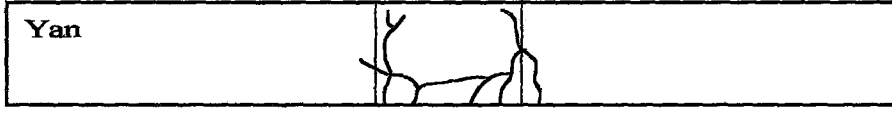


b) II. Numune



c) III. Numune

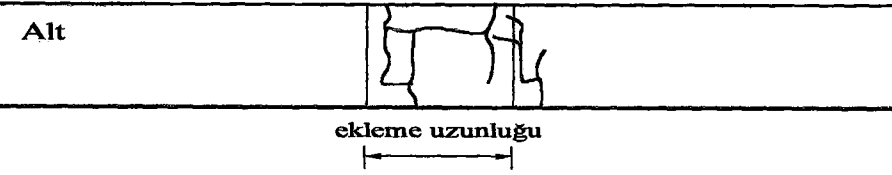
Şekil Ek-1.4 K12. M+(N=7.5) kirişine ait çatlak modelleri



a) I. Numune



b) II. Numune

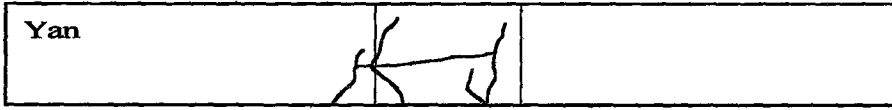


c) III. Numune

Şekil Ek-1.5 K16. M+(N=8.5) kirişine ait çatlak modelleri



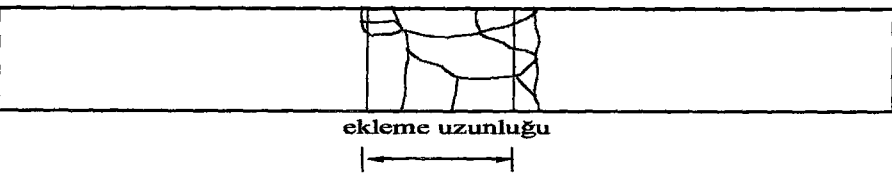
a) I. Numune



b) II. Numune



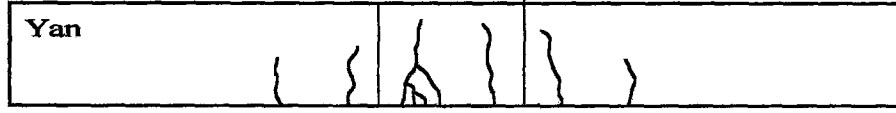
Yan



Alt

c) III. Numune

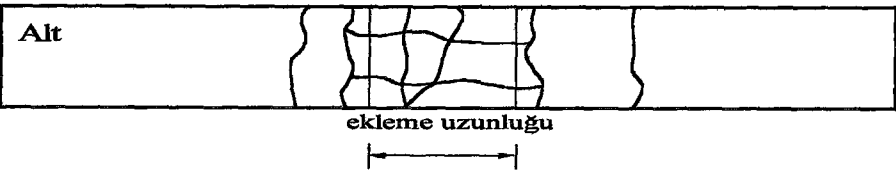
Şekil Ek-1.6 K22. M+(N=10) kirişine ait çatlak modelleri



a) I. Numune

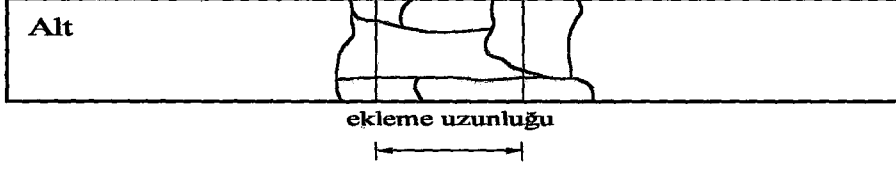
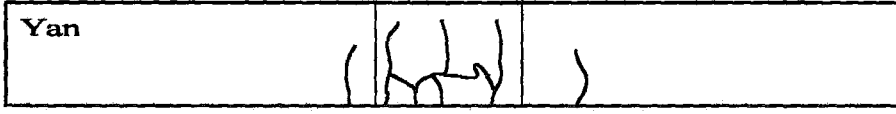


b) II. Numune



c) III. Numune

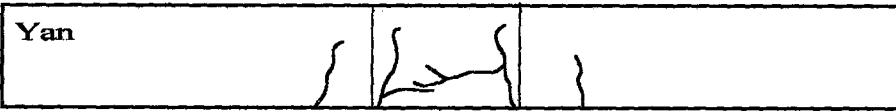
Şekil Ek-1.7 K12. M+(N=15) kirişine ait çatlak modelleri



a) I. Numune



b) II. Numune



c) III. Numune

Şekil Ek-1.8 K16. M+(N=17) kirişine ait çatlak modelleri



a) I. Numune



b) II. Numune



c) III. Numune

Şekil Ek-1.9 K22. M+(N=20) kirişine ait çatlak modelleri