

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETON TİPİ VE DONATI BOYUTLARININ BETON VE ÇELİK YÜZEYLERİ ARASI DAYANIMA ETKİSİNİN KÜR ŞARTLARI ALTINDA İNCELENMESİ

Harun TANYILDIZI

Doktora Tezi

Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

Bu tez, tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Salih YAZICIOĞLU

Üye: Prof. Dr. Mehmet ÜLKER

Üye: Doç. Dr. Ragıp İNCE

Üye: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin TEMİZ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Erdinç ARICI

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

ÖZET

Doktora Tezi

BETON TİPİ VE DONATI BOYUTLARININ BETON VE ÇELİK YÜZEYLERİ ARASI DAYANIMA ETKİSİNİN KÜR ŞARTLARI ALTINDA İNCELENMESİ

Harun TANYILDIZI

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

2006, Sayfa: 78

Bu çalışmada, beton tipi ve donatı boyutlarının beton ve çelik yüzeyleri arası dayanıma etkisi kür şartları altında incelenmiştir. Bu amaçla toplam 270 adet aderans deney numunesi ve 135 adet basınç dayanımı deney numunesi hazırlanmıştır. Bu numuneler 3, 7, 14 ve 28 gün farklı kür koşullarında bekletildikten sonra aderans ve basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur.

Çalışma sonucunda, kullanılan mineral katkılardan silis dumanı en yüksek aderans ve basınç dayanımı değerini vermiştir. Uygulanan kür şartlarında ise en yüksek aderans ve basınç dayanımı su kürü numunelerinden elde edilmiştir. Ayrıca maksimum ageraga çapının artmasıyla numunelerin aderans ve basınç dayanımları artmıştır, aynı zamanda kullanılan donatının çapının artmasıyla aderans ve basınç dayanımları azalmıştır. Varyans (Anova) analizi sonuçlarında ise, basınç dayanımı ve donatı çapının aderans dayanımını en çok etkileyen parametreler olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Aderans dayanımı, basınç dayanımı, Varyans (anova) analizi

ABSTRACT

PhD Thesis

THE INVESTIGATION OF THE STRENGTH EFFECT BETWEEN CONCRETE AND STEEL SURFACE OF CONCRETE TYPE AND REINFORCING DIMENSIONS UNDER CURING CONDITIONS

Harun TANYILDIZI

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Construction Education

2006, Page: 78

In this study, it investigated that effect between concrete and steel surface of concrete type and reinforcing dimensions under curing conditions. Because of this, 270 bond and 135 compression experimental samples was prepared. The samples under different curing conditions were tested at 3, 7, 14 and 28 days for bond and compressive strength.

In result of this study, the highest the bond and compressive strength results were obtained from the silica fume for all curing methods. The highest bond and compressive strength values were obtained from water cured specimens. Bond and compressive strength values increased with increase of size of aggregate and the same time decreased with increase of size of reinforcement. In the analysis of variance (Anova), the most effective parameters on the bond strength were found as compressive strength and size of reinforcement.

Key words: Bond strength, compressive strength, analysis of variance (Anova)

TEŞEKKÜR

Bu tezin önerilmesinde ve yönlendirilmesinde gerekli yardım ve ilgisini esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç.Dr. Salih YAZICIOĞLU' na teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Çalışmam esnasında ilgi ve desteğini gördüğüm Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisli Öğretim üyelerinden değerli hocalarım Prof. Dr. Mehmet ÜLKER ve Doç. Dr. Ragıp İNCE' ye teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmamın deneylerinde yardımcı olan değerli arkadaşım Araş. Gör. Ahmet ÇOŞKUN' a ve çalışmamın aderans deneyinde zamanını bana ayıran Araş. Gör. İlyas SOMUNKIRAN' a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	III
ABSTARCT	IV
TEŞEKKÜR	V
İÇİNDEKİLER	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	X
SİMGELER LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	4
3. ÇELİKLE BETON ARASINDAKİ ADERANS	8
3.1. Aderans Çeşitleri	9
3.1.1. Eğilme Aderansı	9
3.1.2. Kenetlenme Aderansı	10
3.2. Aderansın Nedenleri	13
3.2.1. Moleküler ve Kapiler Bağ Kuvvetleri	13
3.2.2. Çelik Çubukla Beton Arasındaki Sürtünme Kuvvetleri	15
3.2.3. Mekanik Dış Kuvvetler	20
3.3. Aderansa Tesir Eden Faktörler	22
3.4. Aderans Deneyleri	25
3.4.1. Çekip çıkarma Deneyi	26
3.4.2. İtip Çıkarma Deneyi	27
3.4.3. Geliştirilmiş Çekip-Çıkarma Deneyi	28
3.4.4. Eksantrik Çekip-Çıkarma Deneyi	28
3.4.5. Uç Uca Çekme Deneyi	29
3.4.6. Ek Çubuklu Uç Uca Çekme Deneyi	29
3.4.7. Tek Deney Çubuklu Çekme Deneyi	30
3.4.8. Kiriş Deneyleri	31
3.4.8.1. Bureau deneyi	31
3.4.8.2. Teksas deneyi	32
3.4.8.3. Standart Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi	32
3.4.8.4. Kiriş Çatlama Deneyi	33
3.5. Aderansta Çatlama Olayı	34
3.6. Aderans Kırılmasının Mekanizması	36
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	41
4.1. Kullanılan Malzeme	41

4.1.1. Çimento	41
4.1.2. Mineral Katkılar	41
4.1.2.1. Silis Dumanı	41
4.1.2.2. Uçucu Kül	42
4.1.2.2.1. Uçucu Küllerin sınıflandırılması	43
4.1.3. Akışkanlaştırıcı	44
4.1.4. Agregâ	45
4.1.5. Beton Karışım Oranları	45
4.1.6. Deney Numunelerin Hazırlanması	46
4.2. Beton Numunelere Uygulanan Kürler	48
4.2.1. Su Kür Koşulu	48
4.2.2. Beton Yüzeyinin Plastik Malzemedenden veya Su Geçirmez Kâğıttan Yapılmış Örtüden Kaplanarak Yapılan (Naylon Kür) Koşulu	49
4.2.3. Hava Kürü	49
4.3. Uygulanan Deneyler	50
4.3.1. Basınç Dayanımı Deneyi	50
4.3.2. Aderans Dayanımı Deneyi	51
5. DENEY SONUÇLARI VE DENEY SONUÇLARININ REGRESYON ANALİZİ	53
5.1. Deney Sonuçları	53
5.2. Deney Sonuçlarının Regresyon Analizi	61
6. ADERANS DENEY PARAMETRELERİNİN VARYANS (ANOVA) ANALİZİ	66
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	71
KAYNAKLAR	74

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1 Eğilme aderansı	10
Şekil 3.2 Aderans gerilmelerinin çubuk boyunca dağılımı	12
Şekil 3.3 Elastik aderans bağlantısı	14
Şekil 3.4 Normal kenetlenme durumunun gerilme yayılımı	15
Şekil 3.5 Önceden gerili donatı durumunda gerilme yayılımı	15
Şekil 3.6 Beton kütleyle kenetlenmiş çubuk	16
Şekil 3.7 Betona kenetlenmiş bir çubukta gerilme yayılımı	17
Şekil 3.8 ilk yükleme diyagramları (yükleme kademeli olarak yapılmıştır)	19
Şekil 3.9 Boşaltma diyagramları	19
Şekil 3.10 Yeniden yükleme diyagramları	20
Şekil 3.11 Betona kenetlenmiş aderansı geliştirilmiş bir çubuk	21
Şekil 3.12 Kenetlenmiş aderansı geliştirilmiş bir çubuğun çalışma şekli	21
Şekil 3.13 Kenetlenmiş aderansı geliştirilmiş bir çubuğun değişik noktalardaki kuvvet-gerilme diyagramları	22
Şekil 3.14 Değişik konumlardaki donatıların aderans özellikleri	23
Şekil 3.15 Minimum pas payları	24
Şekil 3.16 Çekip çıkarma (pull-out) deneyi	27
Şekil 3.17 Kenetlenme boyunun sınırlanması	27
Şekil 3.18 Geliştirilmiş çekip çıkarma deneyi	28
Şekil 3.19 Eksantirik-çekip çıkarma deneyi	28
Şekil 3.20 Uç uca çekme deneyi	29
Şekil 3.21 Ek çubuklu uç uca çekme deneyi	30
Şekil 3.22 Tek deney çubuklu çekme deneyi	30
Şekil 3.23 Bureau deneyi	31
Şekil 3.24 Teksas deneyi	32
Şekil 3.25 Standart mafsallı belçika deneyi	33
Şekil 3.26 Çekme donatısı sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli olarak yerleştirilmiş kiriş deneyi	34
Şekil 3.27 Nervürlü donatının neden olduğu aderans çatlaması	35
Şekil 3.28 Aderansın oluşturduğu iç çatlaklar	35
Şekil 3.29 Aderans için boru analojisi	36
Şekil 3.30 Boru analojisinde etriye katkısı	39
Şekil 4.1 Aderans deney kalıbı	47
Şekil 4.2 Standart su kür koşulu uygulanan numuneler	48

Şekil 4.3 Naylon kür koşulu uygulanan numuneler	49
Şekil 4.4 Hava kür koşulu uygulanan numuneler	50
Şekil 4.5 Aderans deney düzeneği	51
Şekil 5.1 Su kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımı deneyi sonuçları	54
Şekil 5.2 Su kürü uygulanan düz demirli numunelerin aderans dayanımı deneyi	54
Şekil 5.3 Su kürü uygulanan nervürlü demirli numunelerin aderans dayanımı deneyi sonuçları	55
Şekil 5.4 Naylon kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımı deneyi sonuçları	56
Şekil 5.5 Naylon kürü uygulanan düz demirli numunelerin aderans dayanımı deneyi sonuçları	56
Şekil 5.6 Naylon kürü uygulanan nervürlü demirli numunelerin aderans dayanımı deneyi sonuçları	57
Şekil 5.7 Hava kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımı deneyi sonuçları	57
Şekil 5.8 Hava kürü uygulanan düz demirli numunelerin aderans dayanımı deneyi sonuçları	58
Şekil 5.9 Hava kürü uygulanan nervürlü demirli numunelerin aderans dayanımı deneyi sonuçları	58
Şekil 5.10 28 günlük 8mm agrega dane çapı ve 14 mm donatı çaplı numunelerin aderans dayanımı deneyi sonuçları	59
Şekil 5.11 28 günlük 16 mm agrega dane çapı ve 14 mm donatı çaplı numunelerin aderans dayanımı deneyi sonuçları	60
Şekil 5.12 28 günlük 16 mm agrega dane çapı ve 20 mm donatı çaplı numunelerin aderans dayanımı deneyi sonuçları	60
Şekil 5.13 Su kürü uygulanan numunelere lineer regresyon analizi sonucunda elde edilen amprık denkleme ait grafik	62
Şekil 5.14 Naylon kürü uygulanan numunelere lineer regresyon analizi sonucunda elde edilen amprık denkleme ait grafik	62
Şekil 5.15 Hava kürü uygulanan numunelere lineer regresyon analizi sonucunda elde edilen amprık denkleme ait grafik	63
Şekil 5.16 Su kürü uygulanan numunelere lineer olmayan regresyon analizi sonucunda elde edilen amprık denkleme ait grafik	64
Şekil 5.17 Naylon kürü uygulanan numunelere lineer olmayan regresyon analizi sonucunda elde edilen amprık denkleme ait grafik	64
Şekil 5.18 Hava kürü uygulanan numunelere lineer olmayan regresyon analizi sonucunda elde edilen amprık denkleme ait grafik	65
Şekil 6.1 Varyans (Anova) analizi sonucuna göre parametrelerin aderans dayanıma % etkisi	69

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1 Çimento, uçucu kül ve silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri	44
Tablo 4.2 Deneylerde kullanılan akışkanlaştırıcının teknik özellikleri	45
Tablo 4.3 Deneylerde kullanılan agregaya ait özellikler	45
Tablo 4.4 Maksimum agrega tane çapı 16mm olan numuneler için kullanılan betonun karışım oranları	46
Tablo 4.5 Maksimum agrega tane çapı 8 mm olan numuneler için kullanılan betonun karışım oranları	46
Tablo 6.1 Aderans dayanımı parametreleri ve seviyeleri	67
Tablo 6.2 Aderans dayanımı için ANOVA sonuçları	68

SİMGELER LİSTESİ

- A =Çubuk en kesit alanı
 F_{A0} =Bir faktörün F testi değeri
 f_c =Basınç dayanımı
 f_{ctd} =Hesapta kullanılacak beton çekme dayanımı
 f_{ctk} =Betonda çekme dayanımı (karakteristik dayanım)
 f_{yd} =Hesapta kullanılacak çelik akma dayanımı
 f_{ywk} =Hesapta kullanılacak etriye veya fret akma dayanımı
 g = Yer değiştirme
 l =Aderans boyu
 $L_{ij}=j$ 'nci testteki i 'nci performansın kayıp fonksiyonu
 N =Herhangi bir A parametresinin seviye sayısı
 $\emptyset$ =Çubuk çapı
 p =Çubuk çevresi
 P =Kırılma yükü
 r = Korelasyon katsayısı
 r_a =Bir denemedeki testlerin sayısı
 R^2 = Eğriye ait belirlilik katsayısı
 SS_m =Ortalamanın kareleri toplamı
 T =Donatıdaki çekme kuvveti
 u =Çubuğun çevre uzunluğu
 V_A =Faktör A' nın varyansı
 x = Çubuk boyunca ölçülen absis
 y =Her bir test için ölçülen değer
 z =Moment kolu
 ε =Deformasyon
 σ_a = Çelik gerilmesi
 σ_{ct} =Betondaki çekme gerilmesi
 τ =Aderans gerilmesi
 τ_d = Kaymada aderans gerilmesinin sabit değeri
 Γ =Enine elastisite modülüne benzer sabit
 η =S/N oranı

1. GİRİŞ

Çelik ve beton arasındaki bağ, betonarmenin başlangıcından beri birçok araştırmacı ve uygulayıcının dikkatlerini üzerinde toplamış ve bu konuda araştırmalar yapılmıştır. Yüksek mukavemetli beton çeliklerinin ortaya çıkmalarından önce, betonarmede aderans üzerine son sözün söylenmiş olduğu, nedenlerinin ve etkilendiği faktörlerin tümüyle bilindiği şekilde yaygın bir görüş mevcuttu. Yüksek mukavemetli çeliklerin uygulama alanındaki ilk öncüleri, yuvarlak ve düz yüzeyli enkesitleriyle, klasik yumuşak betonarme demirlerinden pek farklı olmayan aderans özelliklerine sahiptiler. Ancak bir süre sonra bu yeni tür çeliklerin yüksek mukavemetlerinden yararlanabilmek için betonla bağlantılarının artırılması gerektiği anlaşılmış ve yüzeylerindeki çıkıntı, girinti ve nervürlerle aderansı geliştirilmiş modern betonarme donatısı türleri uygulama alanına yayılmıştır. Bunun yanı sıra yüksek mukavemetli betonların da geniş ölçüde kullanılmaya başlamasıyla aderans problemi yeniden önem kazanmıştır [1].

Endo ve Shimazu [2], donatının beton içindeki ankraj boyu hakkında deneyler yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, yeterli ankraj boyunda kırılmanın 45°' lik açıyla olduğunu ve eğer ankraj çok derin ise kırılmanın donatının çekme etkisi altında kopması biçiminde olduğunu görmüşlerdir.

Yei, Chang ve Tsai [3], üzerinde epoksi ile kaplanmış betonarme demiri ve uçucu kül katkılı beton arasındaki aderans dayanımını araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, uçucu kül/epoksi oranının 0,5 olduğunda en iyi aderans dayanımının olduğunu görmüşlerdir.

Masao, Tomohide ve Nariaki [4], uçucu kül, silis dumanı ve alçı taşının aderans dayanımı üzerinde etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, katkıların içerisinde bulunan SiO₂ ve CaO içeriği aderans dayanımını 28. günden sonra artırdığını ve kontrol betonunu geçtiğini görmüşlerdir.

Abbasi ve Hong [5], cam fiberin ve korozyona uğramış donatının farklı sıcaklıklarda (20–120° C) aderans dayanımı üzerinde etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, sıcaklık artıkça aderans dayanımı düşmüştür ve oda sıcaklığında deney numunelerinde daha da yüksek aderans dayanımının olduğunu görmüşlerdir.

Fabbrocino, Verderame ve Manfredi [6], eski betonarme yapılarında kullanılan düz demir ve 180° dereceli kancalı düz demirin aderans dayanımı üzerinde bir araştırma yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, aderans dayanımı üzerinde kancalı donatının bulunduğu yerin büyük etkisinin olduğunu görmüşlerdir.

Fang, Lundgren, Chen ve Zhu [7], donatı korozyonunun aderans dayanımı üzerinde etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, düz donatıda korozyona uğramış deney

numuneleri korozyona uğramamış deney numunelerine göre yaklaşık 2,5 katı kadar aderans dayanımının arttığını görmüşlerdir.

Soylev ve François [8], donatının korozyonu üzerine beton donatı ara yüzeyinin (donatı altında taze betonun yerleşmesi, segregasyonu ve bünyeden suyun atılması (kusma) sonucu ortaya çıkan boşlukların) etkisini incelenmiştir. Çalışmalarının sonucunda, ankraj uzunluğunun donatı ara yüzeyinde korozyona sebep olup aderansı düşürmesinde büyük bir neden olduğunu görmüşlerdir.

Malvar, Cox ve Cochran [9], dört faklı karbon fiberin hafif betondaki aderans dayanımı üzerine bir araştırma yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, karbon fiberin tipinin aderans dayanımı üzerinde büyük etkisi olduğunu ve farklı karbon fiber türleri arasında yaklaşık iki katı kadar aderans dayanımı farkı olduğunu görmüşlerdir.

Jiang [10], yüksek oranda uçucu külün kullanımıyla agregası ve çimento arasındaki aderans dayanımı üzerine bir araştırma yapmıştır. Çalışmasının sonucunda, beton karışımına yüksek oranda uçucu kül eklenmesiyle betonda yüksek basınç dayanımı elde etmiştir ve betonda ne kadar yüksek basınç dayanımı elde edilirse o kadar çok aderans dayanımının arttığını görmüştür.

Özkul, Mutlu ve Sağlam [11], sertleşmiş betona bir bağlayıcı madde kullanılarak ankraj elemanlarının aderans dayanımı üzerine bir araştırma yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, donatı çapı ne kadar küçükse aderans dayanımının da o kadar büyük olduğunu ve kullanılan 3 ayrı bağlayıcıdan Sikadur-42 epoksisi ile dökülen betonun en büyük aderans dayanımını sağladığını görmüşlerdir.

Chiang ve Tsai [12], yüksek sıcaklığa maruz kalmış olan donatıların aderans dayanımının sıcaklık-zaman analizi üzerine bir araştırma yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, 200°C veya daha yüksek sıcaklığa maruz kalmış deney numunelerinin aderans dayanımının azaldığını görmüşlerdir.

Baldwin ve Clark [13], yetersiz ankraj ve kenetlenme boyları üzerine bir araştırma yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, ortalama kırılma yükünün sabit pas payı altında ankraj boyu ile lineer olarak değiştiğini görmüşlerdir.

Harajili, Hout ve Jalkh [14], lifli beton ile birlikte kullanılan çelik çubukların aderansı ve sıyrılma karakteristikleri üzerine bir araştırma yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, eğer göçme sıyrılma şeklinde olursa liflerin aderans dayanımına katkısının olmadığını görmüşlerdir.

Mu, Meyer ve Shimanovich [15], düzgün fiber ağı kullanarak betondaki aderans dayanımı üzerine bir araştırma yapmıştır. Çalışmasının sonucunda, fiber ağı betonarme elemanın mekanik özelliklerinin ve aderans karakteristiklerinin büyük gelişme gösterdiğini görmüşlerdir.

Yapılan bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde, tez konusu ile ilgili yapılmış önemli çalışmaların özetleri bulunmaktadır. Üçüncü bölümde, kenetlenme ve aderans hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde, farklı kür koşulları altında (su, hava ve naylon), farklı mineral katkıları (uçucu kül ve silis dumanı), farklı donatı çapları ve maksimum agrega tane çapları kullanılarak 3, 7, 14 ve 28 gün sonunda oluşacak aderans dayanımına ait deneysel çalışmaya ve deney sonuçlarından elde edilen ampirik denkleme yer verilmiştir. Beşinci bölümde ise, tez çalışmasının deney sonuçları gözden geçirilerek genel bir değerlendirme yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışmasında, farklı kür koşulları altında (su, hava ve naylon), farklı mineral katkıları (uçucu kül ve silis dumanı), farklı donatı çapları (14 ve 20 mm) ve maksimum agregata tane çapları (8 ve 16 mm) kullanılarak 3, 7, 14 ve 28 gün sonunda oluşacak aderans dayanımını araştırmak amaçlanmıştır. Çalışmayı yapabilmek için literatür araştırması yapılmıştır. Bu amaçla tezle ilgili olarak daha önce yapılan araştırmalar aşağıda verilmiştir:

- a. Lundgren [16] çalışmasında, aderans davranışı üzerinde korozyon etkisini araştırmak için modelleme yapmıştır. Bunun için deneylerinde hem korozyona uğramış hem de korozyona uğramamış donatıları kullanmıştır. Araştırmasında donatı korozyonunun beton içerisinde çatlaklar oluşturduğunu gözlemlemiştir. Böylece aderans ve korozyon arasında bir ilişki olduğunu bulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda, donatıda oluşan pasın aderansa büyük oranda etki ettiğini tespit edilmiştir.
- b. Lorenzis, Rizzo ve Tegola [17] makalelerinde, aderans performansı üzerinde kritik parametrelerin etkisini analiz etmek ve fiber donatılı yolların aderans dayanımını araştırmak için bir çalışma yapmışlardır. Önceki araştırmalardaki numune tiplerinin dışında daha etkili ve güvenli aderans değerleri elde etmek için yeni bir deney yöntemi kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada sonuç olarak, bu yeni deney yöntemi eksantriklik problemine çözüm bulmuştur.
- c. Wang ve Liu [18] çalışmalarında, yeni bir analitik modellemeyle beton ve nervürlü donatı arasındaki aderans dayanımını araştırmışlardır. Bu modelle, iç radyal basınca maruz kalmış ince çeperli silindirin çatlak çözümü yapılmıştır. Önceki çözümlerde çatlak sayısının düşünülen aksine, çekmedeki betonun ortalama gerilme, şekil değiştirme ve çatlakların betonun davranışını tanımlamak için kullanılmıştır. Bu yeni analitik modelle bulunan sonuçlar, klasik yöntem ve önceden yapılan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda sunulan analitik yöntemin kullanılabilirliği kanıtlanmıştır.
- d. Chan ve Victor [19], çimento matrisi içindeki poly-etilen fiberlerinin yüzeysel özelliklerinin yaş gelişimi üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Poly-etilen fiberlerli numunelerin yüzeysel aderans dayanımı 7. günde daha yüksek elde edilmesine rağmen 14. ve 28. günlerde daha düşük değerler elde edilmiştir. Yapılan bu çalışma sonucunda, poly-etilen fiberlerin erken yaşlarda daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır.
- e. Kunieda, Kuriharab, Uchida ve Rokugoa [20] makalelerinde, betonarme yapıların yüzey bağlantılarındaki aderans özelliklerini araştırmışlardır. Bunun için eski ve yeni betonlar bağlantılarla birleştirilerek deneyler yapılmıştır. Yapılan bu deneyler sonucunda, beton

bağlantı yüzeyleri için kırılma enerjisi grafiği çekme gerilmesi diyagramından daha hassas olduğu ortaya çıkmıştır.

- f. Nakaba, Kanakubo, Furuta ve Yoshizawa [21], beton ve fiber donatı arasındaki aderans davranışını incelemişlerdir. Yapılan deneylerde değişik tipteki fiberler ve betonlar kullanılarak aderans gerilmeleri bulunmuştur. Nümerik analiz yapılarak bulunan değerlerle deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Yapılan bu deneyler sonucunda, kullanılan FRP' li betonun aderansı fazla değiştirmediğini ve betonun mukavemetinin daha çok etkilediği tespit edilmiştir.
- g. Basche, Freitag, Jauck ve Schenck [22] makalelerinde, karbon fiberlerinin ısı yükleri altında aderans davranışını ve özelliklerini saptamak için deneyler yapmışlardır. Yapılan bu deneyler sonucunda, karbon fiberin kalınlığı arttıkça betonun aderansının arttığı görülmüştür.
- h. Dehn, Holschemacher, Lange ve Saidowsky [23] çalışmalarında, hafif betonunun tekrarlı yükler altında aderans dayanımını bulmak için deneyler yapmışlardır. Bu çalışma için agrega tipine (Liapor ve Ulopor) göre iki farklı karışım hazırlanmıştır. Yapılan bu deneyler sonucunda, Uloporlu agregayla hazırlanan deney numunelerinin aderans dayanımı Liaporlu agregayla hazırlanan deney numunelerine göre daha yüksek çıkmıştır. Bu hazırlanan iki karışımda aderans dayanımı azalırken deplasman arttığı görülmüştür.
- i. Chang [24] makalesinde, iki farklı çözeltiye maruz kalmış olan beton numunelerin aderansın özelliklerini araştırmıştır. Deneylerinde çözelti olarak NaOH ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kullanmıştır. Yapılan bu deneyler sonucunda, pH değerinin artması aderans dayanımını azaltıcı yönde etki ettiği görülmüştür. Aderansın azalması yaklaşık olarak %40–60 civarında olduğu görülmüştür.
- j. Kayali ve Yeomans [25] nervürlü donatı, galvanizlenmiş donatı ve epoksiyle kaplanmış olan donatının aderans dayanımına etkisini araştırmak için deneyler yapmışlardır. Bu çalışmalarındaki amaçları galvanizlenmenin aderansa etkisi olup olmadığını araştırmaktır. Yapılan bu deneyler sonucunda, epoksiyle kaplanmış olan donatının aderans dayanımının epoksiyle kaplanmamış donatının aderans dayanımına göre %20 azaldığını ve galvanizlenmiş donatının aderans dayanımının galvanizlenmemiş donatının aderans dayanımı arasında belirli bir azalma veya artma olmadığını görülmüştür.
- k. Fu ve Chung [26] çalışmalarında, karışımlarında çimento ağırlığının % 0,4 oranında metil alkol, %20 oranında Latex ve çimento ağırlığının %15 oranında silis dumanı kullanarak donatı ve beton arasındaki aderans dayanımını artırmayı amaçlamışlardır. Yapılan bu deneyler sonucunda, en yüksek aderans dayanımı Latex kullanılan deney numunelerinde

görülmüştür. Latex kullanılan deney numunelerini metil alkol+ silis dumanı katılan deney numuneleri takip ettiği görülmüştür.

- l.** Fu ve Chung [27] diğer bir çalışmalarında, donatı ve beton arasındaki aderans dayanımı üzerinde elektrik direncinin etkisini araştırmışlardır. Bunun için aderans numunelerine elektrik akımı verilerek belirli yaşlarda numunelerin aderans dayanımlarını ve dirençlerini ölçmüşlerdir. Yapılan bu deneyler sonucunda, donatı ve beton arasındaki aderans dayanımı 7. günden 28. güne kadar azalırken dirençler 7. günden 28. güne kadar artmaktadır. Bu artma ve azalmanın nedeni rötreden dolayı meydana geldiğini açıklamışlardır.
- m.** Gorst ve Clark [28], beton da meydana gelen sülfat etkisinin aderans dayanımı üzerinde etkisini araştırmışlardır. Deneylerinde sülfat etkisine maruz kalmış aderans numuneleri ve sülfat etkisine maruz edilmemiş aderans numuneleri kullanılmıştır. Yapılan bu deneyler sonucunda, sülfat etkisine maruz kalmış olan aderans numunelerinde sülfat etkisine maruz kalmamış aderans numunelerine göre aderans dayanımı ortalama olarak % 15 azalma olduğu görmüşlerdir.
- n.** Xiong, Cui, Liqiang ve Jiang [29] makalelerinde, tamir malzemeleri ve beton arasındaki aderans dayanımı üzerinde hidroklorik asidin etkisi üzerine bir araştırma yapmışlardır. Deneylerinde %5 oranında asidin aderans dayanımı üzerinde etkisini incelemek için uçucu kül katkısı da kullanmışlardır. Yapılan bu deneyler sonucunda, %5 hidroklorik aside maruz kalmış aderans numunelerinin aderans dayanımı % 8,6 daha yüksek olduğunu görmüşlerdir.
- o.** Esfahani ve Rangan [30], çekme bağlantılarının aderans dayanımı üzerinde enine donatının etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu çalışma için yüksek dayanımlı beton kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, enine donatının aderans dayanımını hesaplamak için bir denklem sunmuşlardır.
- p.** Tighiouart, Benmokrane ve Gao [31] çalışmalarında, farklı uzunluktaki ve farklı türdeki nervürlü çubukların aderans dayanımı ile fiber donatılı çubukların aderans dayanımını karşılaştırılmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, fiber donatılı çubukların aderans dayanımı nervürlü çubukların aderans dayanımına göre daha düşük çıkmıştır. Deneylerde kullanılan çubukların uzunluklarının artmasından dolayı ortalama aderans dayanımının azaldığını görmüşlerdir.
- q.** Katz ve Berman [32], beton ve fiber donatı arasındaki aderans dayanımı üzerinde yüksek sıcaklığın etkisini araştırmışlardır. Yapılan deney sonucunda, düşük sıcaklıkta aderans dayanımı %80–90 azalmanın olduğu görülmüştür. Aderans deneyinde kayma-yük davranışı değişimi değerleri de bulunmuştur. Yarı ampirik bir model sıcaklık değişiminde aderans dayanımındaki azalmayı tanımlamak için geliştirilmiştir.

- r. Ogün [33] yüksek lisans tez çalışmasında, epoksinin donatı aderansına etkisini araştırmıştır. Yapılan bu tez çalışması sonucunda, hazırlanan blokların delik çapları donatı çapına ne kadar yakınsa dayanımın o kadar iyi sonuç verdiği sonucuna varmıştır.
- s. Türk [34] doktora tezinde, bileşik eğilmeye maruz betonarme elemanlarda donatı aderansının beton özelliklerine bağlı olarak incelemiştir. Yapılan bu tez çalışması sonucunda, hem basit hem de bileşik eğilme durumunda, giriş numunelerinde kullanılan boyuna donatının çapı arttıkça, donatı aderans dayanımının azaldığı sonucuna varmıştır.
- t. Ünal [35] yüksek lisans tez çalışmasında, betonun agregata tane çapı ve dayanımına bağlı olarak değişimini incelemiştir. Yapılan bu tez çalışması sonucunda, beton numunelerde kullanılan dane çapı büyüdükçe aderans kuvvetinin de arttığını ve betonun basınç mukavemeti arttıkça aderans kuvvetinin arttığı sonucuna varmıştır.
- u. Çınar [36] yüksek lisans tezinde, Karapınar volkanik agregasından imal edilen hafif betonların aderans davranışını araştırmıştır. Yapılan bu tez çalışması sonucunda, düşey konumda duran çubukların hafif betonla aderansı, aynı konumdaki normal beton-donatı arasındaki aderans ile aynı olduğu sonucuna varmıştır.
- v. Baradan [37] yüksek lisans tezinde, çimento tipinin donatı-beton aderansına etkisini incelemiştir. Deneyler için Ege bölgesinin iklim koşulları dikkate alınarak normal kür koşulu ve yüksek sıcaklıkta kür koşulu kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, aderans dayanımı üzerinde yüksek sıcaklığın büyük etkisi olduğu sonucuna varmıştır.

Yapılan literatür çalışması ışığında farklı kür koşulları altında (su, hava ve naylon), farklı mineral katkıları (silis dumanı ve uçucu kül), farklı donatı çapları (14 ve 20 mm) ve maksimum agregata tane çapları (8 ve 16 mm) kullanılarak 3, 7, 14, 28 gün sonunda aderans dayanımını araştıran bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu yüzden dolayı bu tez çalışması literatürdeki bu eksikliği gidermek amacıyla yapılmıştır.

3.ÇELİKLE BETON ARASINDAKİ ADERANS

Betonarmenin, betonla çeliğin beraber çalıştığı kompozit bir malzeme olduğu bilinmektedir. Beraber çalışma özelliğinin ancak çeliğin beton içerisinde kaymaması halinde mümkün olacağı açıktır. Kaymanın olmaması için de iki malzeme arasında bir bağ kuvveti meydana gelebilmeli ve bu kuvvet kalıcı olmalıdır. Deneylerle varlığı kanıtlanan bu bağ kuvvetine aderans denir. Aderans olayı betonarmenin en önemli faydalı özelliklerinden biridir. Bu suretle iki malzemenin beraberce kullanılması ve birbirini tamamlaması mümkün olur. Donatıda meydana gelen gerileme azalması ve çoğalması komşu beton bölgelerine gerilme geçişiyle meydana gelir. Bu durum düz yüzeyli demir çubuklarda kayma gerilmelerinin doğrudan oluşmasıyla açıklanabilir. Nervürlü çubuklarda ise geçişin nervür etrafında oluşan karmaşık bir gerilme durumunun bileşkesi olarak ortaya çıkan kayma gerilmeleri tarafından sağlandığı kabul edilebilir. Her iki durumda da ortaya çıkan kayma gerilmeleri aderans gerilmeleri olarak da isimlendirilir.

Genellikle aderansın çubuk düz yüzü ile çimento harcı arasındaki kimyasal yapışma sonucu ortaya çıktığı düşünülürse de, düşük zorlamalar bile bu yapışmayı çözer ve çubuk sıyrılır. Bu tür sıyrılmanın başlamasıyla sürtünme ve kayma etkisi ile oluşan aderans başlar. Sürtünmeden ortaya çıkan aderans donatı çubuğunun pürüzlülüğüne bağlıdır. Dikkatli incelendiğinde düz yüzeyli çubukta da pürüzlülüğün bulunduğu görülür. Donatının paslanmaya başlamasıyla pürüzlülükle beton ile çelik arasındaki aderans artar. Ancak pasın bir tabaka oluşturması, donatının bu tabakadan sıyrılmasını kolaylaştırarak, aderansın kolayca çözülmesine sebep olur [38].

Beton bir bloğa, bir çelik çubuk gömülsün ve bu çubuğun gömülmüş olduğu beton sertleştikten sonra çubuk çekilip çıkarılmak istensin. Çelik çubuğun beton içindeki bir noktasında çelik uzaması (çekme kuvveti, betonun rötresi, sünmesi gibi tesirlerin etkisi dahil olmak üzere) ϵ_e ve bu noktada çelikle temasta olan beton lifteki uzama da ϵ_b olmaktadır. Bu iki uzama arasındaki bağıntı;

$$\epsilon_e = \epsilon_b \quad (3.1)$$

olarak yazılabilir. Bu tanım, bir beton bloğa gömülmüş yani ankre edilmiş bir çelik çubukla beton arasındaki aderansın, deformasyonlar tipinden değerini vermektedir [39].

Çelik çubukla beton arasındaki aderansı deformasyonlar cinsinden veren 3.1 denklemi gergilerde ve eğilmeye maruz elemanların çekme bölgelerinde uzamanın belirli bir değerine kadar doğrudur.

Betonun uzama limitinin çeliğin uzama kapasitesi yanında çok küçük olması nedeniyle, çelikte uzamalar belirli bir değeri geçince beton çatlar ve 3.1 bağıntısı çatlama yerlerinde geçerliliğini kaybeder. Bu tip elemanlarda eleman boyunca mevcut çatlakların çubuk hizasındaki genişlikleri toplamının çubuk boyuna oranı ϵ_0 olsun. Çelik çubukla beton arasında kayma olmadığını gösteren ve aderansı deformasyonlar cinsinden ifade eden bağıntı,

$$\epsilon_0 = \epsilon_e + \epsilon_b \quad (3.2)$$

olarak yazılabilir.

Buna göre betonarme elemanlarda birbirinden farklı iki şekilde aderans var olduğu söylenebilir. Bunlar;

1. Beton bir bloğa gömülmüş, ankre edilmiş çubukların çekme veya basınç kuvveti ile çıkıp sıyrılmasına engel olan aderans ankraj aderansı,
2. Betonarme bir taşıyıcı elemanda iki malzemenin beraber çalışmasını sağlayan ve o elemanlarda çatlama durumunun şekli üzerinde en önemli rol oynayan aderans bünye veya eğilme aderansı olarak tanımlanmaktadır. Bu eğilme aderansın türü için 3.2 denklemi geçerli olmaktadır.

3.1. Aderans Çeşitleri

Betonarme bir elemanda, beton ile donatı arasında iki tür aderans meydana gelmektedir.

3.1.1. Eğilme Aderansı

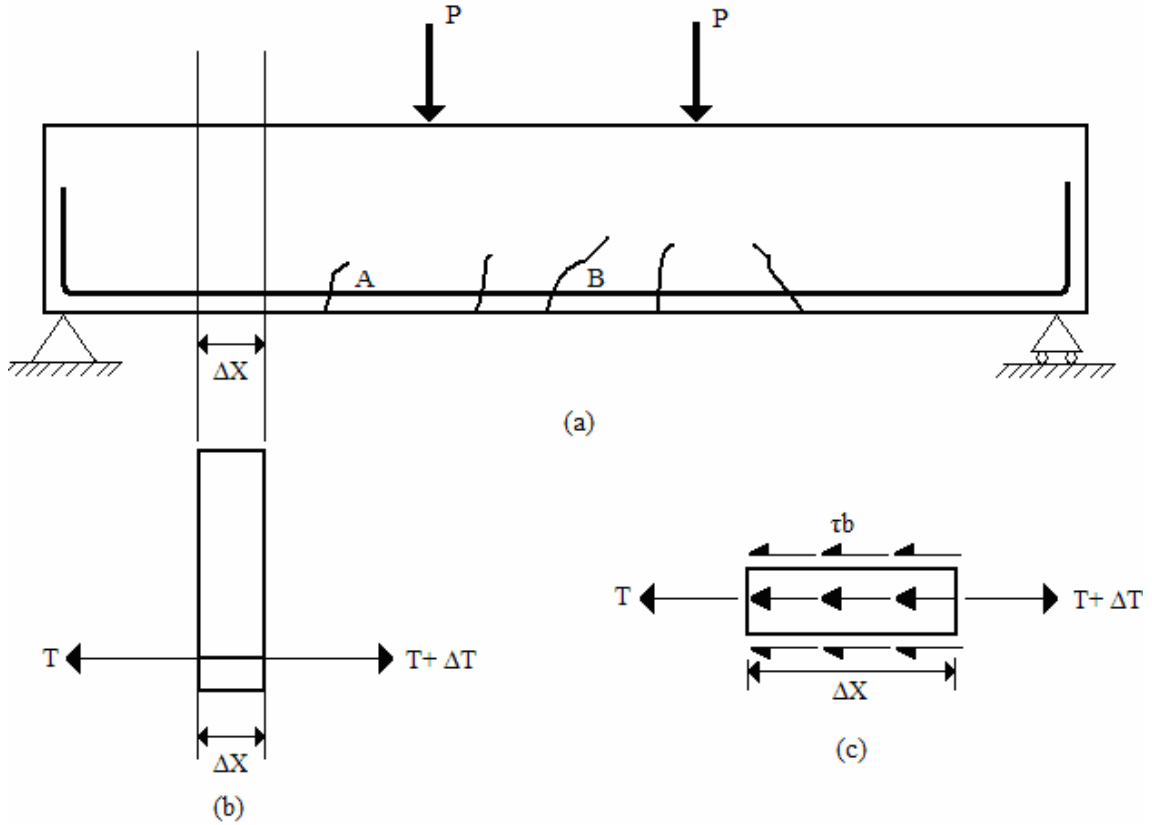
Eğilme altındaki bir betonarme elemanda momentin bir kesitten diğerine değişebilmesi için, donatıdaki gerilmenin de değişmesi gerekir. Şekil 3.1' de gösterildiği gibi donatıdaki gerilmenin değişebilmesi, ancak donatı çevresinde oluşan ve aderans gerilmeleri olarak adlandırılan kesme gerilmelerinin var olması ile mümkündür. Denge koşulu nedeniyle, Δx uzunluğundaki çubuğun çevresine etkiyen aderans gerilmelerinin toplamı, çubuğun iki ucundaki çekme kuvvetleri farkına eşit olmalıdır. Aderans gerilmesi;

$$\tau_b(u)\Delta x = \Delta T = \frac{\Delta M}{z} \quad (3.3)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemde τ_b , aderans gerilmesi, z moment kolu, u ise çubuğun çevre uzunluğudur. $\Delta M / \Delta x = V$ olduğundan, denklem 3.3 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\tau_b = \frac{V}{u(z)} \quad (3.4)$$

Bu denklem, eğilme aderansı olarak tanımlanır. 3.4 denkleminde V kesme kuvvetidir [23].



Şekil 3.1 Eğilme aderansı

3.1.2. Kenetlenme Aderansı

Betonarmede, donatı beton kütle içine yeterli uzunlukta gömülmüşse, çubuğu çekip çıkartmak mümkün değildir. Gömülme boyunun yeterli olmadığı durumlarda ise, çubuk yüzeyinin geometrisine bağlı olarak, çubuk sıyrılıp çıkabilir veya etrafındaki beton kütleyle yarabilir. Betona gömülen çubuk boyu, “kenetlenme boyu” olarak adlandırılır ve bu tür aderansa da “kenetlenme aderansı” denir. Kenetlenmenin yeterli olabilmesi için donatı akma gerilmesine eriştiğinde veya deprem olduğu gibi donatı akma ötesinde belirli bir birim deformasyona ulaştığında, çubuk betondan sıyrılmamalı ve betonu yarmamalıdır.

Şekil 3.2’ de beton bir kütleyle gömülen bir çubuk gösterilmiştir. Çubuğun kenetlenme boyunca etkiyen bağ kuvvetleri (τ_b olarak gösterilmiştir), uygulanan çekme kuvvetini dengelemek durumundadır. Donatıdaki çekme kuvveti, $T=A_s \sigma_s$ olarak gösterilmiştir. Yeterli kenetlenmenin sağlanabilmesi için, $\sigma_s =f_{yd}$ olduğunda, çubuk çevresinde oluşan bağ kuvvetlerinin toplamının, çubuğun çekme dayanımına eşit olması gerekir. Bunu ifade eden denklem;

$$\sum (\tau_b \times \text{birim yüzey alanı}) = T = \tau_b \times A \quad (3.5)$$

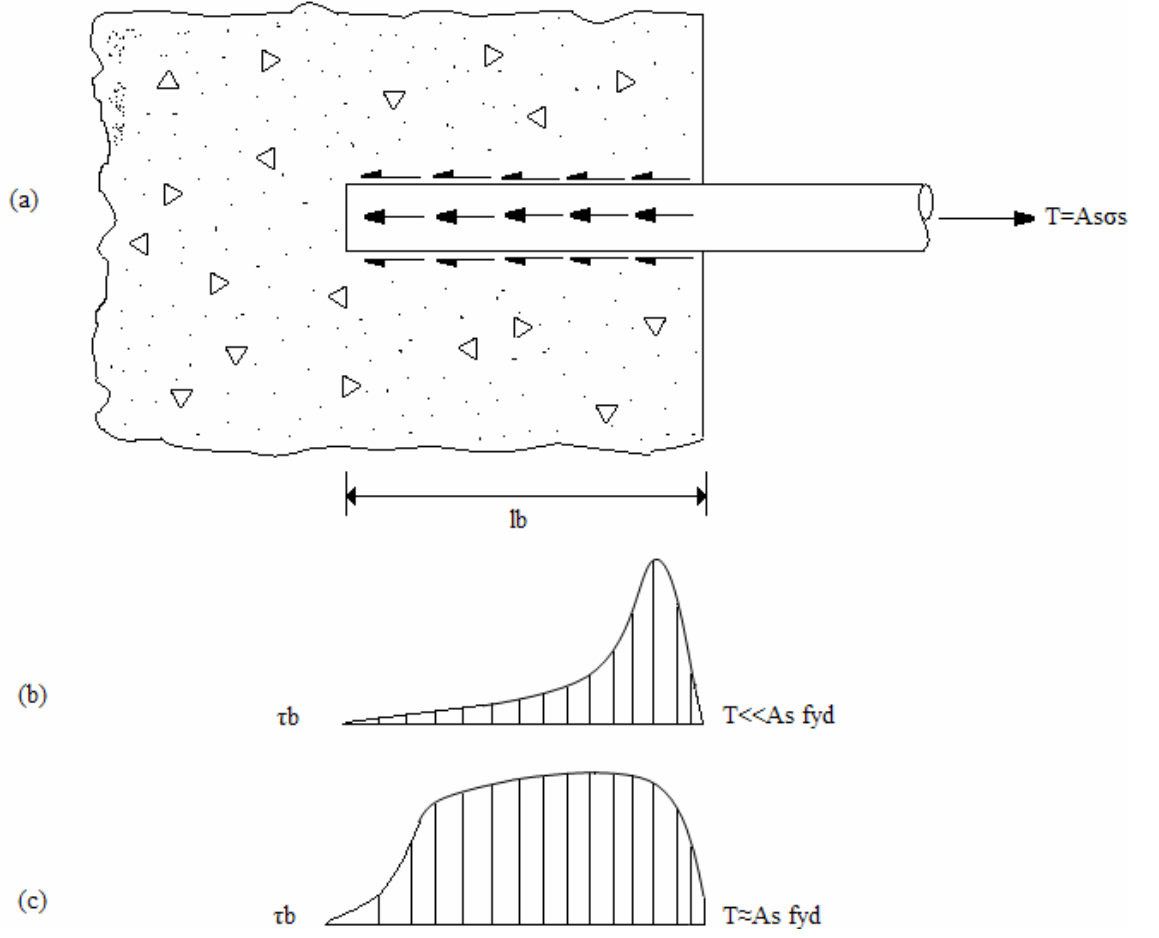
olarak yazılabilir. Eğer τ_b olarak gösterilen aderans gerilmeleri kenetlenme boyunca düzgün yayılı olsaydı veya bu gerilmelerin dağılımı kesin olarak bilinseydi, gerekli kenetlenme boyunun hesabı oldukça kolay olurdu. Yapılan deneyler, aderans gerilmelerinin kenetlenme boyunca düzgün yayılmadığını ve gerçek dağılımın birçok değişkene bağlı olduğunu göstermiştir. Şekil 3.2 (b) ve (c)’de gösterildiği gibi, aderans gerilmelerinin dağılımı düzgün değildir ve bu dağılım, diğer değişkenlerin yanı sıra çubuktaki gerilme düzeyine göre de değişmektedir.

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

$$A = \pi \times \phi \times l_b \quad (3.6)$$

olarak yazılabilir. l_b boyundaki donatı parçasının yüzey alanıdır. Dolayısıyla, l_b uzunluğunda etkiyen aderans kuvveti ise $A_s \times f_{yd}$ ‘ye eşit olmalıdır. Böylece 3.5 denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\tau_b \times (\pi \times \phi) \times l_b = A_s \times f_{yd} = \frac{\pi \times \phi^2}{4} \times f_{yd} \Rightarrow l_b = \frac{f_{yd}}{4\tau_b} \quad (3.7)$$



Şekil 3.2 Aderans gerilmelerinin çubuk boyunca dağılımı

3.7 denkleminde ϕ , çubuğun çapıdır. Yapılan deneyler, aderans dayanımının birçok değişkene bağlı olduğunu göstermiştir. Bu değişkenlerden en önemlisi, betonun çekme dayanımıdır. $\tau_b = C_1 \times f_{ctd}$ ve $\frac{1}{4C_1} = C_0$ varsayılırsa, 3.7 denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$l_b = C_0 \times \frac{f_{yd}}{f_{ctd}} \times \phi \quad (3.8)$$

3.8 denklemi, kenetlenme boyunu veren temel denklemdir. C_0 katsayısının deneysel olarak saptanması gerekir [40].

3.2. Aderansın Nedenleri

Aderans olarak adlandırılan beton ve donatı arasındaki bağın, üç temel nedene dayandığı kabul edilmektedir. Bunlar:

- a. Çelik ve beton arasında yapışmaya sebep olan molekül sel ve kapiler bağ kuvvetleri: Bu yapışma çok düşük değ erli olup zayıf yükler altında, çelik ve betonun birbirlerine göre çok küçük yer değ iş tirmeleri sonucunda kopar.
- b. Çubukların dü z denilen kısımlarının yüzeyinde, yeni imal edilmiş bile olsalar var olan pürüzlerin betona tutunmasından ileri gelen sürtünme kuvvetleri: Sürtünme kuvvetleri molekül sel kuvvetlerden çok daha önemlidir. Dü z yuvarlak demirlerin aderansının hemen tamamı ikinci olarak ele alınan bu sürtünme kuvvetlerinden ileri gelmektedir.
- c. Çubuk çevresindeki betonun makaslama ve basınç dirençlerini de olaya karış tıran, helisel, tek veya çok sayıda, sürekli veya süreksiz nervürlerden ve enine çıkıntılardan ileri gelen mekanik dış kuverleri: Bu olay aderansı geliştirilmiş çubuklarda ortaya çıkar. Seçilen yüzey biçimlerinin uygun olması halinde aderans önemli ölçüde artar.

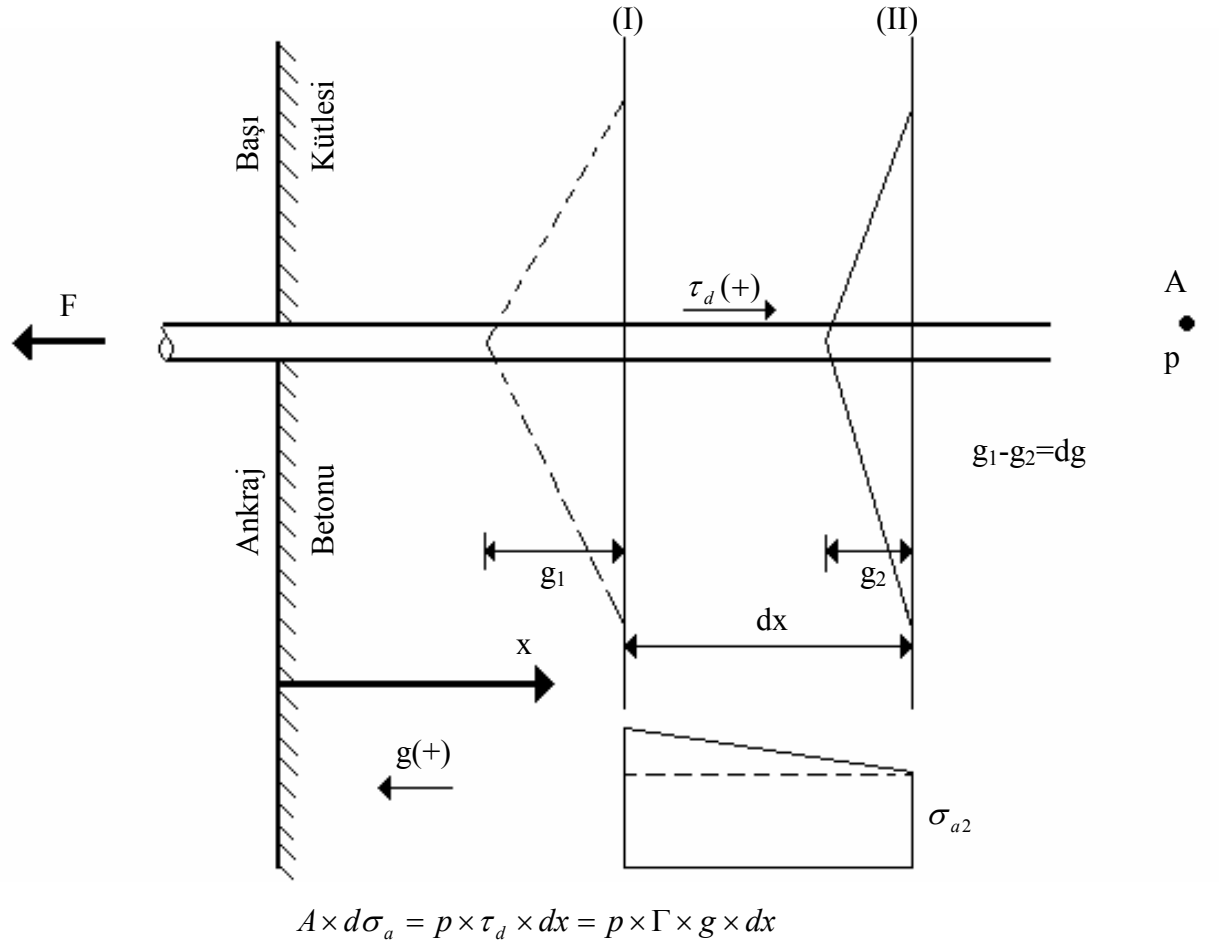
Aderansın üç ana sebebini aşağıdaki şekilde incelemek mümkündür:

3.2.1. Molekül sel ve Kapiler Bağ Kuvvetleri

Bu kuvvetler çelik ve beton arasında elastik bağ kurarlar. Çubuk yüzeyine teğ et gerilmelerin, çubuğun betona göre yer değ iş tirmeleriyle orantılı olduğunu kabul edelim. Bu hipotez mukavemette genellikle kullanılan hipotezlerin benzeridir. Ancak çelik ve beton arasındaki tepkilerin yayılışıyla ilgilidir. Hipotezden;

$$\tau_d = \Gamma \times g \quad (3.9)$$

Bu denklemde Γ = Enine elastisite modülüne benzer bir sabit, g = yer değ iş tirmedir. 0' dan $\Gamma \times g$ 'ye ulaş an teğ etsel gerilmelerin etkisi altında I ve II kesitleri arasındaki çubuk uzunluğu dx başlangıç durumundan $dx+dg$ bitim durumuna geçer (Şekil 3.3). Betonun şek il değ iş tirmesi çubuğun şek il değ iş tirmesini izler.

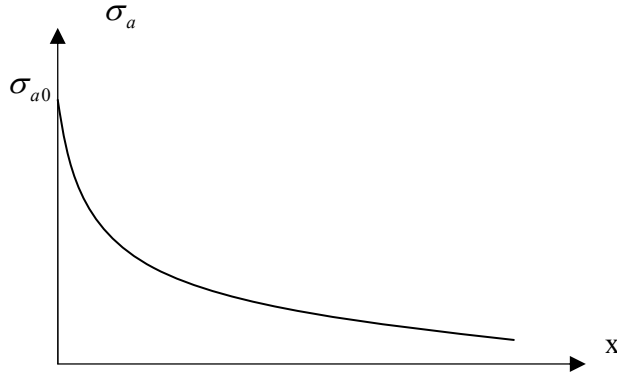


Şekil 3.3 Elastik aderans bağlantısı

Burada iki farklı durum ortaya çıkabilir:

a. Normal Kenetlenme Hali

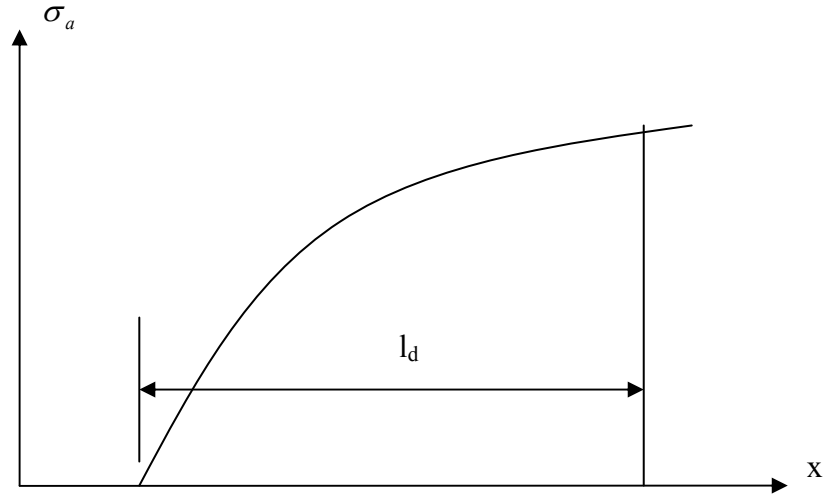
Çubuğun beton kütesinin derinliklerindeki ucu gerili değildir. Betondan çıkan ucu çekilmektedir. Teorik olarak, elastik bağlantı halinde, kenetlenmenin başlangıcına verilen bir çekme, sınırsız bir uzunluğa yayılmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Normal kenetlenme durumunun gerilme yayılımı

b. Önceden Gerili Donatı Hali

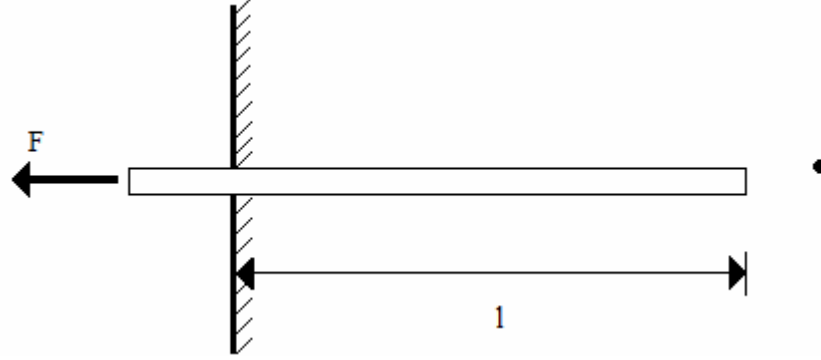
Betonun derinliklerindeki ucu gerilidir. Burada eğilmeye çalışan bir betonarme elamanlarda donatının, çatlakların oluşmasından önceki durumda beton dökümünden önce gerilmiş ilkel gerilmeli beton telleri söz konusudur. Bir önceki normal kenetlenme halinden farklı olarak σ_a 'nın değişimini gösteren eğri $x=l_d$ derinliğinde sınırlanmış bir sinüzoid yayıdır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Önceden gerili donatı durumunda gerilme yayılımı

3.2.2. Çelik Çubukla Beton Arasındaki Sürtünme Kuvvetleri

Bir beton veya betonarme elemana kısmen gömülü yuvarlak veya düz yüzeyli bir çubuğu göz önüne alalım (Şekil 3.6). Bu eleman çubuğun boştaki ucuna uygulanabilecek çekme kuvvetlerinden ileri gelebilecek kuvvetleri bütünlüğü bozulmadan dengeleyebilsin.



Şekil 3.6 Beton kütleye kenetlenmiş çubuk

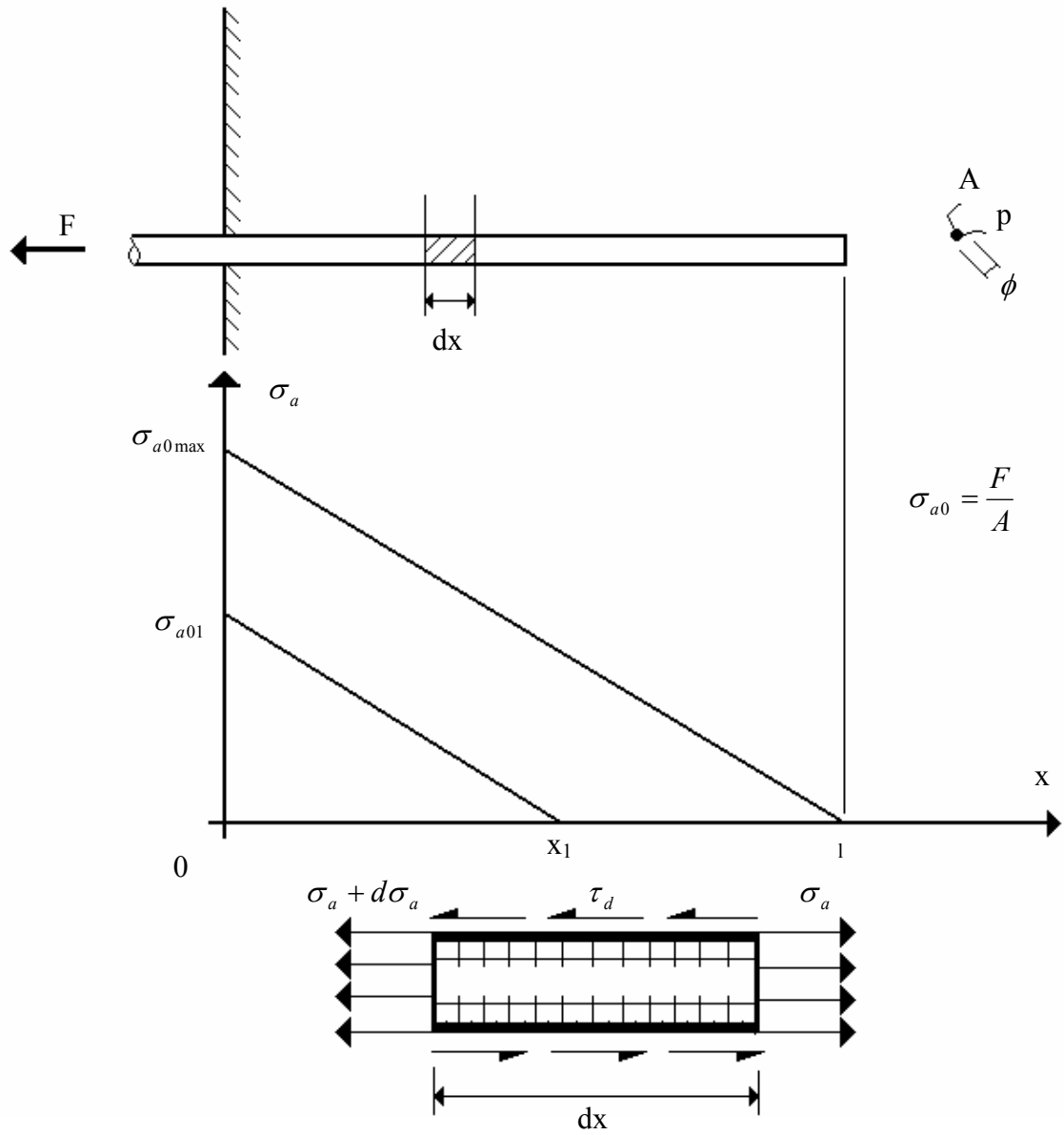
İncelemede şu hipotezler kabul edilmektedir:

- Çelik ile beton arasında, birbirlerine göre bir kayma olmayan yerde aderans gerilmesi sıfıra eşittir.
- Birbirlerine göre bir kaymanın olması durumunda bir aderans gerilmesi vardır ve yönü son kaymaya karşı koyacak şekildedir.
- Bu aderans gerilmesinin değeri sabittir ve ne kaymanın mutlak değerine, ne yönüne, ne de yükleme-boşaltma sayısına bağlıdır.

Bu hipotezler şu hususları ihmal etmektedir:

- Yuvarlak düz demirlerde sabit bir aderans gerilmesi değerine ulaşmak için minimum bir kayma gerekmektedir.
- Bu sabit değer sınırlı bir uzunluktadır.
- Bir doğrultuda ve farklı yönlerdeki aderans daima eşit değerde değildir.
- Aderans devamlı yükleme ve boşaltmaların sonunda bozulabilir.
- Aderans çelikteki gerilmeye bağlıdır.

Yukarıdaki hipotezler, gerçeği kabul edilebilir bir yaklaşıkla idealize etmekte ve olayın kavranabilmesini sağlamaktadır. Betona kenetlenmiş bir çubuğun, dx boyundaki bir elemanın dengelerini inceleyelim (Şekil 3.7)



Şekil 3.7 Betona kenetlenmiş bir çubukta gerilme yayılımı

$$A \times d\sigma_a = p \times \tau_d \times dx \quad \tau_d = f(g) \quad (3.10)$$

$$d\sigma_a = \pm \frac{p \times \tau_d}{A} \times dx = \frac{4\tau_d}{\phi} \times dx \quad (3.11)$$

3.11 denkleminde + işareti çeliğin betona göre artan x' ler yönünde, - işareti ise zıt yönde kaymasını göstermektedir. 3.11 denkleminde σ_a gerilmesini x' e bağlı olarak gösteren diyagramın daima doğru parçacıklarından bileşik olacağını ve bunların eğimlerinin zıt yönde olsalar bile eşit olacağını belirtmektedir.

Yükü başlangıç ucunda çelik gerilmesini σ_{a01} yapacak bir F_1 yükünü düşünelim. Apsis eksenini şeklindeki konumunda olduğuna göre çeliğin kayması azalan x ’ ler yönünde olmalıdır; Dolayısıyla (-) işareti seçilmelidir. Yani denklem şöyle yazılmalıdır:

$$\sigma_a - \sigma_{a01} = -\frac{4\tau_d}{\phi} \times x \quad (3.12)$$

Çalışan (efektif) kenetlenme derinliği, yani çelik gerilmesinin ve kaymanın azaldığı x_0 apsisi, 3.12 denkleminde hareketle:

$$x_0 = \frac{\phi}{4\tau_d} \times \sigma_{a01} \quad (3.13)$$

olarak elde edilir.

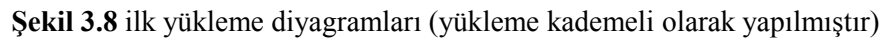
Görüldüğü gibi bu derinlik: Çubuk çapı ϕ ve çelik gerilmesi σ_{a01} ile doğru, kaymadaki aderans gerilmesi τ_d ile ters orantılıdır.

Bunlarla x_0 , çubuğun gerçek kenetlenme uzunluğu l ’ den küçük veya eşit kaldıkça doğrudur ki bu durumda:

$$\sigma_{a0} \leq \sigma_{a0\max} = \frac{4\tau_d}{\phi} \times l \quad (3.14)$$

elde edilir. Bundan sonra, $\sigma_{a0\max}$ sınır gerilmesine erişilmediğini ve dolayısıyla çubuğun bütününün betona göre kaymadığını düşünelim. Bu durumda gerçek kenetlenme uzunluğu işe karışmayacaktır.

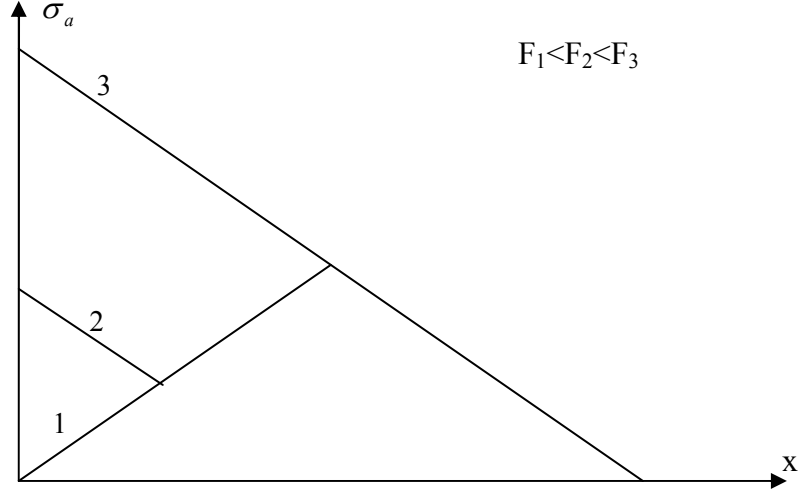
Dış uca sıfırdan başlayarak F ’ e ulaşan bir kuvvet yüklendiğinde, çubuk boyunca etkiyen sürtünme kuvvetleri, çubuktaki gerilmeyi $\sigma_{a0} = \frac{F}{A}$ maksimum değerinden doğrusal olarak azaltarak l_d gibi bir uzaklıkta 0’a indirirler. Şekil 3.8’ de kademeli olarak artırılan yükün her kademesine ait diyagramlar verilmiştir.



19

Şekil 3.9’ da görüldüğü gibi kenetleme uzunluğu ortasında $\sigma_{A(l/2)} = \sigma_{A0} / 2$ gibi bir çekme gerilmesi kalmaktadır. Dolayısıyla OAL üçgeni, ilk yükleme boşaldıktan sonra çubuktaki artık gerilmelerin diyagramını vermektedir.

Boşaltmadan sonra yeni bir yüklemeye gidilirse olay ilk yüklemedekinden değişik bir gidiş gösterir (Şekil 3.10).

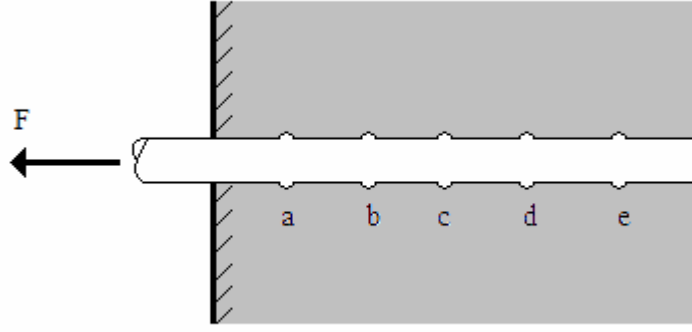


Şekil 3.10 Yeniden yükleme diyagramları

3.2.3. Mekanik Dış Kuvvetler

Çubuk çıkıntılarının birbiri ardı sıra ve çubuğun uzamasına bağlı olarak, gelip betona dayanmaları en son bağ şeklini ortaya çıkarmaktadır. Çıkıntılar arası uzaklık betonun makaslama mukavemetinin aşılmamasını sağlayacak ölçüde büyük olması halinde, aşağıdaki düşünce tarzı bu kuvvetlerin çalışmasına ışık tutar.

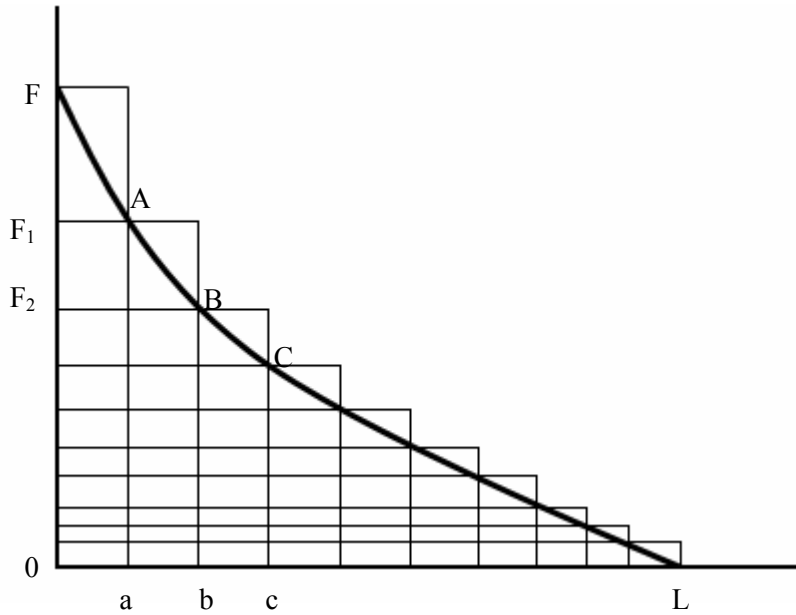
Çubuğun, bir ilk çekme yüklemesini izleyen boşaltmadaki kışalmasının betondan tepki almaksızın olduğunu kabul edelim. Çubuğun kışalması ile çıkıntılarının her biri betondaki yuvasından serbestçe ayrılır (Şekil 3.11). Böylece çubuk gerili olmadığı zaman her çıkıntı yuvasından belirli bir uzaklıkta bulunmaktadır.



Şekil 3.11 Betona kenetlenmiş aderansı geliştirilmiş bir çubuk

Çubuğa bir F kuvveti uygulandığında, çubuktaki her çıkıntı gelip betona oturur. Çubuğun betona gösterdiği tepki, betonun çıkıntı önündeki deformasyonunu çıkıntının yer değiştirmesine bağlayan kanunla ilgilidir. Gerilme azaltılırsa ilk çıkıntı yuvadan ayrılır; ikinci çıkıntı yuvasından ayrılması ise F kuvvetinin yeniden yeterli bir miktar azalmasına bağlıdır. Bu son durumda her iki çıkıntının enkesitleri zora maruzdurlar; üçüncü çıkıntı ise betona oturmakta devam eder. Benzer şekilde, kuvvet sıfıra giderken çıkıntılar, bütün kenetleme uzunluğu boyunca birer birer betondan ayrılırlar.

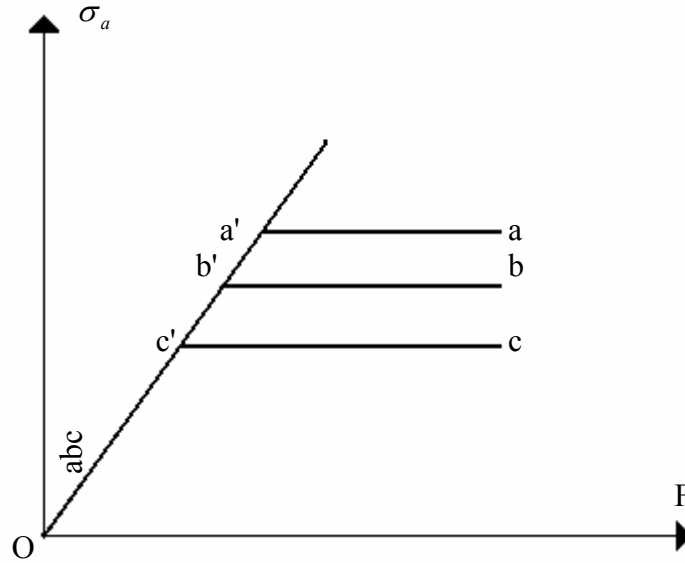
Çubuktaki gerilmeler her bir çıkıntıya tekabül eden basamaklar şeklinde bir yayılış gösterirler. Çıkıntıların birbirine yakın olması halinde maksimum yük altında, FABL zarf eğrisi yayılışı temsil eder (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Kenetlenmiş aderansı geliştirilmiş bir çubuğun çalışma şekli

F , F_1 , F_2 gibi farklı kuvvetlerin etkileri altında, diyagramlar $FABL$, F_1ABL , F_2BL gibi eğrilerle belirlenirler. Bu eğriler F_1A , F_2B gibi sabit bir bölüm ile onu izleyen bir eğri yayından bileşiktir.

a , b , c kesitlerindeki çekme gerilmeleri F' e bağlı olarak Oc' , Ob' , Oa' çizgileriyle belirlenebilir (Şekil 3.13). Bu çizgiler F' e bağlı olarak artan ortak bir bölüm ile sabit bir zoru belirten kademelerden bileşiktirler [41]



Şekil 3.13 Kenetlenmiş aderansı geliştirilmiş bir çubuğun değişik noktalardaki kuvvet-gerilme diyagramları

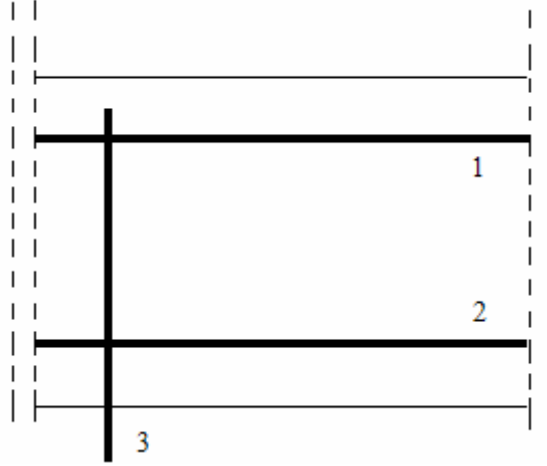
3.3. Aderansa Tesir Eden Faktörler

Aderansa tesir eden faktörlerden en önemlilerini şöyle sıralanabilir:

a. Çelik çubuğun düz satırlı veya nervürlü oluşu: Aynı çaplı, aynı yerde kullanılan iki çubuktan yönetmeliklere uygun tarzda nervürlü olan çubuğun aderans emniyet gerilmesi, düz satırlı olan çubuğun emniyet gerilmesinin, beton tipine bağlı olarak 2 ila 3 katıdır.

b. Çelik çubuğun yer ve konumu: aderansın iyi olabilmesi üzerine betonun iyice sarmasının tesiri çok önemlidir. Bir kirişte (Şekil 3.14) üst kısımlarda betonun iyi sıkıştırılamaması, su/çimento oranının artması sonucu beton mukavemetinin azalması, üst çubukların altında beton oturmasının alt çubuklara nazaran daha fazla olması, üstte yakın çubuklarda (Şekil 3.14 'teki 1 çubuğu gibi) aderansın, alt çubuklarda (Şekil 3.14' teki 2 çubuğu gibi) nazaran daha az olmasına sebep olmaktadır. Eğimi yatayla 45° ile 90° arası olan çubukları

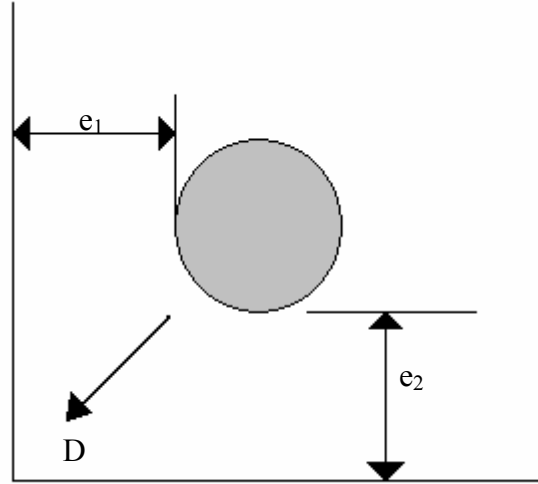
iyice sarabilmekte (Şekil 3.14 ‘teki 3 çubuğu gibi) ve bunların aderansı 2 çubuğu kadar iyi olabilmektedir. Buna göre eğimi yatayla 45° ile 90° arasında olan çubuklarla eğimi daha az veya yatay olup da betonun üst seviyesinden en az 30 cm altta olan veya elamanın alt yarısı içinde bulunan çubukların yer durumları, konum 2 ve bu tanımın dışında kalan çubukların yer ve durumları konum 1 olarak isimlendirilebilir. Aynı bir çubuğun 2’deki aderansı, konum 1’deki aderansından iki kat daha iyi olmaktadır.



Şekil 3.14 Değişik konumlardaki donatıların aderans özellikleri

c. Elemana tesir eden statik yüklerin veya dinamik yüklerin hakim oluşu: Dinamik yüklerin hakim olduğu yapılarda aderansın devamlılığı zamanla bozulabilmektedir. Buna meydan vermemek için bu durumda kabul edilebilir maksimum aderans gerilmesini, statik yüklerin hakim olduğu hale nazaran daha küçük olarak tespit etmek zorunludur.

d. Çubuğun kenar çubuk veya iç çubuk oluşu: Bir kesitte kenar çubuğun aderansı, kenardaki beton tabakası ince olduğu ve kolaylıkla enine deformasyon yaptığı için bir iç çubuk kadar iyi olmaz. Aderansın yeteri kadar iyi olması için beton çubuğu kenar ve altta saran beton tabakasının bir minimum kalınlığı olmalıdır (Şekil 3.15). Bu kalınlık özellikle nervürlü çubuklarda, köşeye doğru olan D kuvvetleri sebebiyle betonun çatlamaması için lazımdır. Yalnız bu sebeplerle, betonun içinde bulunduğu çevre şartlarını, karbonatlaşma olayını ve yangına karşı dayanıklılık gibi hususları düşünmeden, şekildeki e_1 ve e_2 mesafelerinin, C 14 için 1.5 cm ile $\emptyset$ çubuk çapı ve maksimum dane çapından büyüğü kadar olması lazımdır.



Şekil 3.15 Minimum pas payları

e. Enine donatı: Enine donatı, ankraj yerlerinde beton örtü tabakasının ince olduğu durumlarda ve özellikle nervürlü çubuklar kullanılması halinde, çubuklar boyunca meydana gelebilecek çatlakların ilerlemesi ve genişlemesine mani olur. Yapı elemanı boyunca bir çatlak meydana geldiğinde, enine donatı bulunmazken aderansın sıfıra ineceği açıktır. Enine donatının olması halinde aderans küçülür, fakat yok olmaz, ankraj bölgesi büyüyerek çubuktaki kuvvet dengelenebilir. Enine donatı, kirişlerde eğilme aderans gerilmesinin büyük olduğu yerlerde (genellikle mesnetler civarı) beton örtü tabakasının yarılmasını önlemekte olduğu gibi çubukların bindirme eklerinde dikiş donatısı rolünü oynar.

f. Betonun çekme dayanımı: Nervürlü çubuklarla donatılmış elemanlarda kırılma yarılma ile olacağından, çekme dayanımı özellikle önemlidir.

g. Çeliğin akma dayanımı: Kenetlenme boyunca aderans gerilmesi dağılımını etkileyeceğinden dolayı önemlidir.

h. Donatı çapı: Çapı değiştikçe, kenetlenmeyi sağlayan çevrenin, uygulanan kuvveti etkileyen alana oranı değişmektedir. Ayrıca, yarılma kırılmasında betonda oluşan çekme gerilmeleri de çapla orantılı olmaktadır.

i. Kenetlenme boyu: Aderans kenetlenme boyu ile değişir. Ancak aderans dayanımı, kenetlenme boyu ile orantılı değildir, yani kenetlenme boyunun iki katına çıkarılması, aderans dayanımının iki kat arttığı anlamına gelmez.

j. Yerel gerilmeler: Yerel gerilmeler de aderansı etkileyebilir. Örneğin, mesnetin uyguladığı yerel basınç gerilmeleri, özellikle nervürlü donatı kullanılan durumlarda yarılmayı geciktirebilir.

k. Kullanılan agreganın cinsi ve katkı maddeleri de aderansı etkiler. Örneğin, hafif agrega ile yapılan betonun aderans dayanımı, normal agregayla yapılan oranla daha düşüktür.

Yukarıda sözü edilen çok sayıda faktör, aderans dayanımını, kenetlenme boyunu etkimesi nedeniyle, çıkarılan teorik formüllerin sağlıklı olduğunu söylemek doğru değildir. Özellikle nervürlü donatı kullanılması durumunda olay daha da karmaşık hale gelmektedir. Bu nedenle aderans dayanımlarını ve aderans ile ilgili parametreleri, deneyler sonucu belirlemek en akılcı yöntemdir [42, 43].

3.4. Aderans Deneyleri

20' inci yüzyılın başından bu güne kadar, ortalama aderans dayanımının ve gerekli kenetlenme boyunun saptanmasına yönelik çok sayıda deney türü geliştirilmiştir. Hemen belirtmek gerekir ki, geliştirilen bu deney elemanlarının hiçbirisi tam anlamı ile gerçek durumunu yansıtmamaktadır. Bu nedenle deney türlerinin tümü eleştiriye açıktır. Bu güne kadar gerçekçi bir aderans deneyinin geliştirilmemiş olmasının başlıca nedenleri aşağıda sıralanmıştır:

a. Aderans- kesme ilişkisi henüz tam olarak aydınlığa kavuşturulmamış karmaşık bir konu olduğundan, bu etkileşimin gerçekçi olarak deney elemanına yansıtılması çok zordur.

b. Boyut etkisi aderansı büyük ölçüde etkilemektedir.

c. Yerel gerilmelerinin aderans ve kenetlenme üzerinde ihmal edilmeyecek ölçüde etkileri vardır.

d. Donatı çubukları arasındaki uzaklık ve beton örtüsü aderansı etkileyen önemli değişkenlerdendir. Deneylerde bunları modellemek çok zordur.

e. Sargı donatısı aderansı olumlu yönde etkilemektedir. Deney elemanı bu sargı etkisini de içermektedir.

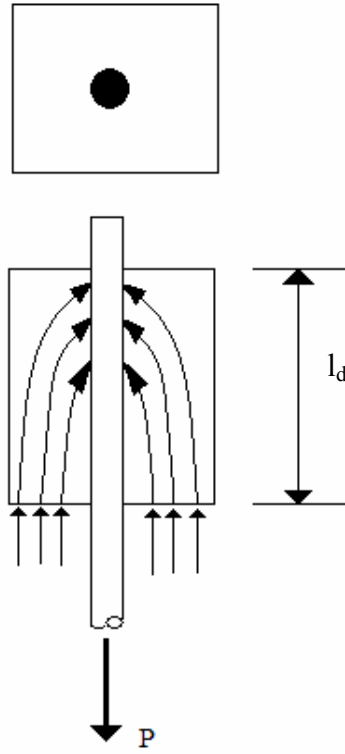
Bu durumda, aderans ve kenetlenme sorunu incelenecek eleman, laboratuarda aynı boyut ve sınır koşulları ile imal edilip test edilmedikçe, yapılan deneyin tam olarak gerçeği yansıttığı söylenemez. Karşılaştırılan her sorun için böyle bir deney planlanması, ebedetteki pratik ve ekonomik olmayacaktır. Aşağıda tanıtılan ve irdelenen deney türleri, bu gerçeklerin ışığında değerlendirilmelidir.

3.4.1. Çekip Çıkarma Deneyi

Aderans deneyleri arasında en eskisi, en yaygın olarak kullanılanı, en basit en pratik olanı, “eksenel çekip çıkarma deneyi” dir. Bu deneyde, Şekil 3.16’ da gösterildiği gibi, tabandan mesnetlenmiş bir beton prizma veya silindirin içine yerleştirilmiş çubuk, alttaki serbest ucundan çekilip, betondan çıkartılmaya çalışılır. Genelde, alt serbest uçta ve üstte, çubuğun betona göre sıyrılması ölçülür. Bazı araştırmacılar, serbest uçtaki sıyrılmanın 0.25 mm olduğu yükte hesaplanan ortalama aderans gerilmesini, güvenli aderans gerilmesi olarak kabul etmektedirler. Değişik kenetlenme boyları kullanılarak yapılan deneylerle kenetlenme boyunun saptanması, yazarlara daha doğru bir yaklaşım olarak gözükmektedir.

Bu tür deney elemanlarında 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. Ancak iki tür donatının izafi aderans ve kenetlenme özelliklerinin saptanıp karşılaştırılmasında bu tür deneylerden yararlanılabilir.

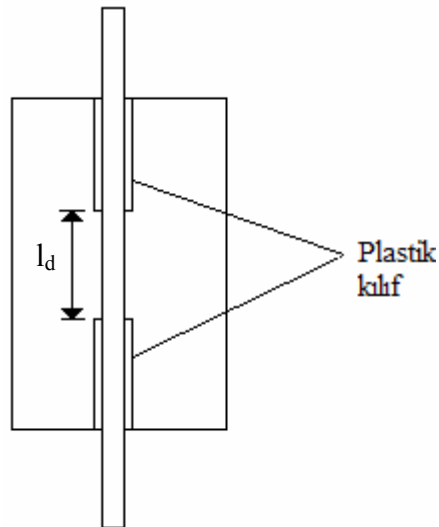
Fakat Şekil 3.16’ da ki eksantrik çekip-çıkarma deney elemanı ile gerçekçi beton örtü kalınlığı ayarlanılabilmekte ve yerel basınç gerilmeleri, uçlardan donatıya geçirilen kılıflarla yok edilebilmektedir. Ayrıca donatıya dik kesme kuvvetinin bulunması ve eğilme nedeni ile çatlamanın olabilmesi, bu deney elemanının daha gerçekçi sonuçlar vermesini sağlamaktadır.



Şekil 3.16 Çekip çıkarma (pull-out) deneyi

3.4.2. İtip-Çıkarma Deneyi

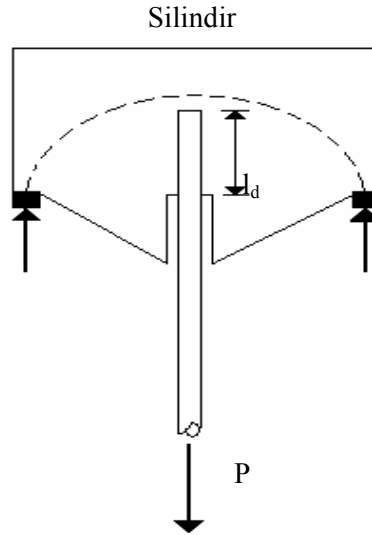
Çekip-çıkarma deneyinden daha az yaygın olan bu deney türünün bir öncekinden tek farkı, çelik çubuğu beton kütleden çözen P kuvvetinin çekici değil itici bir özellik taşımasıdır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 Kenetlenme boyunun sınırlandırılması

3.4.3. Geliştirilmiş Çekip-Çıkarma Deneyi

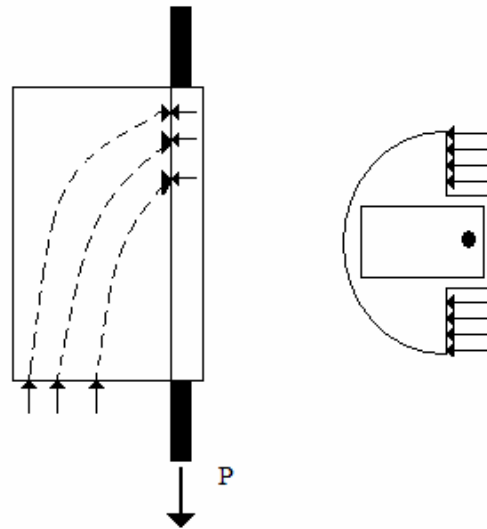
Çekip-çıkarma deneyinde beton içi gerilmelerin bir kubbe gibi çalışıp betonu çubuk üzerine bastırmalarını önlemek amacıyla F. Leonhardt tarafından teklif edilmiş olan bir deney türüdür (Şekil 3.18). Beton kütle silindirik olup deney ana hatlarıyla çekip-çıkarma deneyine benzer.



Şekil 3.18 Geliştirilmiş çekip çıkarma deneyi

3.4.4. Eksantrik Çekip-Çıkarma Deneyi

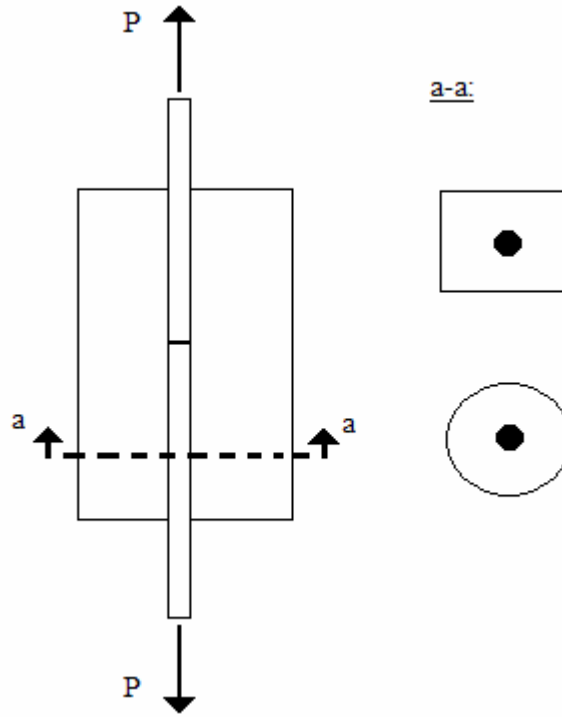
3.4.3' te anlatılan amaca yönelik bir başka deney de P.M. Ferguson, R.D. Turpin ve J.N. Thompson tarafından kullanılan eksantrik çekip çıkarma deneyidir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 Eksantrik-çekip çıkarma deneyi

3.4.5. Uç Uca Çekme Deneyi

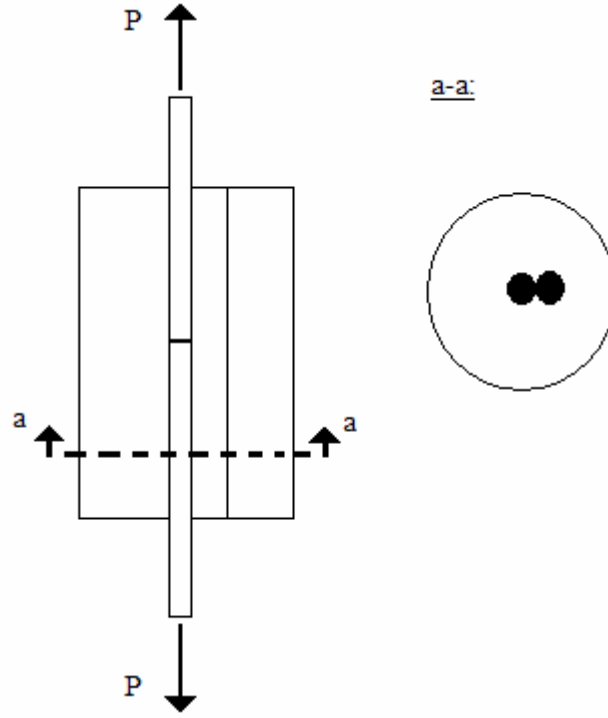
Kare prizma veya silindir şeklindeki bir beton kütesinin en kesit merkezine yerleştirilmiş uç uca iki çelik çubuktan meydana gelen epruvet, çubukların serbest uçlarına düzgün artan bir çekme kuvveti uygulanarak denenmektedir (Şekil 3.20). Epruvette enine donatı mevcuttur. Çubuklardan birinde ilk aderans çözülmesi elde edildiğinde henüz direnç gösteren öteki uçtaki çubuk üzerinde çekip-çıkarma deneyi de yapılabilmektedir.



Şekil 3.20 Uç uca çekme deneyi

3.4.6. Ek Çubuklu Uç Uca Çekme Deneyi

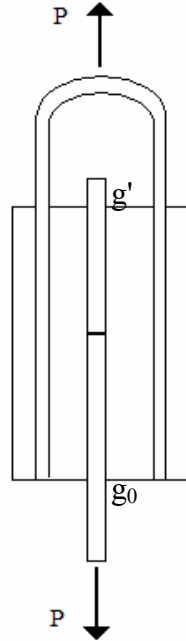
Genel olarak uç uca çekme deney türüne benzeyen bu tür J.R. Robinson tarafından uygulanmıştır (Şekil 3.21).



Şekil 3.21 Ek çubuklu uç uca çekme deneyi

3.4.7. Tek Deney Çubuklu Çekme Deneyi

Çalışma bakımından uç uca çekme deney türüne benzeyen bu deney g' ve g_0 gibi iki ayrı noktadan ölçme imkânı vermektedir (Şekil 3.22). Kenetlenme boyunun çekip çıkarma deneyine benzer bir şekilde sınırlandırılması mümkündür [27].



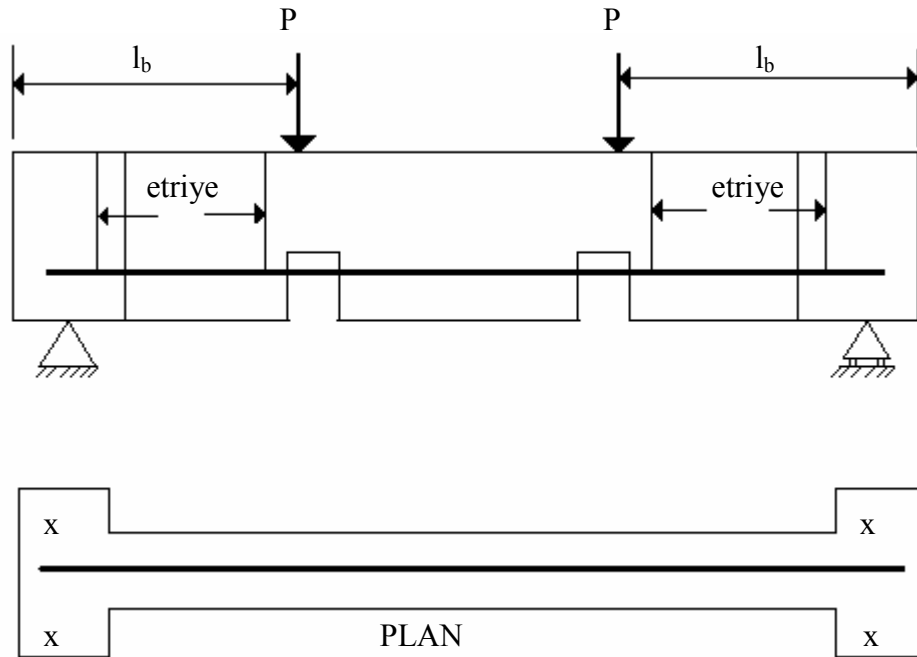
Şekil 3.22 Tek deney çubuklu çekme deneyi

3.4.8. Kiriş Deneyleri

Çekip çıkarma deneylerinin eğilmeye çalışan bir elemandaki gerçek durumu yansıtmamasından 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 Standarts Deneyi, Teksas Deneyi, Standart Belçika mafsallı Kiriş Deneyi ve büyük boyutlu betonarme kirişler üzerinde yapılan Kiriş Çatlama Deneyidir.

3.4.8.1. Bureau Deneyi

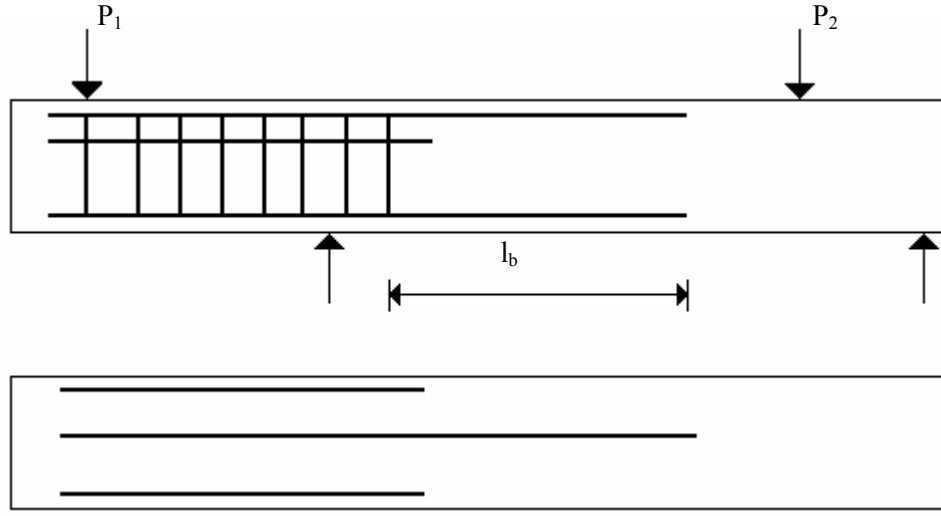
Kenetlenme boyunun saptanmasında daha gerçekçi şartları sağlayan bir deney türüdür. Şekil 3.23’ te gösterilen Bureau of Standarts deney elemanında kesme kırılmasını önlemek için aşırı etriye kullanmak gerekmektedir. Bu durum ise aderansı büyük ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla, gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmek açısından önemli bir sakınca doğmaktadır.



Şekil 3.23 Bureau deneyi

3.4.8.2. Teksas Deneyi

Bureau Standart deneyine benzer şekilde kenetlenme boyunun incelendiği bu deney türünün sakıncası, donatının gerçekte bağdaşmayacak genişlikte bir beton kütleyle gömülmüş olmasıdır (Şekil 3.24). Bu kiriş tipinde de başlıca önemli olan, donatıyı örten betonu sınırlayabilecek olan mesnetin uyguladığı yerel basınç gerilmelerinin önlenmesidir. Böylece, yarıılma önlenmesi ortadan kaldırılmaktadır.

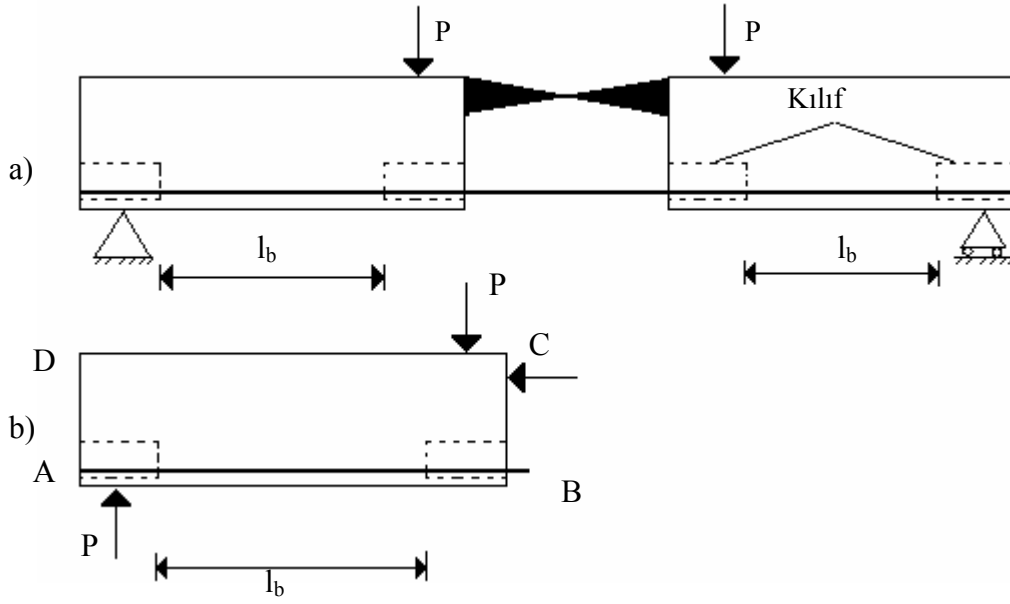


PLAN

Şekil 3.24 Teksas deneyi

3.4.8.3. Standart Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi

Donatı çubuklarının çekme durumundaki betonla sarılı olmalarını sağlayan bu tür bir deney elemanı ile gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilir. Kiriş ortasındaki mafsalın amacı, çubuğa etkiyen kuvvetin kesin olarak belirlenmesidir (Şekil 3.25). Denenen çubuklara etkiyen kuvvet, epruvete yüklenen P kuvveti ile orantılı olup, kademeli olarak artırılmaktadır. Kademeler çubukta belirli çekme gerilmeleri oluşturmak üzere düzenlenmiştir.



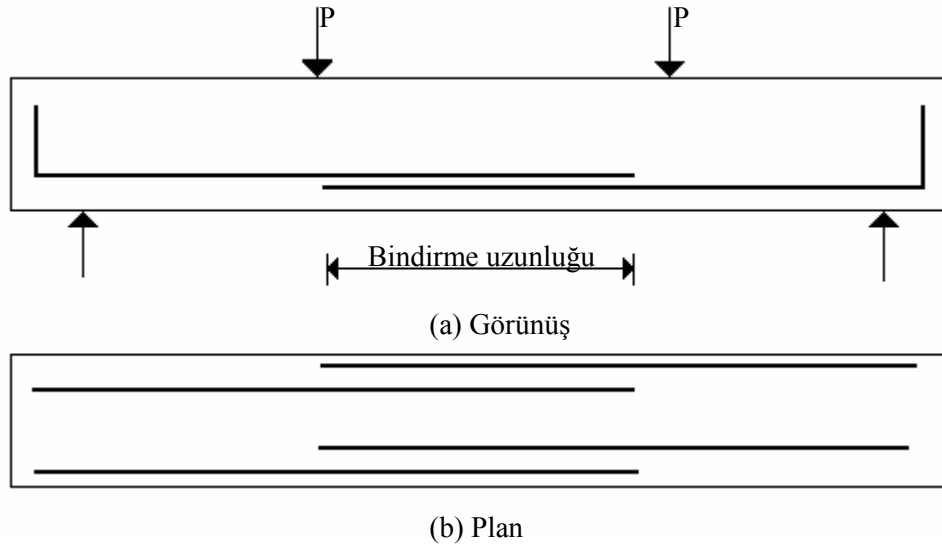
Şekil 3.25 Standart mafsallı Belçika Deneyi

Şekil 3.25 b deki serbest cisim diyagramlarından görüleceği gibi, bu deney elemanın yarısı, Şekil 3.19 'da gösterilen eksantirik çekip çıkarma deney numunesine benzemektedir. Ancak, O.D.T.Ü.' de yapılan deneyler, bu iki tür deney elemanından elde edilen sonuçların oldukça farklı olduğunu göstermiştir. Belçika deneyinde, mesnet ile yük uygulanan nokta arasındaki deplasman farkının, eksantirik 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 deplasmanlar verildiğinde, sonuçların birbirine yaklaştığı gözlenmiştir [28].

3.4.8.4. Kiriş Çatlama Deneyi

Eğilme çekme çatlaklarının aderans davranışını etkilediği kabul edildiğinden beri, bu tür deney testleri daha çok önem kazanmıştır. Bu deney tipinde, belirli bir türdeki donatının kullanılmasıyla oluşan kiriş çatlama durumunun incelenmesi ve donatıdaki gerilmenin tespiti esastır. Genellikle dikdörtgen kesitli olarak alınan bu betonarme deney kirişi, belli bir L açıklığında iki mesnete oturtulmaktadır. Yükleme, düşey, simetrik ve belli bir aralıktaki 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 sonuçları vermesi önemlidir.

Şekil 3.26’ da görüldüğü gibi, çekme donatısı, sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli olarak yerleştirilmektedir. Böylece nihai yükte, donatı akmadan önce, yarıлма göçme modu ile numunenin göçmesi söz konusu olmaktadır. Bu durum ise, bindirmeli ekli donatıların maksimum kapasitesine ulaştığını göstermektedir. Dolayısıyla aderans dayanımı direkt olarak donatıda meydana gelen gerilmeden tayin edilebilmektedir [20].

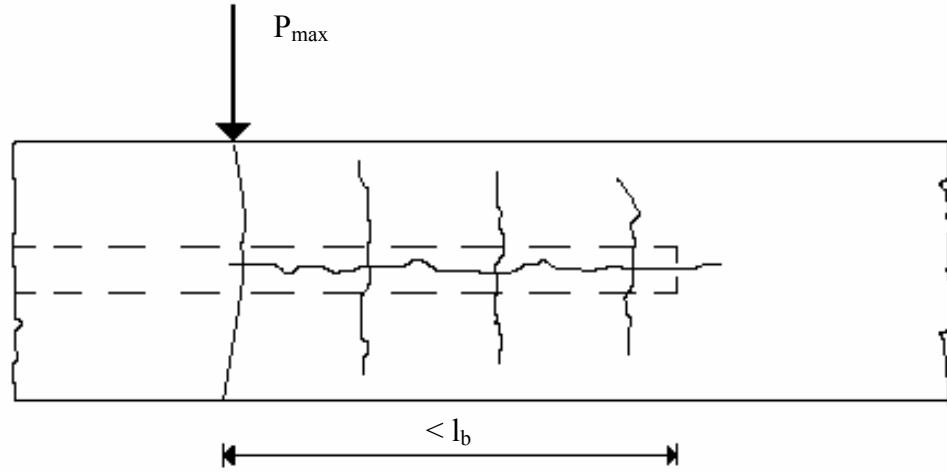


Şekil 3.26 Çekme donatısı sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli olarak yerleştirilmiş kiriş deneyi

3.5. Aderansta Çatlama Olayı

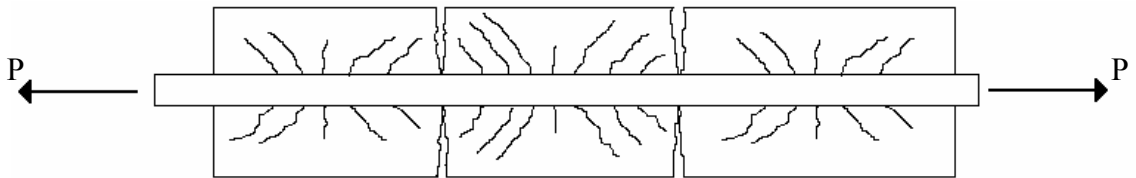
Betonun çekme altındaki kopma uzamasının değerinin çeliğe göre düşük olması, betonun donatı çubuklarının şekil değiştirmesini belirli bir sınır gerilmeden sonra izleyememesi çatlama sonucunu doğurur.

Aderans nedeniyle oluşabilecek çatlakların tanınmasında ve diğer çatlaklardan ayırt edilmesinde fayda vardır. Şekil 3.27’ de kenetlenme boyunun yetersiz olması nedeni ile kiriş alt yüzünde gözlenen çatlaklar gösterilmiştir. Şekilde donatı çubuğu kesik çizgilerle gösterilmiştir. Gösterilen bu tür çatlama, donatı çubuklarının konumuna ve beton örtüsünün kalınlığına göre, elamanın alt veya yan yüzünde gözlenir.



Şekil 3.27 Nervürlü donatının neden olduğu aderans çatlama

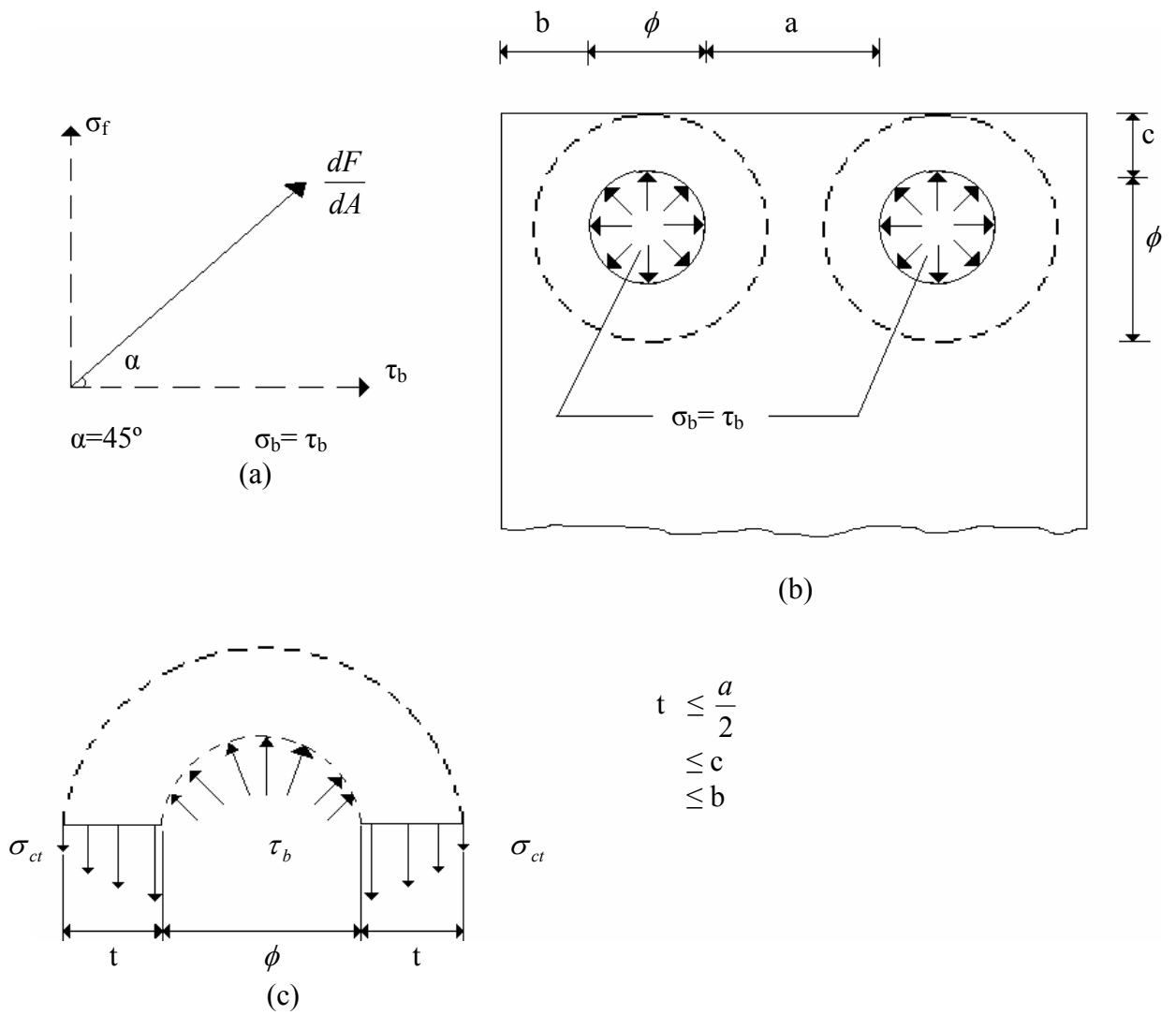
Gotto [44], yapmış olduğu deneysel çalışmada, nervürlü donatının betona uyguladığı dış kuvvetleri nedeniyle oluşan iç çatlakların resmini çekmeyi başarmıştır. Donatıya aksel çekme uygulanarak denenen bir elemanda, gözlenen iç çatlama, Şekil 3.28’ de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, oluşan çekme çatlakları (enine çatlak), elemanı üç parçaya ayırmıştır. Çubuktaki dişlerin oluşturduğu çatlaklar, çekme çatlağına doğru eğikleşmektedir. Betondaki çatlamanın nedeni, asal çekme gerilmeleri olduğuna göre, asal basınç gerilmelerinin bu çatlaklara paralel yönde oluşacağı söylenebilir. Gotto’ nun çektiği fotoğrafların incelenmesinden, asal basınç gerilmelerinin yönü ile çubuk eksenine arasındaki açının 45° olduğu görülür. Asal basınç gerilmelerinin çubuk eksenine dik yöndeki bileşeni, iç basınç altındaki boru analogisindeki iç basınca eşittir. Gotto, iç çatlakların eğiminin beton örtüsüne göre değiştiğini, beton örtüsü fazla elemanlarda çatlak ile donatı arasındaki açının arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.28 Aderansın oluşturduğu iç çatlaklar

3.6. Aderans Kırılmasının Mekanikliği

Nervürlü çubuktaki çıkıntılarının betona uyguladığı dış kuvvetleri, donatıya dik ve paralel olmak üzere iki bileşene ayrılabiliriz. Şekil 3.29’ da, donatıya dik gerilme bileşeni σ_f , paralel olanı ise τ_b olarak gösterilmiştir. τ_b klasik aderans gerilmesi, σ_f ise yarıлма gerilmesidir. Betona uygulanan dış kuvvetlerinin eğimi birçok değişkenden etkilenmektedir. Ancak eğim genelde 45° civarlarında olduğundan, $\sigma_f = \tau_b$ varsayımı aykırı bir varsayım olmayacaktır. Ersoy [40], 1984 yılında, kırılma mekanikliği ile ilgili bir araştırma yapmıştır.



Şekil 3.29 Aderans için boru analojisi

σ_r gerilmesi, sıvı veya gaz taşıyan bir borudaki iç basıncın şiddetine eşittir. Bu basıncın, tıpkı borudaki gibi çevresini saran betonda çekme gerilmeleri oluşturması doğaldır. Yarılma olarak adlandırılan kırılma, betonda oluşan bu çekme gerilmelerinin, betonun çekme dayanımını aşması sonucu oluşur. Bu tür kırılmasının modellenmesinde uygun görülen “iç basınçlı boru analojisi” için, bazı geometrik özelliklerin tanımlanması gerekir. Boru iç çapının donatı çapı olması doğaldır. Borunun duvar kalınlığını, donatı çubuğu ile en yakın beton yüzü arasındaki uzaklık olarak almak uygun olacaktır, $t=c$. Bu varsayımlar sonucu tanımlanan boru boyutları Şekil 3.29 (b)’ de gösterilmiştir. Eğer donatı ile elamanın yüzü arasındaki uzaklık, betonun alt yüzüne olan uzaklıktan az olsa idi, duvar kalınlığı c yerine b alınacaktı. Aynı şekilde iki donatı arasındaki serbest uzaklık $2c$ ve $2b$ ’ den küçük olsaydı, duvar kalınlığı $t=a/2$ olarak alınacaktı. Özetlenirse, borunun duvar kalınlığı $a/2$, c ve b ’ den küçük olanı olarak alınmalıdır. Bu durumda borunun dış çapı, $(\phi+2t)$ olarak tanımlanabilir. $\sigma_r = \tau_b$ olduğundan, iç basınç τ_b olarak alınabilir.

İç basıncı τ_b olan, kalın duvarlı bir silindirde oluşan maksimum ve minimum çekme gerilmelerinin ortalaması, aşağıdaki denklemle ifade edilebilir (Şekil 3.29 c).

$$\sigma_{ct} = \frac{\tau_b \times r_1}{\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \times r_2 - r_1} \left(1.5 + 0.5 \times \frac{r_2^2}{r_1^2}\right)$$

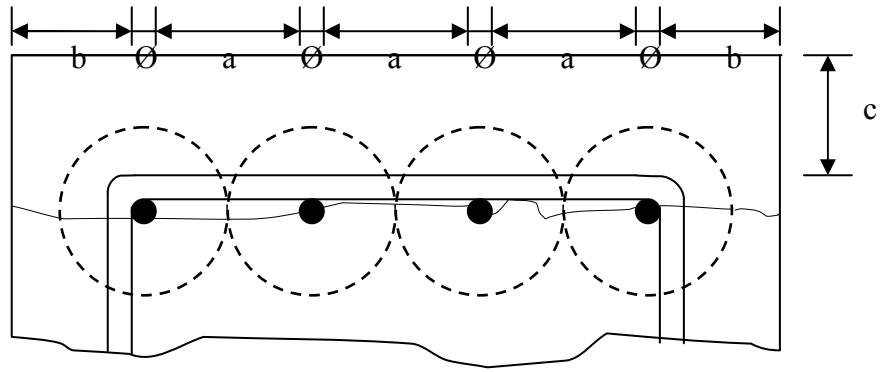
$r_1 = \text{iç yarıçap}, r_1 = \phi/2$ (3.15)

$$r_2 = \text{borunun dış yarıçapı}, r_2 = \left(\frac{\phi}{2} + t\right)$$

Denklemleri basitleştirmek amacıyla, (r_1/r_2) oranı 5 olarak alınabilir. Bu, $t=2\phi$ ’ ye karşılık olan bir sınır durumunu simgeler. Denklem 3.15’ deki çekme gerilmesi σ_{ct} , betonun çekme dayanımı olan f_{ctk} ’ ya eşitlendiğinde, aşağıdaki 3.16 denklemi elde edilir.

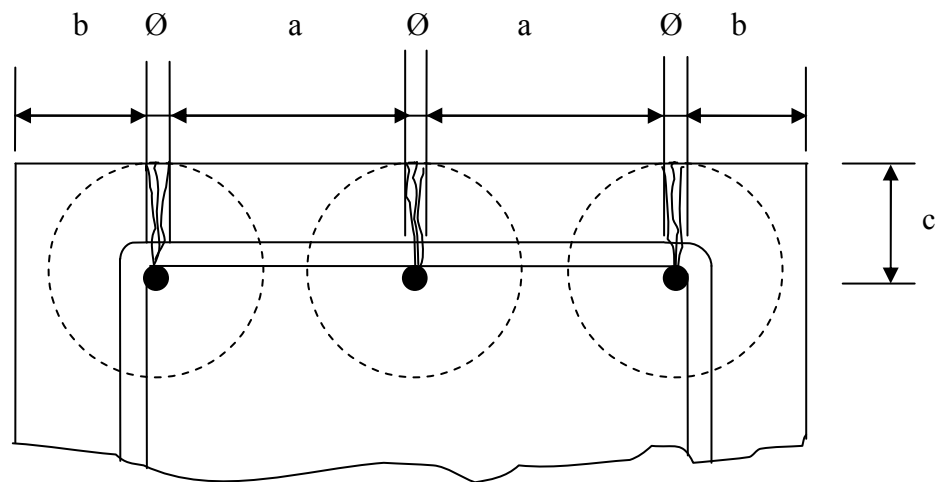
$$f_{ctk} = \frac{14\tau_b \times r_1}{5r_2 - r_1} = \frac{\tau_b \times r_1}{0.35r_2 - 0.07r_1}$$
(3.16)

Çekmeye maruz aderansı geliştirilmiş donatının betondan sıyrılması ve yukarıda bahsedilen şartlar göz önüne alındığında, betonarme bir kirişte aderans nedeni ile meydana gelebilecek yarılmanın, donatı sıklığına bağlı olarak değişeceği açıktır. Bu durumda yarılma, donatı dizisi düzeyinde yatay bir düzlemde veya donatı çubuklarının beton örtüyü yırtması ile düşey bir düzlemde oluşabilir (Şekil 3.30). Yarılmanın nasıl olacağı a/c oranına bağlıdır.



$$a/2 < c, t = a/2$$

(a)



$$c < b, c < a/2, t = c$$

(b)

$$\frac{a}{c} = 2 \quad (3.20)$$

Denklem 3.20 ile belirlenen sınırın doğru olduğu varsayılırsa, $a/c < 2$ olduğunda yatay yarılma, $a/c > 2$ olduğunda ise, düşey yarılma (pas payının yırtılması) oluşması gerekir.

Sargı donatısı aderans ve kenetlenmeyi olumlu yönde etkilemektedir. Şekil 3.30 (a) ve (b)' de gösterilen iki ayrı yarılma türünde, sargı donatısı olarak kullanılan etriyenin etkisi farklıdır. Şekil 3.30 (a)' da gösterilen yatay yarılmada, yalnızca kenardaki iki çubuk dolaylarında oluşan çatlak, sargı donatısını kesmektedir. Bu durumda sargı donatısının, yarılmayı önleme açısından kenar çubuklar dışında etkisiz olduğu söylenebilir. Şekil 3.30 (b)' de gösterilen düşey yarılmada ise (pas payının yırtılması), donatının tümü çevresinde oluşan yarılma çatlakları, sargı donatısını kesmektedir. Bu nedenle, sargı donatısının kesitte yer alan tüm kenar ve ara çubuklar için etkili olduğu söylenebilir.

Şekil 3.30 (c)' de çubuklar etrafında oluştuğu varsayılan içi boşluklu silindirlere birinin serbest cisim diyagramı gösterilmiştir. Serbest cisim diyagramı, sargı donatısının bir kolunu da içerdiğinden bu diyagram, Şekil 3.30 (b)' de gösterilen tüm çubuklar için, Şekil 3.30 (a)' da ise yalnız kenar çubuklar için geçerlidir. Şekil 3.30 (a)' da ki ara çubuklar için serbest cisim diyagramı, sargı donatısı içermeyeceğinden, Şekil 3.30 (c)' de gösterilenle özdeş olacaktır.

Şekil 3.30 (c)' de ki serbest cisim diyagramındaki basıncın, düşey bileşeni $2\tau_{b0}\phi/2 = \tau_{b0}\phi$ olacaktır. $\tau_{b0}\phi$ ' nin bir bölümü betonda oluşan çekme gerilmeleri ile diğer bölümü de sargı donatısı tarafından karşılanacaktır. Denklem 3.17' den, $\tau_{b0}\phi$ ' nin beton tarafından karşılanan bölümü, $0.7f_{ctk}(t+\phi/2)$ olarak yazılabilir. Sargı donatısının katkısı da $A_{tr} \times f_{ywk} / (\psi_1 \times s)$ olarak alınabilir. Bu durumda düşey dik kuvvetler için aşağıdaki denge denklemi yazılabilir.

$$\tau_b \times \phi = 0.7f_{ctk} \left(t + \frac{\phi}{2} \right) + \frac{A_{tr} \times f_{ywk}}{s \times \psi_1} \quad (3.21)$$

Denklemdaki A_{tr} , s ve f_{ywd} sırasıyla sargı donatısının kesit alanı, aralığı ve karakteristik akma dayanımıdır. ψ_1 ise, donatıdaki gerilme düzeyi ve sargı donatısının etkinliği ile ilgili katsayıdır [40].

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yapılan literatür çalışması ışığında farklı kür koşulları altında (su, hava ve naylon), farklı mineral katkıları (silis dumanı ve uçucu kül), farklı donatı çapları (14 ve 20 mm) ve maksimum agrega tane çapları (8 ve 16 mm) kullanılarak aderans dayanımını araştıran bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu yüzden dolayı bu tez çalışması literatürdeki bu eksikliği gidermek amacıyla yapılmıştır. Bu çalışmada, toplam 270 adet aderans deney numunesi ve 135 adet basınç dayanımı deney numunesi hazırlanmıştır. Bu numuneler 3, 7, 14 ve 28 gün farklı kür koşullarında bekletildikten sonra aderans dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

4.1. Kullanılan Malzeme

4.1.1. Çimento

Türkiye’de üç tip (üç ayrı dayanım sınıfına ait) Portland çimentosu üretilmektedir. Portland çimentosunun dışında çimentoların üretimine ait Türk standartları bulunmaktadır.

Portland çimentolarının, Beyaz Portland çimentolarının ve erken dayanımı yüksek çimentonun üretimlerinde takip edilen yöntem benzerdir: Klinker ve küçük bir miktar alçı taşı beraber öğütülmektedir. Beyaz Portland çimentosu için kullanılacak klinker demir ve mangan oksit içermeyen hammaddelerden üretilen klinkerdir. Erken dayanımı yüksek çimento, en az 3500 cm²/g Blaine inceliğine öğütülerek elde edilmektedir.

Portland çimentosu dışında üretilen çimento tipleri “klinker+ mineral katkı malzemesi+ alçı taşı” karışımının öğütülmeleriyle elde edilmektedir [45].

Bu tez çalışmasında kullanılan çimento, Elazığ Çimento Fabrikasından temin edilen ve TS EN 197-1’ de CEM I N olarak tanımlanan çimentodur.

4.1.2. Mineral Katkıları

Deneylerde mineral katkı olarak silis dumanı ve uçucu kül kullanılmıştır.

4.1.2.1. Silis Dumanı

Silikon metalinin veya silikonlu alaşımların üretiminde, yüksek saflıktaki kuvars, elektrik fırınlarında yaklaşık 2000 °C sıcaklıkta kömür yardımıyla indirgenmeye tabi tutulmaktadır.

Üretim işleminde çok büyük miktarı SiO' dan oluşan gazlar çıkmaktadır. Gaz halindeki SiO' nun, fırının soğuk bölgelerinde havayla temas etmesiyle ve çok çabuk yoğunlaştırılmasıyla, gazın içerisindeki SiO , amorf yapıya sahip SiO_2 durumuna dönüşmektedir.

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutularak yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen ve %85-%98 kadar silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katkı parçacıklarından oluşan malzemeye “silis dumanı” adı verilmektedir. Bu malzemeye, mikrosilis, silis tozu veya silika fûme gibi isimlerde verilmektedir.

Silis dumanı amorf yapıya sahip, çok ince taneli malzeme olduğundan ve bünyesinde yüksek miktarda SiO_2 içerdiğinden mükemmel bir puzolanik malzemedir. Diğer puzolanik malzemeler gibi, kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştirildiği takdirde, hidrolik bağlayıcılık göstermektedir.

Silis dumanı, Portland çimentosu klinkerleriyle ve küçük miktardaki alçıyla birlikte öğütülerek “silis dumanlı çimento” üretiminde kullanılabilir. Ancak asıl kullanımı, beton katkı maddesi tarzındadır.

Genellikle, beton karışımında yer alan çimento miktarı %10 kadar azaltılmakta ve onun yerine bu puzolanik madde yerleştirilmektedir. Çok ince taneli olması ve çok yüksek miktarda SiO_2 içermesi nedeniyle gerek ilk zamanlarda ve gerekse nihai olarak oldukça yüksek dayanımlı betonların elde edilmesinden kullanılmaktadır.

Silis dumanının çok ince tanelerden meydana gelmiş olması, taze betonun kıvamını ve işlenebilirliğini azaltmakta ve su ihtiyacını artırmaktadır. Bu nedenle, yüksek dayanımlı beton üretimi için katkı maddesi olarak silis dumanı kullanıldığında ayrıca su azaltıcı katkı malzemesi de kullanılmaktadır [45].

Bu tez çalışmasında kullanılan silis dumanı Eti Elektrometalürji A.Ş. Antalya tesisinden temin edilmiştir.

4.1.2.2. Uçucu Kül

Uçucu kül, termik santrallerde pulverize kömürün yanması sonucu meydana gelen baca gazları ile taşınarak siklon veya elektrofilitrelerde toplanan önemli bir yan üründür. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu meydana gelen ergimiş malzeme soğuyarak, gaz akışı ile kısmen veya tamamen küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. Bu kül tanecikleri çok ince (0.5–150 mikron) olup, baca gazları ile sürüklenmeleri nedeniyle, uçucu kül olarak adlandırılmaktadır.

Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO olup, bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Ayrıca MgO , SO_3 ve alakali oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır. Uçucu küldeki temel oksitlerden SiO_2 %25–60, Al_2O_3 %10–30, Fe_2O_3 %1-15 ve CaO %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Bu farklı aralıklardaki değerler uçucu külün tipini karakterize etmektedir [46].

4.1.2.2.1. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu Küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C618 ve TS EN 197–1 standartları temel alınmaktadır [47–49].

ASTM C618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

- F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70’den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi %10 altında olduğu için düşük kireçli olarak adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.
- C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50’ den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde $\text{CaO} > \%10$ olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğinin yanı sıra bağlayıcı özelliğe sahiptirler.

TS EN 197–1’ e göre sınıflandırmada uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar

- V sınıfı uçucu küller, çoğunlukla puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde reaktif kireç (CaO) oranının %10’ dan az reaktif silis miktarının %25’ den fazla olmaması gerekmektedir.
- W sınıfı küller ise, hidrolik ve /veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 ’ den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşeni içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10’ dan fazla, silis miktarının da %25’ den fazla olması gerekmektedir.

Deneylerde kullanılan Uçucu kül ise T.E.A.Ş.’ a bağlı bulunan Bursa Orhaneli termik santralinden temin edilen ASTM C 618’de tanımlanan F sınıfı uçucu küldür. Çimento, uçucu kül ve silis dumanına ilişkin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.1’ de verilmiştir.

Tablo 4.1 Çimento, uçucu kül ve silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri

Bileşenler %	Portland Çimentosu	Uçucu Kül	Silis Dumanı
SiO ₂	21.12	48.53	91
Al ₂ O ₃	5.62	24.61	0.58
Fe ₂ O ₃	3.24	7.59	0.24
CaO	62.94	9.48	0.71
MgO	2.73	2.28	0.33
KK	1.42	1.69	1.84
Özgül Yüzey Alanı (cm ² /gr) (Blaine)	3430	2836	--
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3.10	2.27	2.2

4.1.3. Akışkanlaştırıcı

Betona reoplastik özellik kazandırmak için formüle edilmiş, süper akışkanlaştırıcı suda çözünmüş sulfone sentetik polimer esaslı, klor içermeyen, yüksek oranda su azaltan, özellikle ilk zamanlarda betonunun mukavemetini hızlandırıp artıran, sıvı beton katkı malzemesidir. Katkılar genel olarak sadece çimento ile reaksiyona girer. Katkı betona ilave edildiğinde; çimento parçacıkları tarafından absorbe edilir. Çimento parçacıkları elektrostatik kuvvetle birbirlerini iter. Böylece çimento tanelerinin hareketini kolaylaştırarak betonun akışkanlık özelliği daha düşük su miktarı ile sağlanır. Karışım suyunun azalması ile orantılı olarak erken ve nihai mukavemet artışı sağlanır.

Yapılan deneylerde mineral katkı kullanıldığı için betonun iyi işlenebilmesi ve sıkışabilmesi için TS EN 934-2' ye göre yüksek oranda su azaltıcı süper akışkanlaştırıcı ve sertleşmeyi hızlandırıcı katkı maddesi (RHEOBUILD 1000) kullanılmıştır. Kullanılan katkı maddesinin teknik özellikleri Tablo 4.2' de verilmiştir [50].

Tablo 4.2 Deneylerde kullanılan akışkanlaştırıcının teknik özellikleri

Yoğunluk (gr/cm ³) (20°C)	1.2–1.22
Klor % (EN 480–10)	<0.1
Renk	Kahverengi
Homojenite	Homojen
Kimyasal İçeriği	Naftalin sülfonat esaslı

4.1.4. Agrega

Beton üretiminde kullanılan agreganın dane çapı 16 mm ve 8 mm olarak seçilmiştir. Maksimum dane çapının iki farklı değerde seçilmesinin sebebi, donatı ve beton arasındaki aderans dayanımı değerine agreganın dane çapının etkisini araştırmaktır. Deneylerde kullanılan agregaya ait fiziksel, kimyasal ve mekaniksel özellikler Tablo 4.3’ de verilmiştir

Tablo 4.3 Deneylerde kullanılan agregaya ait özellikler

Agrega türü	Özgül Ağırlığı (gr/cm³)	Su Emme (%)	Aşınma kaybı (%)	Kil miktarı (%)
Kum	2.7	1.40	-	1.98
Çakıl	2,76	0.76	16.6	1.98

4.1.5. Beton Karışım Oranları

Karışımlarda süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Karışımların slump deneyi TS EN 206-1’e göre yapılmış ve çökme değeri S3 (10–15 cm) olarak elde edilmiştir. Çimento dozajı 400 kg/m³ alınmıştır. Karışım oranları birim hacim hesabına göre hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan betonun karışım oranları Tablo 4.4 ve 4.5’ de verilmiştir.

Tablo 4.4 Maksimum agregâ dane çapı 16 mm olan numuneler için kullanılan betonun karışım oranları

Karışım	Çimento (kg/m ³)	Uçucu Kül (kg/m ³)	Silis Dumanı (kg/m ³)	Su/Çimento	Kum (kg/m ³)	Çakıl (kg/m ³)	Akışkanlaştırıcı (l/m ³)
PÇ	400	--	--	0.40	842	1052	4,8
UK	340	60	--	0.40	834	1041	4,8
SD	360	--	40	0.40	837	1043	4,8

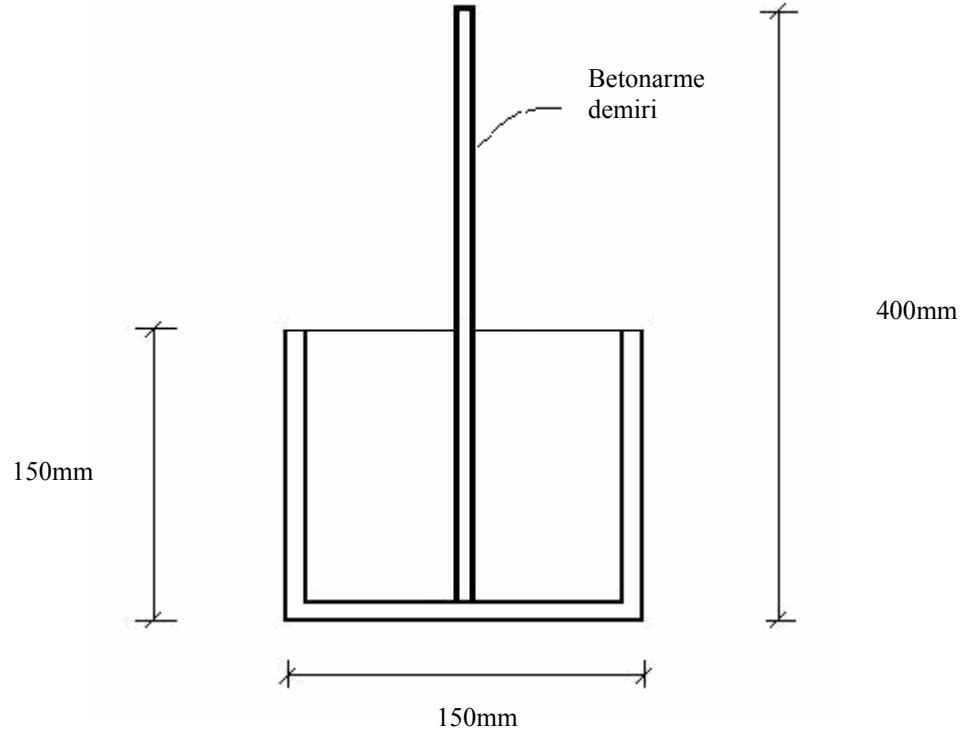
Tablo 4.5 Maksimum agregâ dane çapı 8 mm olan numuneler için kullanılan betonun karışım oranları

Karışım	Çimento (kg/m ³)	Uçucu Kül (kg/m ³)	Silis Dumanı (kg/m ³)	Su/Çimento	Kum (kg/m ³)	Çakıl (kg/m ³)	Akışkanlaştırıcı (l/m ³)
PÇ	400	--	--	0.40	918	967	4,8
UK	340	60	--	0.40	907	959	4,8
SD	360	--	40	0.40	910	962	4,8

4.1.6. Deney numunelerin hazırlanması

Bu çalışmada, toplam 270 adet aderans deney numunesi ve 135 adet basınç dayanımı deney numunesi hazırlanmıştır. Deney numuneleri hazırlanırken agregalar, çimento ve mineral katkıların ağırlıkları belirlendikten sonra beton mikserine yerleştirilmişlerdir. Yerleştirilen malzemeler önce beton mikserinde kuru olarak 1 dakika karıştırılmıştır. Su ve akışkanlaştırıcı tartılarak bir kapta karıştırılmıştır. Karıştırılan su ve akışkanlaştırıcı karışıma ilave edilerek 3 dakika daha karıştırılmıştır. Karışım hazırlanıp düz ve nervürlü betonarme demirleri kalıplara yerleştirildikten sonra beton, 150×150×150 mm standart küp numunelere 3 aşamada dökülmüştür. Aderans ölçümleri için kullanılan betonarme demirlerinin uzunluğu 400 mm. dir. Bu deneylerde karşılaşılan en büyük sorun, donatı beton dökülürken ve sıkılaştırılırken tam merkezde ve dik olarak durabilmesini sağlamaktır. Bunun için, 150×150×150 mm boyutlarındaki plastik küp numuneler freze kullanılarak dikey olarak kesilip, plastik kalıpta dikey bir yol açılmıştır. Plastik kalıpta oluşturulan bu yoldan betonun akmaması için ve plastik kalıbın

kesilmeyen diğ er yüzeyinde donatının tam merkezde durabilmesi için 1mm kalınlığında demir saclar kullanılmıştır. Bu sacların ortasında kullanılan donatının çapına göre delikler açılmıştır. Hazırlanan betonarme demirleri beton içerisinde 150 mm kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Kullanılan aderans deney kalıbı şekil 4.1. a ve şekil 4.1b de verilmiştir.



(a)



(b)

şekil 4.1 Aderans deney kalıbı

4.2. Beton Numunelere Uygulanan Kürler

Çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların büyük bir bölümü, normal olarak, betonun ilk günlerinde yer almaktadır. Bu nedenle, betonun içerisinde yeterli miktarda suyun ve sıcaklığın bulunması, özellikle betonun ilk günleri için çok önemlidir [45].

Betonun ilk günlerinde, yeterince hidrasyonunu sağlayabilmek için beton içerisinde yeterli miktarda suyun ve sıcaklığın bulundurulması ve bu ortamın korunması işlemi betonun kürü olarak adlandırılmaktadır [51].

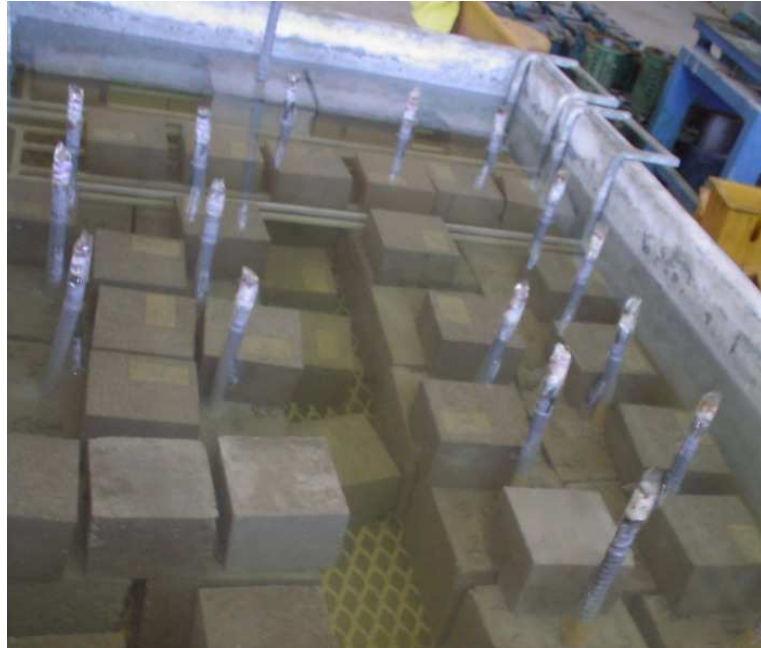
Bu tez çalışmasında, deney numunelerine üç farklı kür yöntemi uygulanmıştır.

4.2.1. Su Kürü Koşulu

Betonun tamamen su içerisinde kür edilmesi, betona uygulanan kür yöntemleri arasında en mükemmel sonucu veren yöntemdir.

Betonun tamamen su içerisinde kür edilebilmesi yöntemi, beton numunelerini veya bazı öndöküm beton elemanlarını suyla dolu bir havuz içerisine yerleştirmek suretiyle gerçekleştirilebilmektedir. Ancak tüm yapının tamamen su içerisinde bulundurulabilmesi elbette ki mümkün değildir [45].

Bu tez çalışmasında, standart kür uygulanan numuneler Şekil 4.2’ de verilmiştir.



Şekil 4.2 Standart su kür koşulu uygulanan numuneler

4.2.2. Beton Yüzeyinin Plastik Malzemedan Kaplanarak Yapılan Kür (Naylon Kür) Koşulu

Beton yüzeyinin minimum 0.10 mm kalınlıktaki bir plastik örtü veya iki katlı bir kraft kâğıdı ile örtülerek kür edilmesi yöntemi oldukça rağbet gören bir yöntemdir. Bunun nedeni, bu tür malzemelerin kolayca uygulanabilir olmasına ve yöntemin uygulanmasında fazla işçilik gerekmemesine dayanmaktadır [45].

Bu tez çalışmasında, beton numuneler naylon içine yerleştirilerek kendi nem ortamlarında kür uygulanmıştır. Bu kür koşulu uygulanan numuneler Şekil 4.3’ de verilmiştir.



Şekil 4.3 Naylon kür koşulu uygulanan numuneler

4.2.3. Hava Kürü

Bu tez çalışmasında, beton numuneler laboratuvar ortamında kür edilmiştir. Hava kürü uygulanan numuneler Şekil 4.4’ de verilmiştir.



Şekil 4.4 Hava kür koşulu uygulanan numuneler

4.3. Uygulanan Deneyler

4.3.1. Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı deneyi, her yaş için 3'er adet 150×150×150 mm küp numuneler üzerine gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanım deneyi, TS EN 12390–3 standardı uyarınca ve 3000 kN kapasiteli otomatik kontrollü pres kullanılarak gerçekleştirilmiştir [52].

Basınç dayanımı aşağıdaki formüller hesaplanmıştır:

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

f_c = Beton deney numunesi basınç dayanımı (N/mm²)

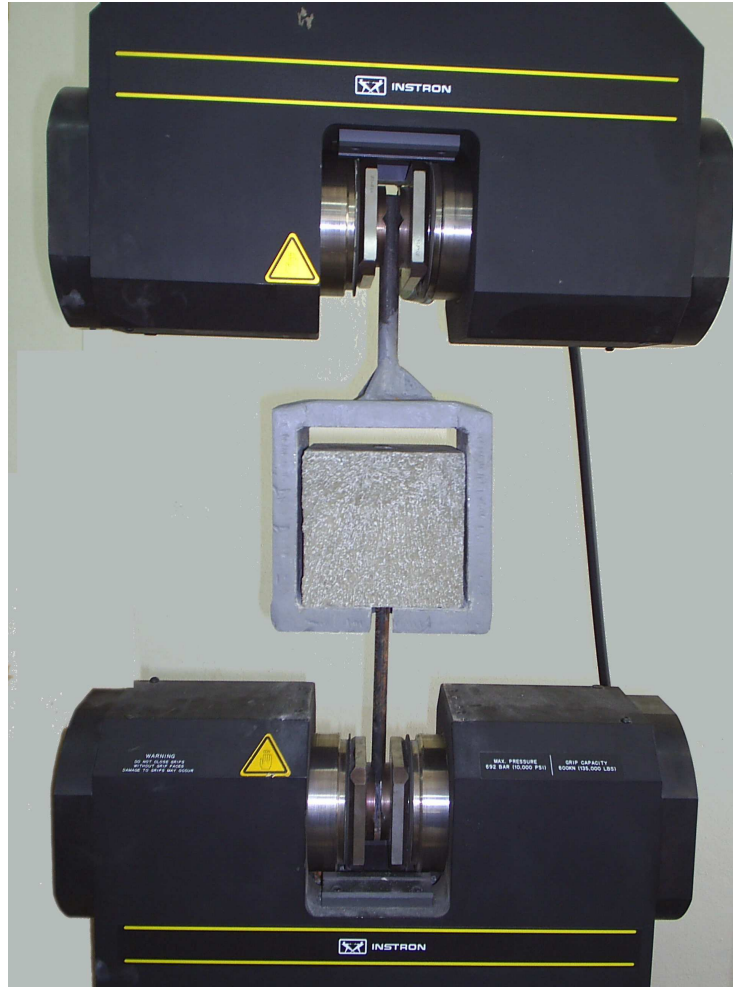
P= Kırılma yükü (N),

A= Kesit alanı (mm²)

Basınç dayanımı deneyi, her grup için üç numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı bu numunelerin ortalamaları alınarak belirlenmiştir.

4.3.2. Aderans dayanım deneyi

Aderans deneyleri 150×150×150 mm küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Bütün aderans deney numuneleri 3, 7, 14 ve 28 gün farklı kür koşullarında bekletildikten sonra ASTM C 234-91a uyarınca yapılmıştır [53]. Aderans deneyi için INSTRON 8503 çekme makinesi kullanılmıştır. Deneylerde çekme makinesinin hızı 2mm/dk olacak şekilde sabit tutulmuştur. Yapılan aderans deneyinin düzeneği Şekil 4.5 a ve b' de gösterilmiştir.



a) Deney öncesi



b) Deney sonrası

Şekil 4.5 Aderans deney düzeneği

Aderans dayanımı deneyi, her grup için üç numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Aderans dayanımı bu numunelerin ortalamaları alınarak belirlenmiştir.

5. DENEY SONUÇLARI VE DENEY SONUÇLARININ REGRESYON ANALİZİ

5.1. Deney sonuçları

Bu tez çalışmasında, toplam 270 adet aderans deney numunesi ve 135 adet basınç dayanımı deney numunesi hazırlanmıştır. Bu numuneler 3, 7, 14 ve 28 gün farklı kür ortamlarında bekletildikten sonra aderans dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

Deneylerde elde edilen aderans kuvvetinin yardımıyla aderans dayanımı aşağıda verilen formülle hesaplanmıştır:

$$\tau = \frac{\text{Aderanskuvveti}}{\pi \times \phi \times l} \quad (5.1)$$

Bu formülde;

τ = Aderans gerilmesi

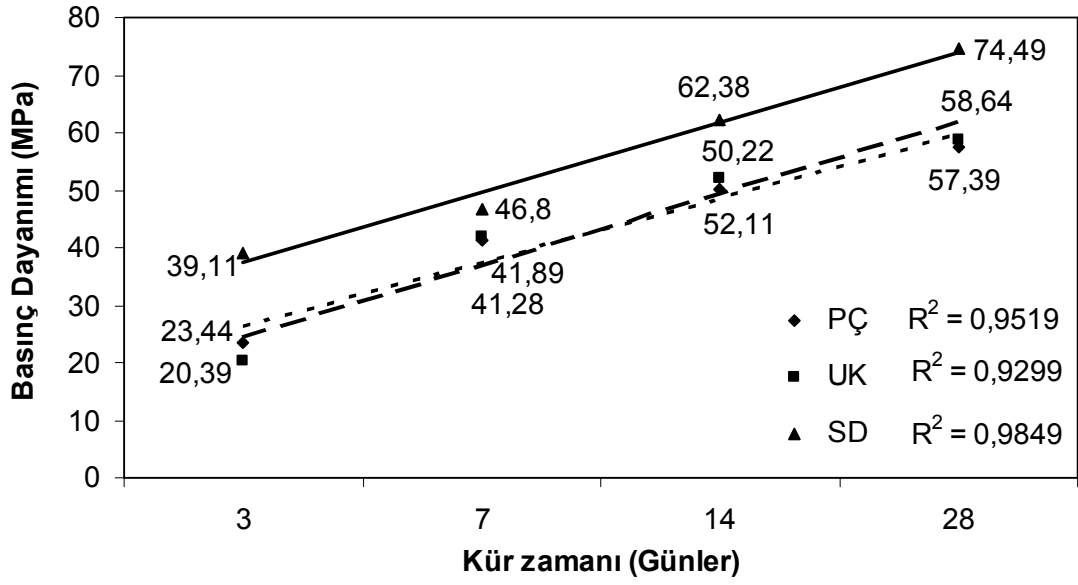
ϕ =Donatı çapı

l = Aderans boyu (betona gömülü donatı uzunluğu) alınmıştır [54–56].

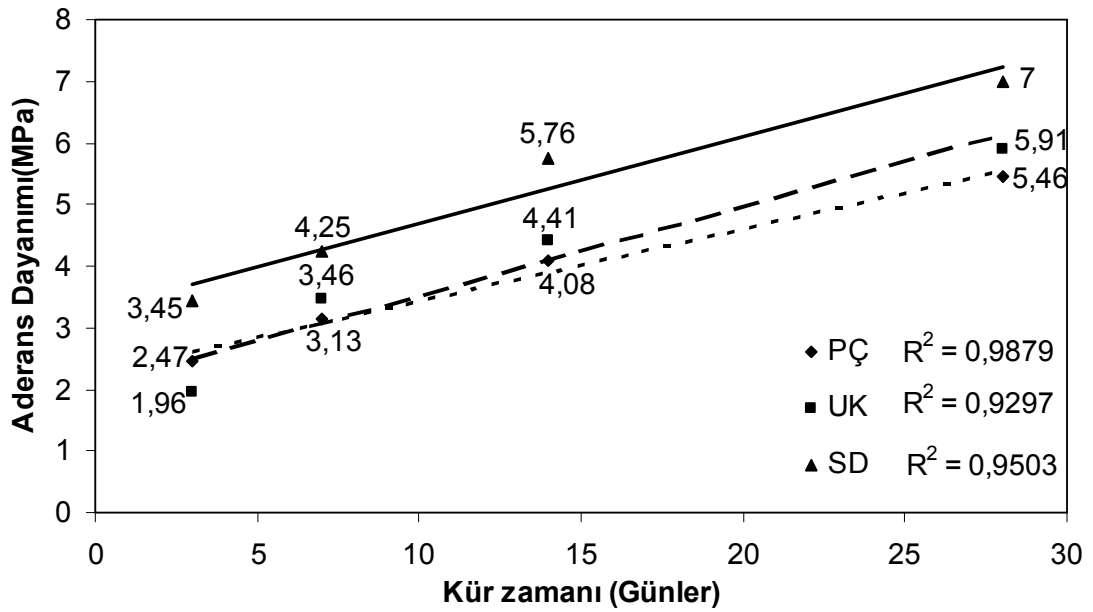
Deneyler yapılırken betonun içine gömülmüş olan donatının akmadan sistemin göçtüğü gözlenmiştir. 3, 7 ve 14 gün kür koşullarında bekletilen numunelerin aderans deneyinde donatı sıyrılma şeklinde olduğu, 28 gün bekletilen numunelerin aderans dayanımı deneyinde donatı betonu yardığı gözlemlenmiştir.

Yapılan aderans ve basınç dayanımı deneylerinin sonuçları Şekil 5.1–5.10’ da verilmiştir. Deney numunelerine su kürü, hava kürü ve naylon kürü olmak üzere 3 farklı kür şartı uygulanmıştır.

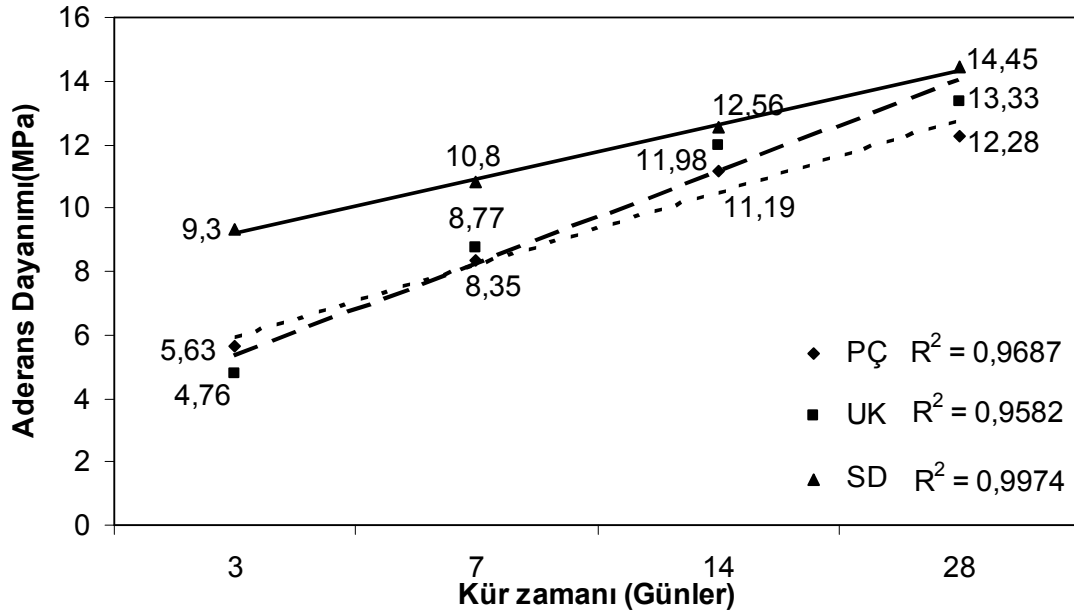
Şekil 5.1–5.3 görüldüğü gibi en yüksek aderans ve basınç dayanımını su kürü uygulanan numunelerde elde edilmiştir. Su küründen sonra sırasıyla naylon kürü ve hava kürü uygulanan numuneler gelmiştir.



Şekil 5.1 Su kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımı deneyi sonuçları



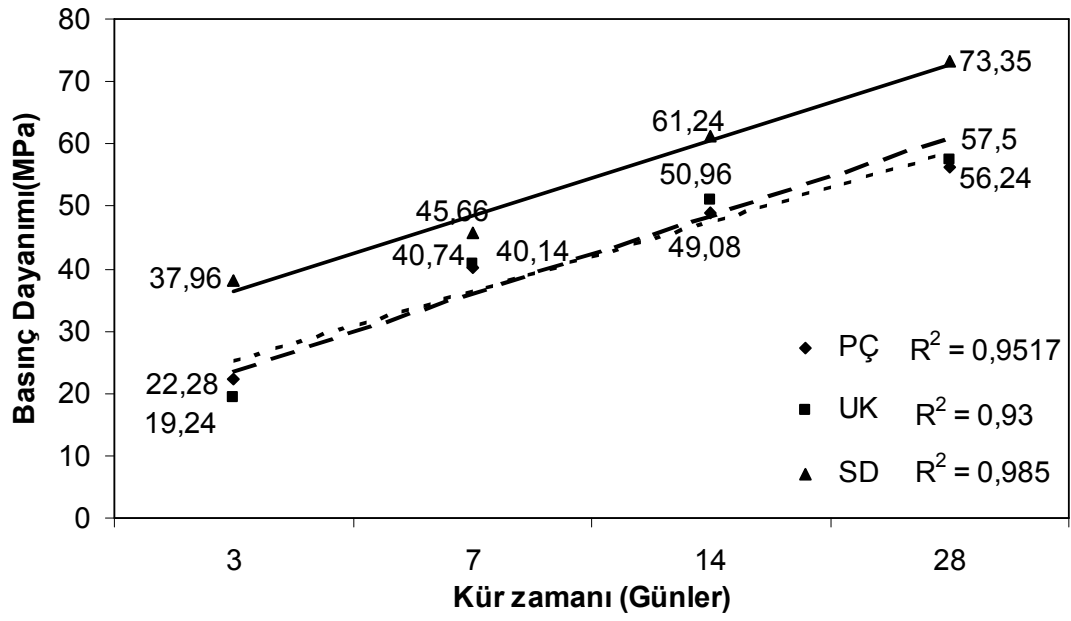
Şekil 5.2 Su kürü uygulanan düz demirli numunelerin aderans dayanımı deneyi sonuçları



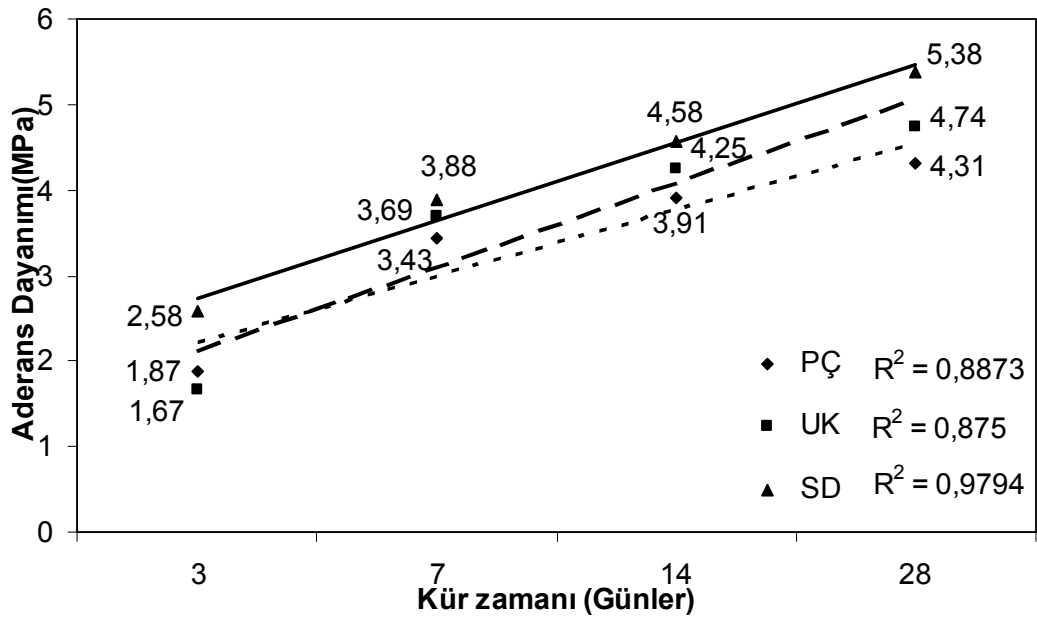
Şekil 5.3 Su kürü uygulanan nervürlü demirli numunelerin aderans dayanımı deneyi sonuçları

Şekil 5.1–5.9’ da görüldüğü gibi, deneylerde kullanılan silis dumanı katkılı beton numuneleri her yaşta en büyük basınç ve aderans dayanımı değerlerini vermiştir. Burada silis dumanı çimento hidratasyonu süresince serbest kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek betonun basınç ve aderans dayanımı gelişiminde etkili olmaktadır [57, 58]. Ayrıca silis dumanı tane boyutu, çimento ve uçucu kül tane boyutundan çok daha küçük olduğu için agrega/çimento ara yüzeyinde puzolanik aktiviteden daha önemli filler etkisi gerçekleştirerek daha yoğun bir agrega-bağlayıcı ara yüzeyi oluşturmaktadır [59].

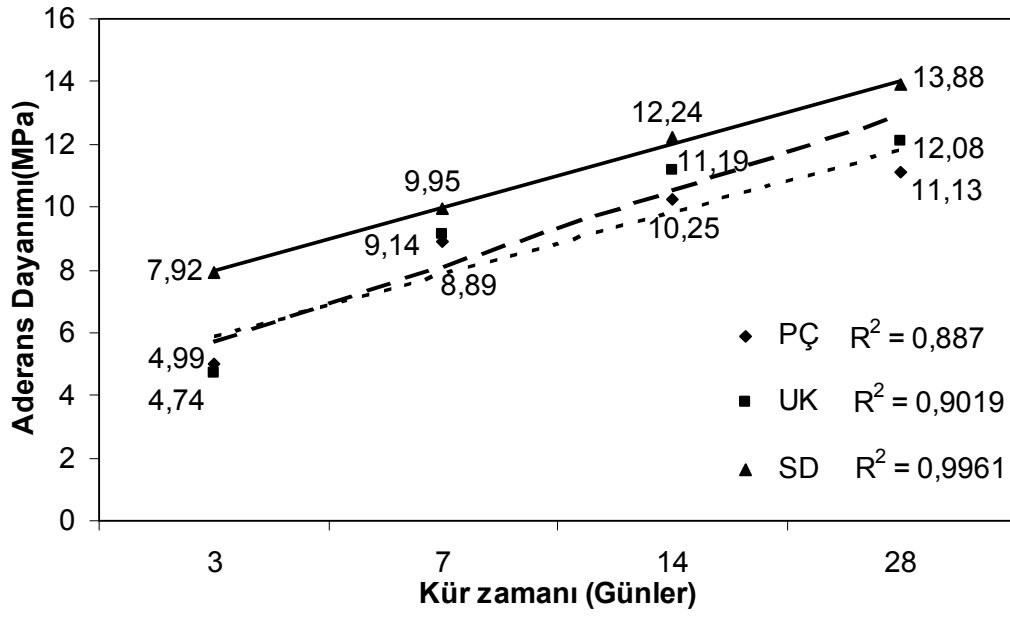
Şekil 5.1–5.9’ da görüldüğü gibi, deneylerde kullanılan uçucu külün aderans ve basınç dayanımına katkısı ise 3. günden sonra ortaya çıkmış ve 7, 14 ve 28 gün sonunda kontrol betonunu geçmiştir. 3 gün sonunda uçucu kül, hidratasyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan serbest kireçle reaksiyona girerek puzolanik aktivite etkisi göstermiştir. Ayrıca şekillerde görüldüğü gibi nervürlü demirli aderans numunelerinin aderans dayanımları düz demirlere göre yaklaşık iki kat mertebesinde dir.



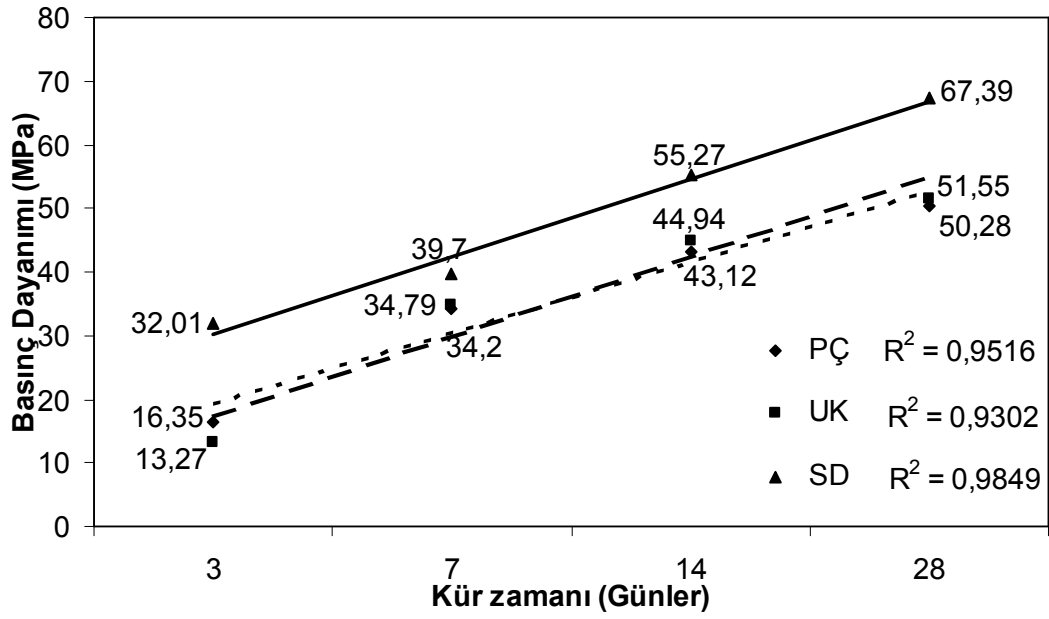
Şekil 5.4 Naylon kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımı deneyi sonuçları



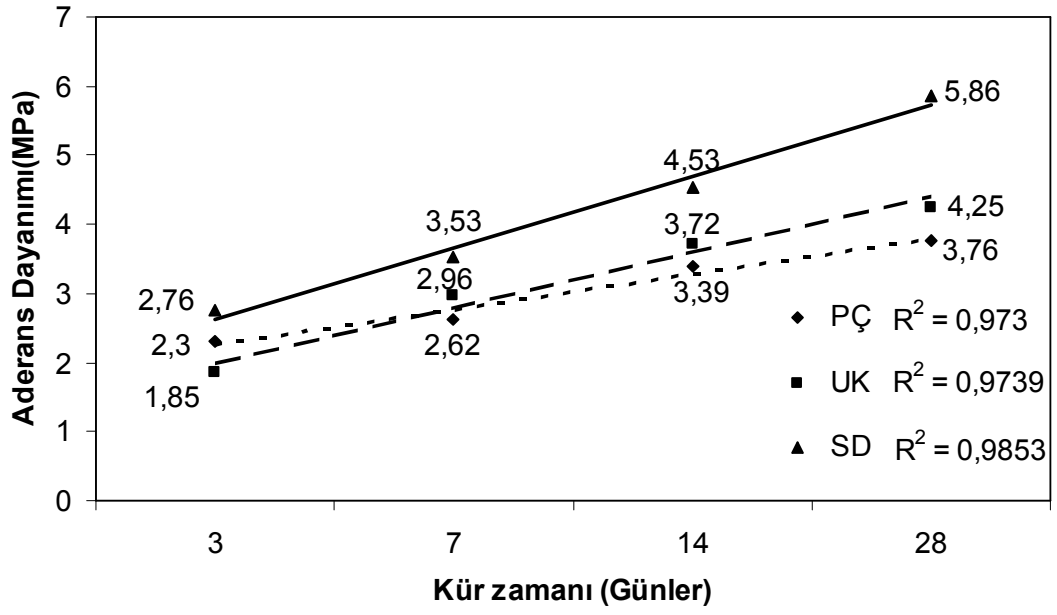
Şekil 5.5 Naylon kürü uygulanan düz demirli numunelerin aderans dayanımı deneyi sonuçları



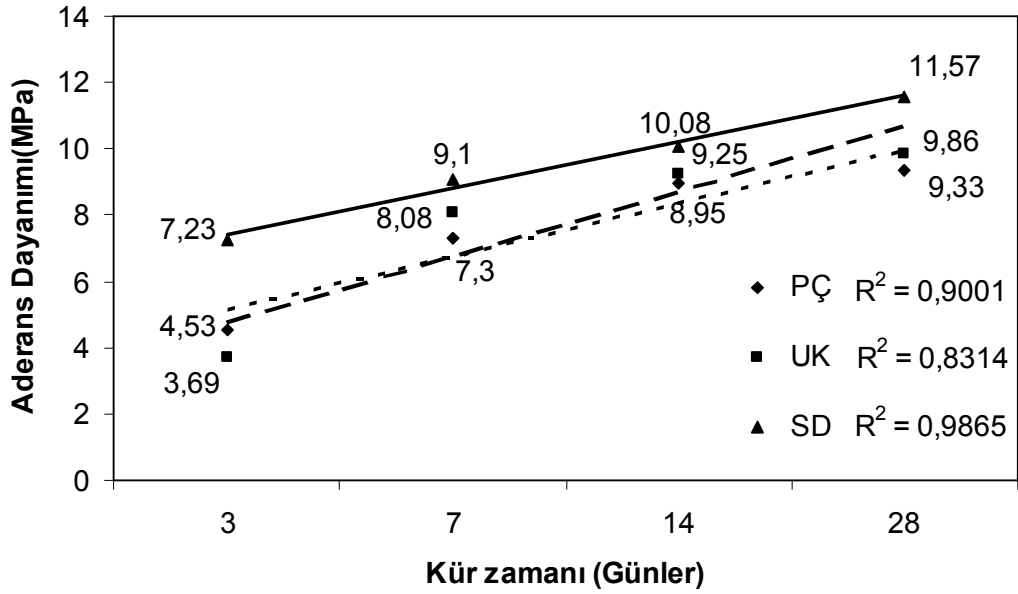
Şekil 5.6 Naylon kürü uygulanan nervürlü demirli numunelerin aderans dayanımı deneyi sonuçları



Şekil 5.7 Hava kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımı deneyi sonuçları



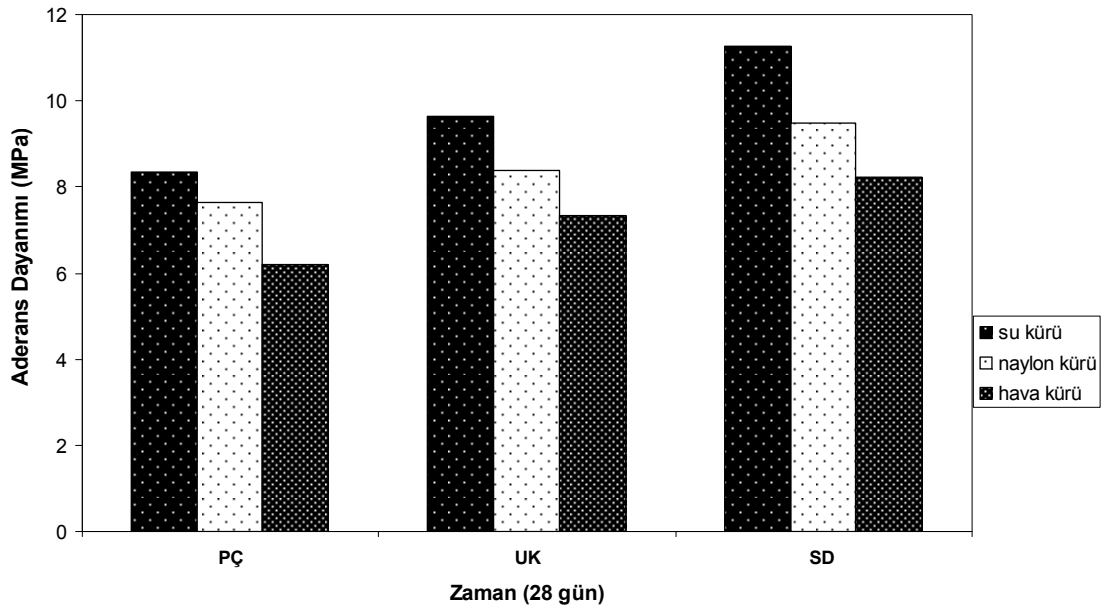
Şekil 5.8 Hava kürü uygulanan düz demirli numunelerin aderans dayanımı deneyi sonuçları



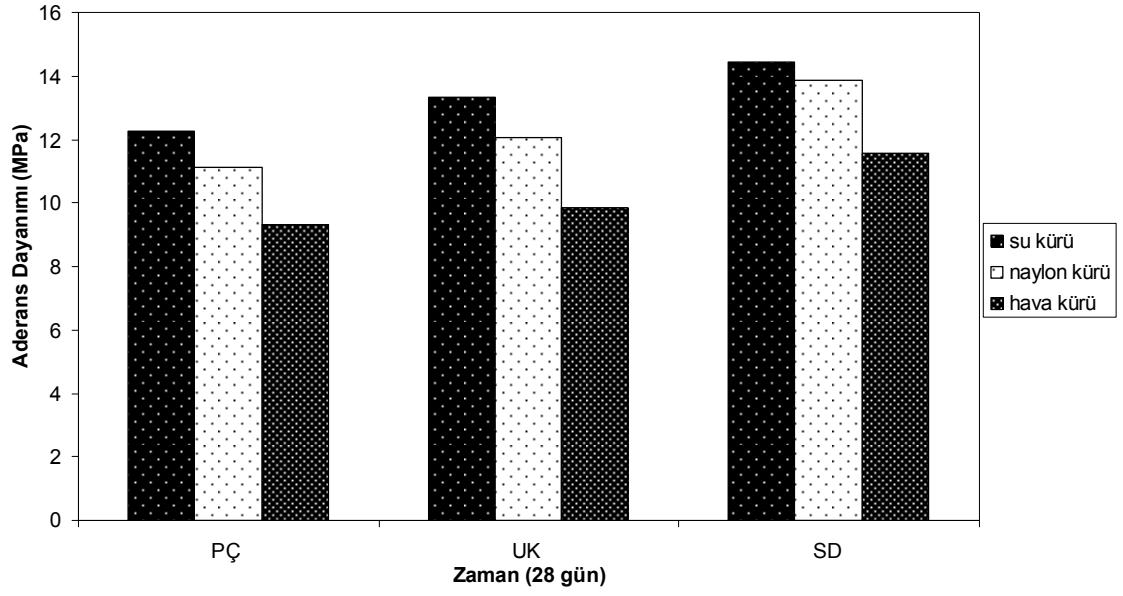
Şekil 5.9 Hava kürü uygulanan nervürlü demirli numunelerin aderans dayanımı deneyi sonuçları

Deneylerde 8mm ve 16 mm olmak üzere iki farklı maksimum agregada dane çapı kullanılmıştır. Şekil 5.10–5.11’ de görüldüğü gibi, deneylerde kullanılan maksimum agregada dane çapı arttıkça aderans dayanımında bir artış görülmüştür. Diğer bir deyişle betonda yer alan agregada tane çapı büyüdükçe çelik çubuğun sıyrılmaya karşı gösterdiği direnç artmaktadır.

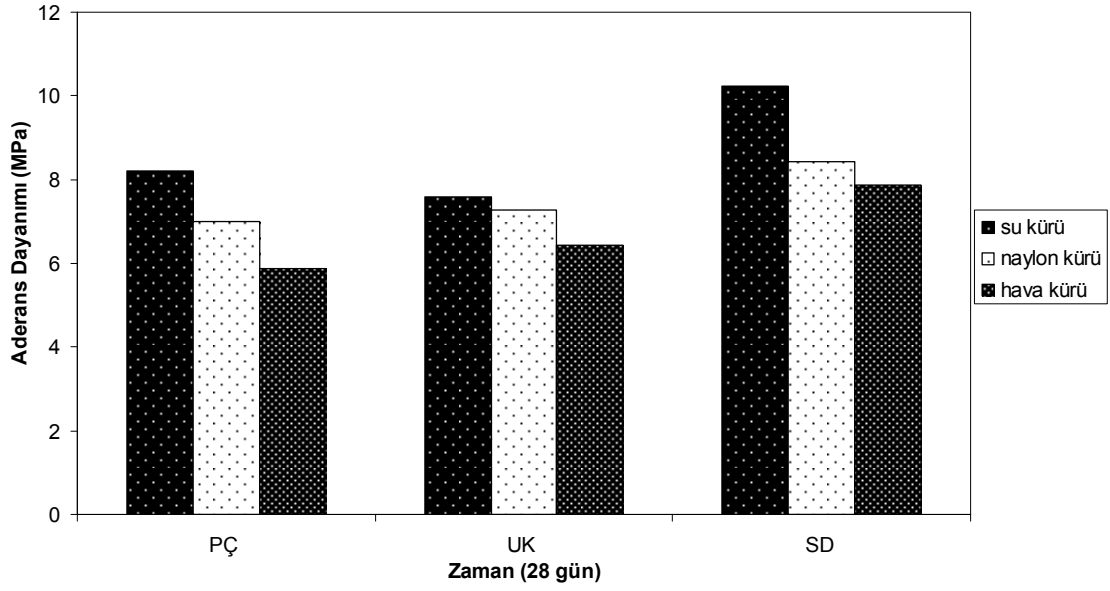
Deneylerde 14 mm ve 20 mm olmak üzere iki farklı donatı çapı kullanılmıştır. Şekil 5.11–5.12’ de görüldüğü gibi deneylerde kullanılan donatı çapının boyutu arttıkça aderans dayanımı azalmıştır. Çünkü donatı çapının artmasıyla kesit alanı artan donatıya gelen kuvvetin sonucunda kenetlenme azalacaktır.



Şekil 5.10 28 günlük 8mm agregada dane çapı ve 14 mm donatı çaplı numunelerin aderans dayanımı deneyi sonuçları



Şekil 5.11 28 günlük 16 mm agrega dane çapı ve 14 mm donatı çaplı numunelerin aderans dayanımı deneyi sonuçları



Şekil 5.12 28 günlük 16 mm agrega dane çapı ve 20 mm donatı çaplı numunelerin aderans dayanımı deneyi sonuçları

5.2. Deney Sonuçlarının Regresyon Analizi

İstatistik biliminin en önemli uygulamalarından birisini regresyon analizi oluşturmaktadır. Regresyon analizi mühendislik, araştırma matematik, finans, ekonomi gibi bilim dallarında yoğun olarak kullanılmaktadır [60].

Regresyon analizinin temelinde; gözlenen bir olay değerlendirilirken, hangi olayların etkisi içinde olduğunun araştırılması yatmaktadır. Bu olaylar bir veya birden çok olacağı gibi dolaylı veya direkt olarak etkileniyor olabilirler [60].

Regresyon analizi yapılırken, gözlem değerlerinin ve etkilenilen olayların bir matematiksel gösterimle yani bir fonksiyon yardımıyla ifadesi gerekmektedir. Kurulan bu modele regresyon modeli denilmektedir [60].

Regresyon analizi incelenirken, genellikle konusunu oluşturan, etkilendiği olaylara değişkenler adı verilir. Bu değişkenlerin yer alacağı matematiksel model incelenir [60].

Şekil 5.13–5.15’de aynı özellikteki malzemelerin 28 günlük aderans ve basınç dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlar karşılıklı olarak regresyon analizi yapılarak incelenmiştir. Bu grafiklerde, beton numunelere uygulanan kür koşulları dikkate alınarak ampirik denklem için en uygun eğri çizilmiştir.

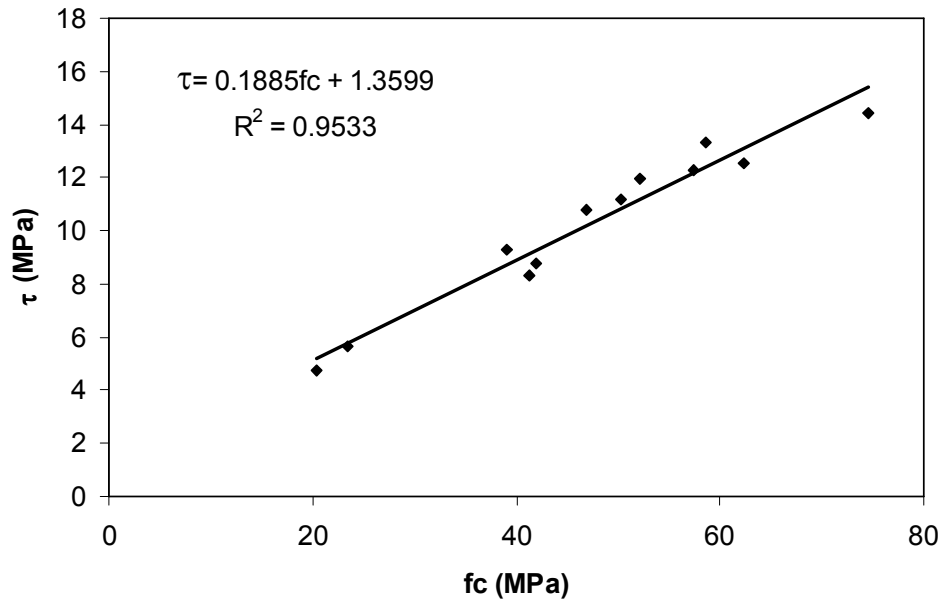
Şekil 5.13’de su kürü uygulanan numunelerin lineer regresyonu sonucunda elde edilen eğriye ait belirlilik katsayısı ve denklem (5.2) bulunmuştur. Bu denklemin korelasyon katsayısı $r=0.976$ dır.

$$\tau = 0.1885 f_c + 1.3599 \quad (5.2)$$

Bu formülde;

τ = Beton deney numunesi aderans dayanımı (MPa),

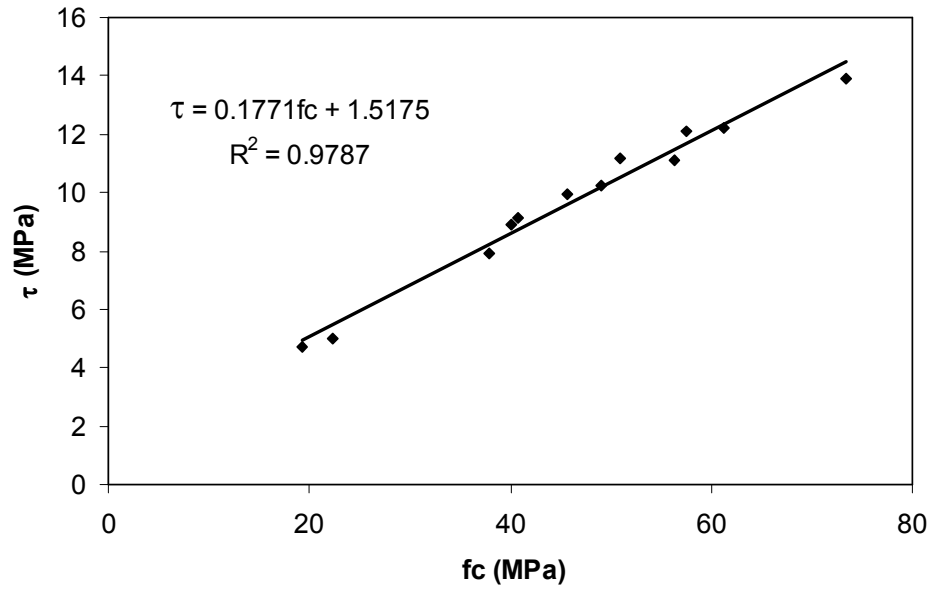
f_c = Beton deney numunesi basınç dayanımıdır (MPa).



Şekil 5.13 Su kürü uygulanan numunelere lineer regresyon analizi sonucunda elde edilen amprik denkleme ait grafik

Şekil 5.14’de naylon kürü uygulanan numunelerin lineer regresyonu sonucunda elde edilen eğriye ait belirlilik katsayısı ve denklemin (5.3) bulunmuştur. Bu denklemin korelasyon katsayısı $r=0.989$ dır.

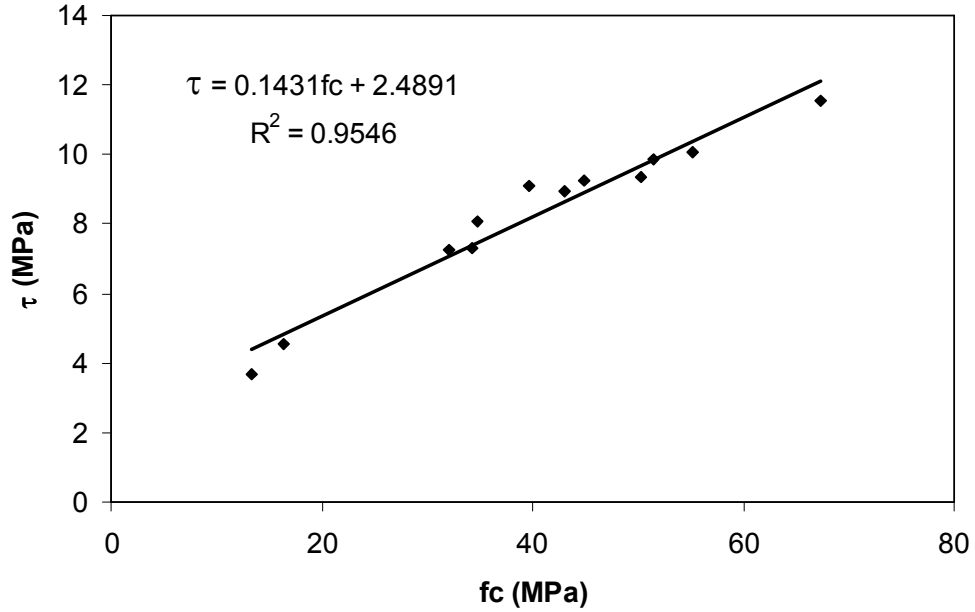
$$\tau = 0.1771f_c + 1.5175 \quad (5.3)$$



Şekil 5.14 Naylon kürü uygulanan numunelere lineer regresyon analizi sonucunda elde edilen amprik denkleme ait grafik

Şekil 5.15’ de hava kürü uygulanan numunelerin lineer regresyonu sonucunda elde edilen eğriye ait belirlilik katsayısı ve denklem (5.4) bulunmuştur. Bu denklemin korelasyon katsayısı $r=0.977$ dir.

$$\tau = 0.1431f_c + 2.4891 \quad (5.4)$$

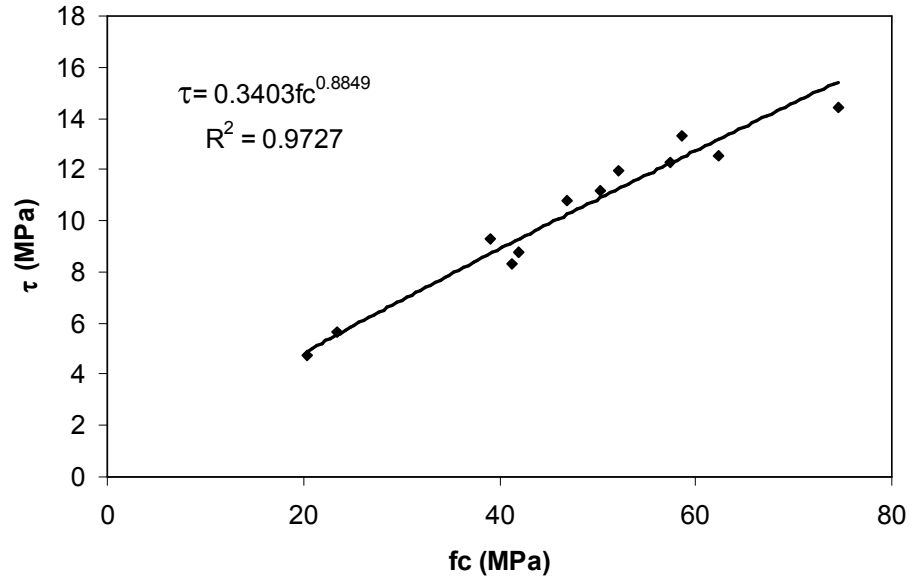


Şekil 5.15 Hava kürü uygulanan numunelere lineer regresyon analizi sonucunda elde edilen ampirik denkleme ait grafik

Aderans dayanımı ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi daha iyi inceleyebilmek için lineer olmayan regresyon analizi de yapılmıştır. Şekil 5.16–5.18’de aynı özellikteki malzemelerin aderans dayanımı ve basınç dayanımı için regresyon analizi sonuçları verilmiştir. Bu grafiklerde, beton numunelere uygulanan kür koşulları dikkate alınarak ampirik denklem için en uygun eğri çizilmiştir.

Şekil 5.16’da su kürü uygulanan numunelerin lineer olmayan regresyonu sonucunda elde edilen eğriye ait belirlilik katsayısı ve denklem (5.5) bulunmuştur. Bu denklemin korelasyon katsayısı $r=0.986$ dır.

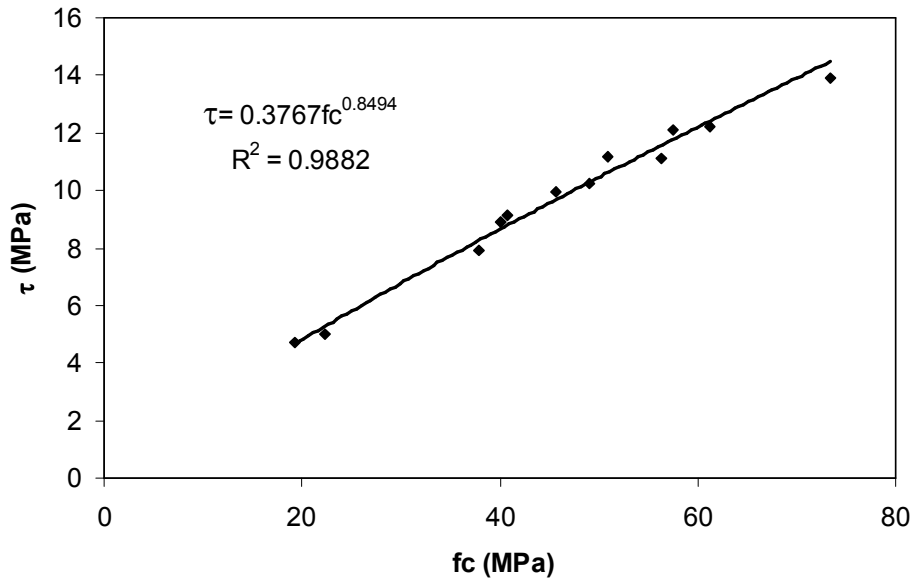
$$\tau = 0.3403f_c^{0.8849} \quad (5.5)$$



Şekil 5.16 Su kürü uygulanan numunelere lineer olmayan regresyon analizi sonucunda elde edilen ampirik denkleme ait grafik

Şekil 5.17’de naylon kürü uygulanan numunelerin lineer olmayan regresyonu sonucunda elde edilen eğriye ait belirlilik katsayısı ve denklem (5.6) bulunmuştur. Bu denklemin korelasyon katsayısı $r=0.994$ dir.

$$\tau = 0.3767f_c^{0.8494} \quad (5.6)$$



Şekil 5.17 Naylon kürü uygulanan numunelere lineer olmayan regresyon analizi sonucunda elde edilen ampirik denkleme ait grafik

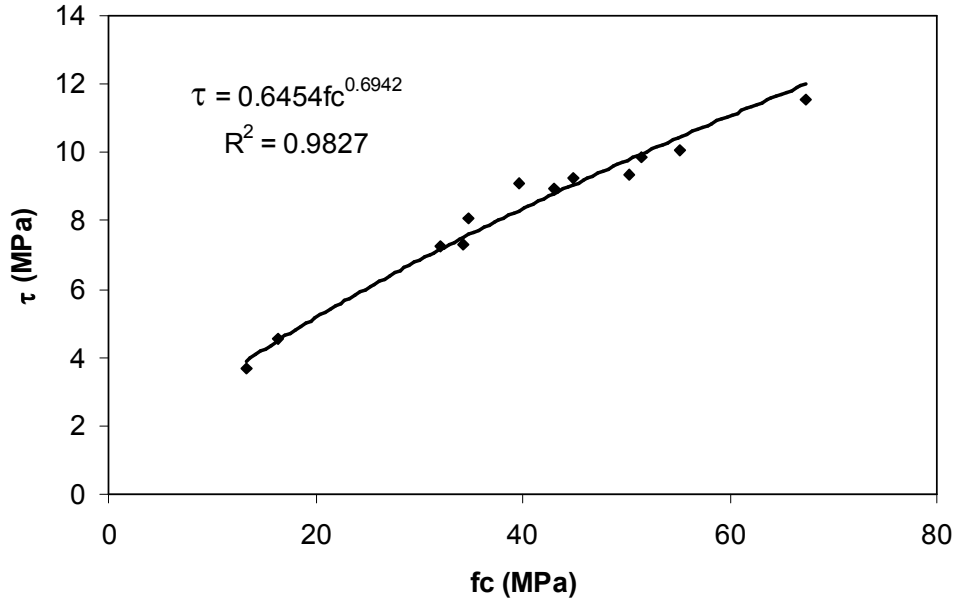
Şekil 5.18’ de hava kürü uygulanan numunelerin lineer olmayan regresyonu sonucunda elde edilen eğriye ait belirlilik katsayısı ve denklem (5.7) bulunmuştur. Bu denklemin korelasyon katsayısı $r=0.991$ dir.

$$\tau = 0.6454 f_c^{0.6942} \quad (5.7)$$

Bu formüllerde de;

τ = Beton deney numunesi aderans dayanımı (MPa),

f_c = Beton deney numunesi basınç dayanımıdır (MPa).



Şekil 5.18 Hava kürü uygulanan numunelere lineer olmayan regresyon analizi sonucunda elde edilen ampirik denkleme ait grafik

6.ADERANS DENEY PARAMETRELERİNİN VARYANS (ANOVA) ANALİZİ

Bu çalışmada, aderans dayanımı deney parametrelerinin istatistiksel olarak değerlendirilmesinde varyans analizi metodu (ANOVA-analysis of variance) ve F testi kullanılmıştır. Varyans analizi, aderans parametrelerinin istatistiksel olarak öneminin tespiti için yapılmıştır. F testi, aderans parametrelerinin performans karakteristikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olup olmadığını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Aderans parametresi değiştirildiğinde F değeri büyük çıktığı takdirde o parametrenin performans karakteristikleri üzerinde daha etkili olduğu anlaşılır.

Varyans analizinde deneysel değerler ile arzu edilen değerler arasındaki sapmayı hesaplamak için bir kayıp fonksiyonu (loss function) kullanılır. Bu kayıp fonksiyonu neticesinde elde edilen veriler daha sonra arzu edilen değerden sapan performans karakteristiğini belirlemek için bir dönüşüme sokulur. Bu dönüşüm, sinyal-gürültü oranı S/N (signal-to-noise ratio) olarak adlandırılır ve η ile gösterilir. S/N oranının analizinde, “daha düşük daha iyidir”, “nominal daha iyidir” veya “daha yüksek daha iyidir” gibi kayıp fonksiyonları kullanılabilir [61]. Bu çalışmada aderans dayanımının varyans analizinde "daha yüksek daha iyidir" kayıp fonksiyonu kullanılmıştır. LB kayıp fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$L_{ij} = \frac{1}{r_a} \sum_{i=1}^{r_a} \frac{1}{y_1^2} \quad (6.1)$$

Burada L_{ij} j'nci testteki i'nci performansın kayıp fonksiyonu, r_a bir denemedeki testlerin sayısı y ise her bir test için ölçülen değerdir. Bu çalışmada kullanılan agrega dane çapının boyutu, betonun basınç dayanımı, kullanılan donatının çapı, betonda kullanılan katkı ve betona uygulanan kür ortamı olmak üzere beş kontrol faktörü bulunmaktadır. Çalışmada kullanılan herhangi bir aderans dayanımı parametresinin değiştirilme sayısı seviyeyi, değişkenin aldığı değerde seviyenin değerini gösterir.

Bu çalışmada, basınç dayanımı 40 N/mm^2 nin altında olan düşük dayanımlı deney numuneleri, 40 N/mm^2 büyük ve 50 N/mm^2 den küçük olan orta dayanımlı deney numuneleri ve 50 N/mm^2 den büyük olan yüksek dayanımlı deney numuneleri olmak üzere toplam üç seviyelidir [62]. Agrega dane çapının boyutu 16 mm ve 8 mm olmak üzere toplam iki seviyelidir. Kullanılan donatının çapı, 14 mm ve 20 mm olmak üzere iki seviyelidir. Betonda kullanılan mineral katkı, katkısız kontrol betonu, uçucu kül katkılı beton ve silis dumanı katkılı

beton olmak üzere üç seviyelidir. Betona uygulanan kür ise, su kürü, naylon kürü ve hava kürü olmak üzere üç seviyelidir. Tablo 6.1 'de belirtilen aderans parametrelerinin her bir seviyesi verilmiştir.

Tablo 6.1 Aderans dayanımı parametreleri ve seviyeleri

Sembol	Aderans parametreleri	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
B	Betonun basınç dayanımı	N/mm ²	40>B	40≤B ≤50	B>50
D	Agrega tane çapının boyutu	mm	8mm	16mm	-
D	Kullanılan donatı çapının boyutu	mm	14mm	20mm	-
K	Betonda kullanılan mineral katkı	-	Katkısız	Uçucu Kül Katkılı	Silis Dumanı Katkılı
K	Betona uygulanan kür	-	Su Kürü	Naylon Kürü	Hava Kürü

Aderans dayanımı deneyi için yapılan Varyans analizinin sonuçları Tablo 6.1' de verilmiştir. Tabloda gösterilen F_{A0} değeri bir faktörün F testi değeri olup, faktörün F test değeri

$$F_{A0} = \frac{V_A}{V_e} \quad (6.2)$$

ile hesaplanır. Burada V_A , faktör A' nın varyansı ve V_e ise hatanın varyansıdır. Bulunan F_{A0} değeri, standart F testi tablolarındaki serbestlik dereceleri kullanılarak okunan F değeri ile karşılaştırılır. Eğer bu değer tablodaki değerden büyükse yani

$$F_{A0_{\text{hesaplanan}}} > F_{A0_{\text{tablo}}} \quad (6.3)$$

ise A faktörü önemlidir.

Herhangi bir faktörün yüzde dağılımı P (percent contribution), o faktörün karelerinin toplamının tüm faktörlerin karelerinin toplamına oranı ile elde edilir.

Yani:

$$P = \left[\frac{SS_A}{SS_T} \right] \times 100 \quad (6.4)$$

şeklindedir. Faktör A' nın karelerinin toplamı

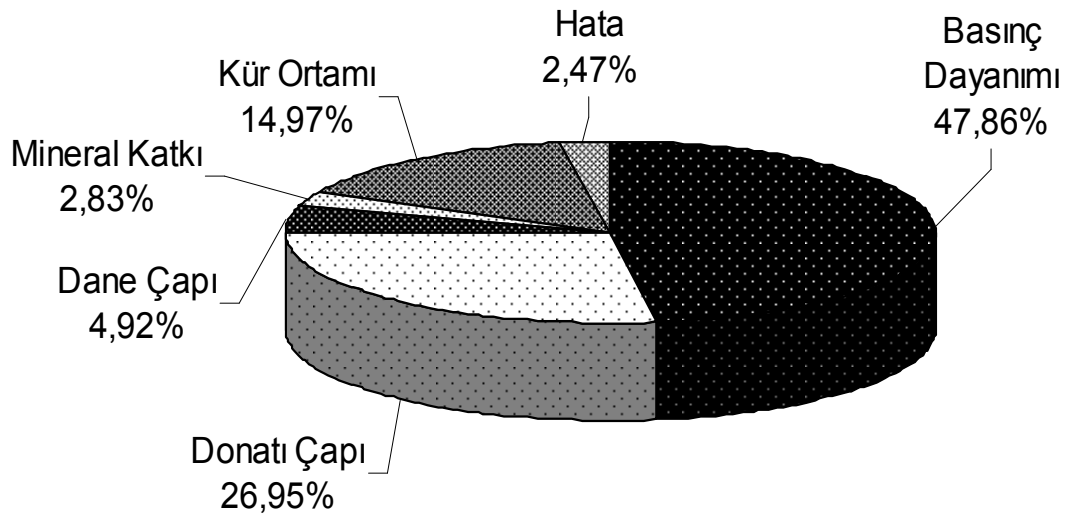
$$SS_A = \frac{\sum \eta_{Ai}^2}{N} - SS_m \quad (6.5)$$

şeklindedir. Burada N herhangi bir A parametresinin seviye sayısı, η S/N oranı ve SS_m ise ortalamanın kareleri toplamıdır [63]. Bağımsız her bir çift için serbestlik derecesi $f=1$ 'dir. Yani kullanılan faktörlerin seviye sayılarının bir eksiği serbestlik derecesini verir. Hazır program kullanılarak yapılan Varyans (Anova) analizi sonuçları Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2 Aderans dayanımı için ANOVA sonuçları

Aderans parametreleri	Serbestlik derecesi (f)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans (V _A)	F _{A0}	% Dağılım
Basınç dayanımı	2	71.507	35.753	196.53	47,86
Donatı çapı	1	40.266	40.266	174.51	26,95
Dane çapı	1	7.344	7,344	35.85	4,92
Mineral Katkı	2	4.238	2,119	10.34	2,83
Kür ortamı	2	22.367	11,184	54.58	14,97
Hata	18	3.688	0,205	-	2,47
Toplam	26	149,410	-	-	100

Her bir parametre için F_{A0} değeri, standart F testi %99 güvenilirlik tablolarındaki serbestlik dereceleri kullanılarak okunan F değeri ile karşılaştırılmıştır [63]. F testi sonucunda bulunan değerler Tablo 6.2 'de verilen değerlerden yüksek çıkmıştır. Böylece aderans dayanımı parametreleri üzerine yapılan F testinin %99 oranda doğru olduğu ortaya çıkmıştır. Şekil 6.1' de Varyans analizi sonucunda etkileyen parametrelerin aderans dayanıma % etkisi verilmiştir.



Şekil 6.1 Varyans (Anova) analizi sonucuna göre parametrelerin aderans dayanıma % etkisi

Şekil 6.1' de görüldüğü gibi aderans dayanımı üzerinde en büyük etkiyi sırasıyla kullanılan betonun basınç dayanımı ve donatının çapı yaparken bunları sırasıyla betona uygulanan kür koşulu, betonda kullanılan agreganın tane boyutu ve betonda kullanılan mineral katkı izlemektedir. Aderans dayanımı için yapılan deneysel çalışmada hata oldukça düşük bir seviyededir.

Yapılan Varyans analizi sonucunda, aderans dayanımını etkileyen birçok faktörün olduğu görülmüştür. Literatür araştırmasında da zaten aderans dayanımı etkileyen faktörler bilinmekteydi fakat aderans dayanımı etkileyen faktörlerin ne ölçüde etkilediğini inceleyen bir

Çalışma bulunamamıştır. Bu yüzden dolayı, Varyans (Anova) analizi, deney parametrelerinin aderans dayanımına yüzde olarak etkisini bulmak için kullanılmıştır.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan bu çalışmada, farklı kür koşulları altında (su, hava ve naylon) farklı mineral katkıları (uçucu kül ve silis dumanı), farklı donatı çapları (14 ve 20 mm) ve maksimum agregata tane çapları (8 ve 16 mm) kullanılarak hazırlanan numunelerin 3, 7, 14 ve 28 gün sonunda aderans ve basınç dayanımı değerleri bulunmuştur. Ayrıca yapılan deney sonuçları kullanılarak Varyans (Anova) analizi yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ve istatistiksel analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Aderans dayanımları birden fazla etkiye bağlı olarak değişmektedir. Fakat betonun ve donatının özellikleri, beton ve donatı arasındaki aderans dayanımını etkileyen en önemli değişkenler olduğu deneylerde gözlemlenmiştir.
- Deneysel çalışmalar sonucunda oluşan nervürsüz ve nervürlü deney numunelerinin aderans dayanımlarında: tüm nervürsüz donatıların aderans dayanımı deneyinde, donatı ile beton arasında bir sıyrılmanın olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte 28 günlük betonları tüm nervürlü donatılı betonların aderans dayanımı deneyinde, donatı ile beton arasında deney esnasında ses çıkarak çatlaklar oluştuğu ve deney numunesinin patladığı gözlemlenmiştir.
- Nervürlü demirli aderans deney numunelerinin aderans dayanımları nervürsüz düz demirlere göre yaklaşık iki kat mertebesinde dir. Nervürlü deney numunelerinin aderans dayanımının yüksek olmasının nedeni donatıda bulunan nervürlerin sayesinde olduğu açıktır.
- Deneylerde kullanılan silis dumanı katkıli beton numuneleri her yaşta en büyük basınç ve aderans dayanımı değerlerini vermiştir. Burada silis dumanı çimento hidratasyonu süresince serbest kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek betonun basınç ve aderans dayanımı gelişiminde etkili olmaktadır [57, 58]. Ayrıca silis dumanı tane boyutu, çimento ve uçucu kül tane boyutundan çok daha küçük olduğu için agrega/çimento ara yüzeyinde puzolanik aktiviteden daha önemli filler etkisi gerçekleştirerek daha yoğun bir agrega-bağlayıcı ara yüzeyi oluşturmaktadır [59].
- Deneylerde kullanılan uçucu külün aderans ve basınç dayanımına katkısı ise 3. günden sonra ortaya çıkmış ve 7, 14 ve 28 gün sonunda kontrol betonunu geçmiştir. 3 gün sonunda uçucu kül, hidratasyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan serbest kireçle reaksiyona girerek puzolanik aktivite etkisi göstermiştir.
- Deney numuneleri üzerinde yapılan aderans dayanımı deneyleri sonucunda beton numunelerde kullanılan agrega dane çapı büyüdükçe aderans dayanımının büyüdüğü

gözlemlenmiştir. Yani betonda yer alan agrega tane çapı büyüdükçe çelik çubuğun sıyrılmaya karşı gösterdiği direnç artmıştır.

- Deneylerde kullanılan donatı çapının boyutu arttıkça aderans dayanımı azalmıştır. Çünkü donatı çapının artmasıyla kesit alanı artan donatıya gelen kuvvetin sonucunda kenetlenme azalacaktır.
- Deney numunelerine standart su kürü, hava kürü ve naylon kürü olmak üzere 3 farklı kür şartı uygulanmıştır. En yüksek aderans ve basınç dayanımını su kürü uygulanan numunelerde elde edilmiştir. Su küründen sonra sırasıyla naylon kürü ve hava kürü uygulanan numuneler gelmiştir. Su kürüne tabi tutulan numunelerin basınç ve aderans dayanımının yüksek çıkmasının sebebi, çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan hidratasyon ürünleri (çimento jelleri), çimento hamurunun bağlayıcılığını sağlamakta, çimento hamurundaki kapiler boşluk oranını azalttığı olarak açıklanabilir. Bir başka deyişle çimento hamurunun kazanacağı dayanım hızı ve miktarı, hidratasyonu ne ölçüde gerçekleştirmiş olduğuna bağlıdır [45].
- Beton numunelere uygulanan kür koşulları dikkate alınarak amprik denklem için en uygun eğri çizilmiştir. Su kürü uygulanan numunelerin lineer regresyonu sonucunda elde edilen eğriye ait $r=0.976$ ve $\tau=0.1885fc+1.3599$ denklemi bulunmuştur. Naylon kürü uygulanan numunelerin lineer regresyonu sonucunda elde edilen eğriye ait $r=0.989$ ve $\tau=0.1771fc+1.5175$ denklemi bulunmuştur. Hava kürü uygulanan numunelerin lineer regresyonu sonucunda elde edilen eğriye ait $r=0.977$ ve $\tau=0.1431fc+2.4891$ denklemi bulunmuştur. Yapılan regresyon analizi sonucunda, aderans dayanımı ile basınç dayanımı ve aderans dayanımı ile çekme dayanımı arasında iyi bir ilişki olduğu ve basınç dayanımı artarken aderans dayanımının da arttığı görülmüştür.
- Aderans dayanımı ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi daha iyi görebilmek için bu iki parametre arasında tekrar regresyon analizi yapılmıştır. Su kürü uygulanan numunelerin logaritmik regresyonu sonucunda elde edilen eğriye ait $r=0.986$ ve $\tau=0.3403fc^{0.8849}$ denklemi bulunmuştur. Naylon kürü uygulanan numunelerin logaritmik regresyonu sonucunda elde edilen eğriye ait $r=0.994$ ve $\tau=0.3767fc^{0.8494}$ denklemi bulunmuştur. Hava kürü uygulanan numunelerin logaritmik regresyonu sonucunda elde edilen eğriye ait $r=0.991$ ve $\tau=0.6454fc^{0.6942}$ denklemi bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, aderans dayanımı ve basınç dayanımı arasında üstel formunda daha iyi bir ilişkinin olduğu görülmüştür.
- Aderans deneyinin sonuçlarına Varyans (Anova) analizi uygulanmıştır. Varyans analizi sonucunda, aderans dayanımı üzerinde en büyük etkiyi sırasıyla kullanılan betonun

basınç dayanımı ve donatının çapı yaparken bunları sırasıyla betona uygulanan kr koşulu, betonda kullanılan agreganın tane boyutu ve betonda kullanılan mineral katkı izlemektedir. Aderans dayanımı için yapılan deneysel çalışmada hata oldukça düşük bir seviyededir.

KAYNAKLAR

1. Arda, T. S., 1968, Betonarmede aderans konusunda bir derleme. İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 1s.
2. Endo, T. and Shimizu, Y., 1985, Behavior of expansion anchor bolts memoirs of technology, Tokyo Metro Politian University, No. 35, 3607–3619.
3. Yeih, W., Chang J.J. and Tsai C.L., 2004, Enhancement of the bond strength of epoxy coated steel by the addition of fly ash, Cement and Concrete Composites, No. 26, 315–321.
4. Masao, K., Tomohide W. and Nariaki T., 2000, Increase of bond strength at interfacial transition zone by the use of fly ash, Cement and Concrete Research, No. 30, 253–258.
5. Abbasi, A. and Hong, P. J., 2005, Temperature and environmental effects on glass fiber rebar: modulus, strength and interfacial bond strength with concrete, Composites Part B, No 36, 394–404.
6. Fabbrocino, G., Verderame, G. M. and Manfredi, G., 2005, Experimental behavior of anchored smooth rebars in old type reinforced concrete buildings, Engineering Structures, No. 27, 1575–1585.
7. Fang C., Karin L., Chen L. and Zhu C., 2004, Corrosion influence on bond in reinforcement concrete, Cement and Concrete Research, No. 34, 2159–2167.
8. Soylev, T.A. and François, R., 2003, Quality of steel-concrete interface and corrosion of reinforcing steel, Cement and Concrete Research, No. 33, 1407–1415.
9. Malvar L. J., Cox J.V. and Conchran, K. 2003, Bond between cfrp bars and concrete part I experimental study, Journal of Composites for Construction, No. 72, 154–163.
10. Jiang L., 1999, The interfacial zone and bond strength between aggregates and cement paste incorporating high volumes of fly ash, Cement and Concrete Composites, No. 21, 1999, 313–316.
11. Özkul, M. H., Mutlu, M. ve Sağlam, A. R., 2001, Beton ankrajları, Sika Teknik Bülten, No. 4, s 1–11.
12. Chiang, C. and Tsai, C., 2003, Time-temperature analysis of bond strength of a rebar after fire exposure”. Cement and concrete research, No. 33, 1651–1654.
13. Baldwin, M.I. and Clark, L.A., 1995, The assessment of reinforcing bars with inadequate anchorage, Magazine of Concrete Research, No.171, 95–102.
14. Harajili, M. H. F., Hout M. and Jalkh, W., 1995, Local bond stress-slip behavior of reinforcing bars embedded in plain and fiber concrete, ACI materials Journal, 343–354.

15. Mu, B., Meyer, C. and Shimanovich S., 2002, Improving the interface bond between fiber mesh and cementitious matrix, *Cement and Concrete Research*, No. 32, 783–787
16. Lundgren, K., 2002, A model for the bond between corroded reinforcement and concrete, In *Proceedings Bond in Concrete – from research to standards*, Budapest, Hungary.
17. Lorenzis, L. D., Rizzo A. and Tegola A. L., 2002, A modified pull-out test for bond of near-surface mounted frp rods in concrete, *Composites: Part B*, No. 33, 589–603
18. Wang, X. and Liu X., 2003, A strain-softening model for steel–concrete bond, *Cement and Concrete Research*, No. 33, 1669–1673
19. Chan, Y.W. and Victor, C. L., 1996, Age effect on the characteristics of fiber/cement interfacial properties, *Advanced Civil Engineering Materials Research Laboratory Department of Civil and Environmental Engineering The University of Michigan*, Ann Arbor.
20. Kunieda, M., Kurihara N., Uchida Y. and Rokugo K., 2000, Application of tension softening diagrams to evaluation of bond properties at concrete interfaces, *Engineering Fracture Mechanics*, No. 65, 299–315
21. Nakaba, K., Kanakubo T., Furuta T. and Yoshizawa H., 2001, Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete, *ACI Structural Journal*, No. 98, 359–367.
22. Basche, H. D., Freitag N., Jauck K. and Schenck G., 2000, Bond behavior of carbon fibers in concrete, http://www.uni-leipzig.de/~massivb/institut/lacer/lacer05/l05_22.pdf.
23. Dehn, F., Holschemacher, K., Lange, M. and Saidowsky L., Bond behavior of lightweight aggregate concrete (lwac) under cyclic loading, http://www.uni-leipzig.de/~massivb/institut/lacer/lacer05/l05_13.pdf
24. Chang, J.J., 2003, Bond degradation due to the desalination process, *Construction and Building Materials*, No. 17, 281–287.
25. Kayali, O. and Yeomans, S.R., 2000, Bond of ribbed galvanized reinforcing steel in concrete, *Cement & Concrete Composites*, No. 22, 459–467.
26. Fu, X. and Chung D.D.L., 1998, Combined use of silica fume and methylcellulose as admixtures in concrete for increasing the bond strength between concrete and steel rebar, *Cement and Concrete Research*, No. 4, 487–492.
27. 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*, No. 2, 167–169.
28. Gorst, N.J.S. and Clark, L.A., 2003, Effects of thaumasite on bond strength of reinforcement in concrete, *Cement & Concrete Composites*, No. 25, 1089–1094.

29. Xiong, G., Cui, Y., Liqiang, C. and Jiang, H., 2004, Influence of hydrochloric acid etching on bond strength between concrete substrate and repair materials, *Cement & Concrete Composites*, No. 26, 41–45.
30. Esfahani, M. R. and Rangan B. V., 2000, Influence of transverse reinforcement on bond strength of tensile splices, *Cement & Concrete Composites*, No. 22, 159–163.
31. Tighiouart, B., Benmokrane U.B. and Gao, D., 1998, Investigation of bond in concrete member with fiber reinforced polymer frp bars, *Construction and Building Materials*, No. 12, 453–462.
32. Katz A. and Berman N., 2000, Modeling the effect of high temperature on the bond of frp reinforcing bars to concrete, *Cement & Concrete Composites*, No. 22, 433–443.
33. Ogün, F., 2002, Epoksinin donatı aderansına etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
34. Türk, K., 2002, Bileşik eğilmeye maruz betonarme elemanlarda donatı aderansının beton özelliklerine bağlı olarak incelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Enstitüsü.
35. Ünal, Y., 1998, Aderansın betonun agrega tane çapı ve dayanımına bağlı olarak değişimi üzerine bir araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü.
36. Çınar, B., 2000, Karapınar volkanik agregasından imal edilen hafif betonların aderans davranışı üzerinde deneysel bir inceleme Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü.
37. Baradan, S., 1997, Çimento tipinin donatı-beton aderansına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü.
38. Celep, Z. ve Kumbasar, N., 1998, Betonarme Yapılar. Sema Matbaacılık, İstanbul, 47–56s.
39. Özden, K., 1985, Betonarme Malzemesi ve Kesit Hesapları. Evrim Yayın Evi, İstanbul, 567s
40. Ersoy, U. ve Özcebe, G., 2001, Betonarme. Evrim Yayın Evi, 756–766s.
41. Arda, T. S., 1968, Betonarmede Aderans Üzerine Bir Derleme. İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, 1–30s.
42. Ersoy, U., 1987, Betonarme Temel İlkeler ve Taşıma Gücü. Evrim Basım Yayım Dağıtım, İstanbul, 555–569s.
43. Özden, K., 1978, Betonarmenin Malzemesi ve Kesit Hesapları. İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, 55s.

44. Gotto, Y., 1971, Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tensions Bars, Journal of ACI. No. 68.
45. Erdoğan Y. T., 2003, Beton, ODTÜ Geliştirme vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara.
46. Türker P., Erdoğan B., Katnaş F ve Yeğınobalı A., 2004, Türkiye’deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, TÇMB Arge, 2. baskı, Ankara.
47. ASTM C618, 1998, Standart Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete, Annual book of ASTM standards, No. 4.
48. TS EN 197-1, 2002, Çimento –bölüm 1: Genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, TSE, Ankara.
49. RILEM Committee 73-SCB, 1988, Final report on siliceous by products for use in concrete, materials and structures, C.21, No. 121.
50. Rheobuild 1000, www.degussa-cc.com.tr.
51. ACI 308–92, 1994, Standart Practice for Curing Concrete” ACI Manual of Concrete Practice, Bölüm 2.
52. TS EN 12390–3, 2003, Beton-sertleşmiş Beton Deneyleri. TSE, Ankara.
53. ASTM C 234-91a, 2000, Standard test method for comparing concretes on the basis of the bond developed with reinforcing steel, Annual book of ASTM standards.
54. Moetaz, M. and Hawary,E., 1999, Evaluation of bond strength of epoxy-coated bars in concrete exposed to marine environment, Construction and Building Materials, No.13, 357–362.
55. Gorst, N.J.S. and Clark, L.A., 2003, Effects of thaumasite on bond strength of reinforcement in concrete, Cement & Concrete Composites, No. 25, 1089–1094.
56. Amnon, K. and Berman, N., 2000, Modeling the effect of high temperature on the bond of frp reinforcing bars to concrete, Cement & Concrete Composites, No. 22, 433–443.
57. Almussalam, A.A., Beshr, H., Maslehuddin, M. and Al-Moudi, O.S.B., 2004, Effect of silica fume on the mechanical properties of low quality coarse aggregate concrete, Cement and Concrete Composites, No. 26, 891–900.
58. Khatri, R.P. and Sirivivathanon V., 1995, Effect of different supplementary cementations materials on mechanical properties of high performance concrete, Cement Concrete Research, No. 25, 209–220.
59. Tasdemir, C., 2003, Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete, Cement and Concrete Research, No. 33, 1637–1642.

60. <http://analiz.ibsyazilim.com/egitim/regresyon.html>
61. Phadke, M.S., 1995, Quality engineering using robust design, Prentice Hall International USA, 18s.
62. Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M. ve Uyan, M., 2000, Meslek Liseleri İçin Her Yönüyle Beton. THBB yayınları, İstanbul, 29s.
63. Ross P.J., 1996, Taguchi techniques for quality engineering, Second Edition, McGraw-Hill, USA, 1996, 288s.