

ADERANS BOYU HESAP YÖNTEMLERİNİN DENEYSEL VERİLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

Şevket ÖZDEN ¹, Erkan AKPINAR ²
sevketozen@yahoo.com, erkanakpi@yahoo.com

Özet: Betonarme elemanların yük taşıma kapasitesi hesaplarındaki en temel kabul, donatı çeliğinin beton içerisinde yeterli kenetlenmeye sahip olduğu, yani yükleme etkisinde sıyrılıp çıkmayacağı kabulüdür. Aksi durumlarda elemanlar, hesap kapasitelerine ulaşmadan göçme yüküne ulaşırlar. Aderans gerilmesinin şiddeti, temelde beton basınç dayanımına bağlı olmak kaydıyla, kenetlenme boyunca değişim göstermektedir. Yapı kodları ve yönetmeliklerde kullanılan çoğu ampirik aderans gerilmesi hesap yöntemleri ve formüllerin gerçek durumu yansıtabilmesi ve uygulamalar için temel oluşturmasının ilk şartı, bu formüllerin türetilmesinde kullanılan deney numunelerinin ve deney düzeneklerinin yapı sistemlerindeki gerçek durumu yansıtabilirliğidir. Günümüze dek yapılmış olan çalışmalarda, donatı kenetlenmesi modellerle ortaya konulmuş ve çeşitli ifadeler uygulamalar için tavsiye edilmiştir.

Burada özetlenen çalışmada, aderans oluşum mekanizması irdelenmiş ve nervürlü donatılarda aderans gerilmesinin çeşitli parametreler etkisinde değişimi incelenmiştir. Donatı etrafındaki beton örtü kalınlığının, donatılar arası mesafenin, beton dayanımının ve donatı çapının etkisi literatürdeki ifadeler doğrultusunda ve yine literatürdeki deneysel veriler kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda, günümüzde kullanılan yönetmelik formülleri de incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: aderans gerilmesi, ankraj, kenetlenme boyu, normal ve yüksek dayanımlı beton

Giriş

Betonarme yapı tasarımında en önemli husus mekanik özellikleri ve davranışları farklı olan iki malzemenin, yani donatı çeliği ve betonun birlikte çalışmasının sağlanması ve yapı elemanlarının detaylandırılmasında bu malzemelerin üstün oldukları mekanik özelliklerin ön plana çıkarılabilmesidir. Kompozit bir karakter gösteren betonarmenin bir bütün olarak davranabilmesinin önde gelen kriteri de beton ile donatı çeliği arasındaki bağ kuvvetlerinin varlığı ve şiddetidir. Betonarme elemanların kapasite hesaplarında yapılan ve en temel olmakla birlikte en az önem verilen kabul, yukarıda da değinilen aderans ve bağ kuvvetlerinin yeterli olduğu kabulüdür. Yetersiz aderans gerilmesi betonarme elemanların hesap kapasitelerine ulaşmadan gevrek bir biçimde göçmelerine sebep olurlar.

Diğer yandan betonarme yapı şartnamelerinde istenilen ve depreme dayanıklı yapı tasarımında amaçlanan, yapıların tekrarlı yükler etkisinde enerji yutabilmesi ve sünek davranabilmesidir. Betonarmenin sünek davranabilmesinin iki temel kriteri basınç altındaki betonun dağılmasını engellemek ve daha fazla enerji yutabilmesini sağlamak amacı ile sargılanması; donatı çeliğinin ise büyük deformasyonlarda akmasının ancak kenetlendiği yerden sıyrılıp çıkmamasının sağlanmasıdır. Betonarme yapı elemanlarında yük etkisindeki donatının akma seviyesine ulaşmadan sıyrılması ani yük kayıplarına sebep olacağı gibi, tersinen tekrarlanan yükler etkisinde betonarme sistemin enerji yutma kapasitesinde de azalmalara sebep olur. Bu gibi durumlarda yapı sünekliği amaçlanan seviyelere ulaşamaz.

Donatının herhangi bir etki altında betondan sıyrılmaması için, yük taşımayan bölgede beton içerisinde, hesaplanarak bulunacak bir miktarda uzatılması gerekmektedir. Bu mesafeye “ankraj” yada “kenetlenme

¹ Yrd.Doç.Dr., Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli

² Ar.Gör., Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli

boyu” adı verilir. İki donatının sıyrılmadan sürekliliğini sağlayacak, üst üste bindirilmesi gerekli olan mesafe ise “bindirme boyu” olarak adlandırılmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ankraj yada bindirme uzunluğu boyunca donatı üzerindeki gerilme değerinin sabit olmadığı anlaşılmıştır.

Aderans Oluşumu ve Mekanizması

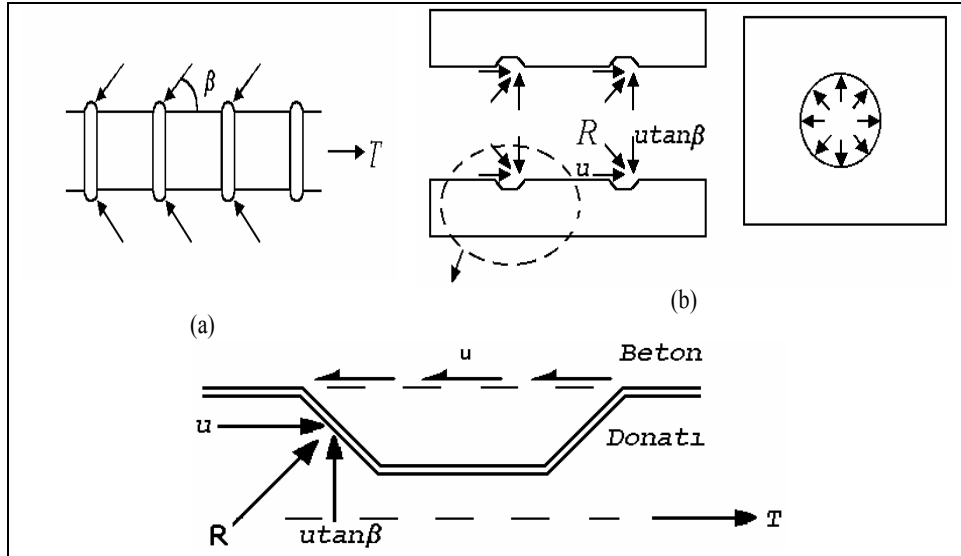
Donatı ile betonun kenetlenmesini sağlayan, kayma gerilmesi formundaki gerilmeler aderans gerilmesi olarak adlandırılmaktadır ve bu iki malzemenin uygun deformasyon yapabilmesi için gereklidir. Donatı kesitinde denge durumunda oluşan gerilme değerinin f_s ve kuvvetinde $A_b f_s$ olduğu düşünülerek bunu aktaracak olan toplam aderans kuvvetleri denge şartı yardımı ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Denklemler 1). Burada $u(x)$ donatı boyunca oluşan aderans gerilmesi dağılımını; $\pi\phi$ ise beton içerisine ankre edilmiş olan donatı çeliğinin çevresini göstermektedir.

$$A_b f_s = T = \int_0^x u(x) \pi \phi dx \quad (1)$$

Yükleme durumunda donatı çeliğinin betondan sıyrılması yada betonu yarması yapı elemanının işlevselliğini yitirmesine sebep olur. Bunu engellemek için donatı beton içerisinde yeteri kadar uzatılır yani kenetlenir. Bu boya “kenetlenme boyu” adı verilmektedir. Yukarıdaki ifadeye x mesafesi boyunca aderans gerilmelerinin sabit olmadığı vurgulanmaktadır. Bu dağılım, başta beton kalitesi olmak üzere çeşitli değişkenlere göre farklı özellik göstermektedir.

Beton ile nervürlü donatı çeliği arasındaki aderansı oluşturan etkenler üç grup halinde sıralanabilir: (a) kimyasal yapışma, moleküler ve kapiler bağ kuvvetleri, (b) beton ve çelik arasındaki sürtünme kuvvetleri, (c) donatı nervürleri ile beton arasındaki mekanik kilitlenme. Dayanımı çok düşük olan kimyasal bağlar (Leet) yüklemenin başlangıcında kopar ve sonrasında donatı nervürleri ile beton arasındaki mekanik kilitlenme asıl olmak üzere sürtünme kuvvetlerinin de oluşması ile aderans gerilmesi oluşur.

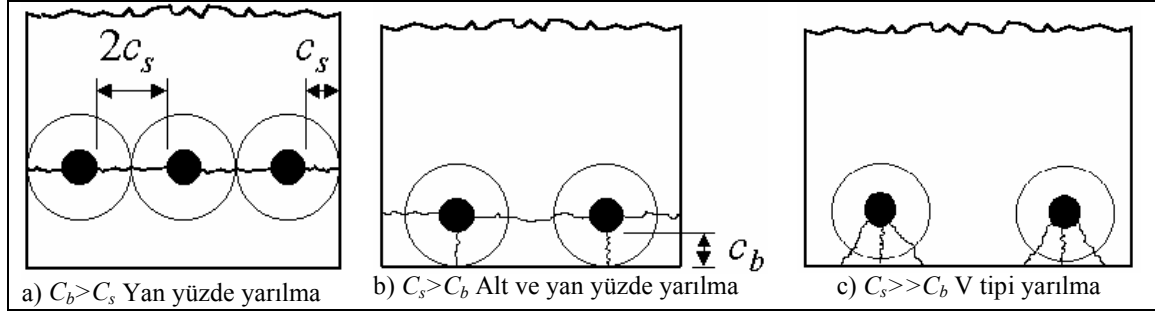
Nervürlü donatı kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aderans göçmesinin düz yüzeyli çubuklardan oldukça farklı olduğu görülmüştür. Nervürlü donatı kullanımında kenetlenme boyunun yeterli olduğu durumlarda donatının aktığı, kenetlenme boyunun yetersiz olması halinde ise donatının sıyrılarak çıktığı veya aderansın betonun yarılmasıyla tükendiği görülmüştür. Buna karşılık düz donatılarda aderans göçmesi yalnızca donatının sıyrılıp çıkması ile oluşmaktadır. Donatı üzerindeki nervürlerin geometrisi ve nervürler arası mesafe, aderansı ve eğer oluşacaksa göçme tipini etkileyen önemli faktörlerdir.



Şekil 1. Donatıda Mekanik Kilitlenme Kuvvetleri

Donatıda oluşan gerilme ile birlikte kenetlenme nedeniyle betondan nervürlere doğru ve nervür yüzeyine dik olarak bir tepki kuvveti oluşmaktadır (Şekil 1-a); aynı kuvvet ters doğrultu ile betona da etkimektedir (Şekil 1-b). Donatı çeliği ve betonun rölatif hareketleri sonucunda oluşan bu kuvvet bileşenlerine ayrıldığında ise kenetlenmeyi sağlayan ve donatıya paralel bileşen olan u ve donatıya dik olan radyal bileşen $utan\beta$ elde edilir (Şekil 1-b). Donatı eksenine paralel olan bileşen, nervürler arasındaki beton parçacığı kesme kuvveti uygulamakta ve bu parçacığı kırmaya çalışmaktadır (Şekil 1-b). Elemanda göçme bu sebeple olursa, donatının betondan sıyrılarak çıktığı görülür. Nervürler arasındaki mesafenin, bu etkiyi kontrol eden önemli parametrelerden biri olduğu söylenebilir. Donatı eksenine dik olan radyal bileşen ise donatı seviyesinden beton yüzeyine doğru etkimektedir. Nervürlerin yan etkisi olarak nitelendirebilecek bu bileşen sebebiyle betonun çekme dayanımı, aderans hesaplarında önemli bir parametre haline gelmiştir. Radyal bileşenin değerinin betonun çekme dayanımını aşması durumunda aderans göçmesi betonun yarılması ile oluşmaktadır (Goto, 1971).

Aderans gerilmeleri sonucu oluşan radyal bileşenin etkileri içten hidrostatik basınç uygulanan kalın beton boru analojisi ile incelenebilir (Şekil 2). Beton halkanın kalınlığı donatı yerleşimine göre bulunmakta ve yarıma tipindeki göçmenin belirleyicisi olmaktadır. Söz konusu beton halkanın kalınlığı donatı ile alt yüzey arasındaki net mesafe C_b , veya iki komşu donatı arası net uzaklığın yarısı olan mesafe'den küçük olanı olarak belirlenmektedir. Beton silindirin dayanımı daha önce de belirtildiği gibi betonun çekme dayanımına bağlıdır. Belirtilen C_b ve C_s ifadeleri arasındaki ilişki, aynı zamanda oluşacak çatlakların ve göçme zarfında yarılanın şeklini de belirlemektedir (Şekil 2) (Orangun ve diğ., 1977).



Şekil 2. Aderans Kenetlenmesinde Boru Analojisi

Aderans Konusundaki Çalışmalar

Aderans ve kenetlenme gerilmeleri için günümüze dek araştırmacılar, yaptıkları çalışmalar neticesinde, temelde aynı olmak üzere değişik ifadeler önermişlerdir. Aderans hesaplarının temeli olarak Denklem (1)'deki ifadeyi gösterebiliriz. Araştırmacıların, aynı sorun üzerine bu kadar çok değişik ifade önermelerinin nedeni, aderansı etkileyen faktörlerin çok fazla olması ve deneyler sonucunda bu değişkenlerin etkilerinin anlaşılabilmesidir. Nervürlü donatı kullanılan elemanlarda, aderans sorunundan dolayı oluşacak göçme tipini belirleyen ana parametre, bir önceki bölümde açıklanmış olduğu gibi, donatı etrafındaki betonun kalınlığı ve mekanik özellikleridir. Literatürdeki formüllerin temel farklılıklarından biri de beton silindirin kalınlığının deneysel veriler sonucu oluşturulan bu ifadelerdeki yer alış biçimindeki değişikliklerdir. Donatı çeliğinin akma dayanımı, kenetlenme boyu, donatı çapı, donatı nervür özellikleri, sargılama donatısı özellikleri ve yerleşimi, agrega özellikleri ve imalat sırasındaki donatının konumu aderansı etkileyen diğer önemli etkenler olarak sayılabilir.

Aderans gerilmeleri dağılımı daha önce de belirtildiği gibi ankraj boyunca sabit bir değer almamaktadır. Dağılımın yüklenmiş uçta en yüksek değerlerde olduğu, devam eden bölgede azaldığı ve donatının sonunda sıfırlandığı literatürde belirtilmekte ve göçme yüküne yaklaşıldığı durumlarda aderans dağılımının ankraj boyuna yaklaşık olarak eşit dağıldığı verilmektedir. Bu konuda türetilen bütün denklemler bu temel üzerine kurulmuştur. Beton dayanımının aderans gerilmelerinin dağılımında önemli bir faktör olduğu da bilinmektedir (Tepfers, 1973).

Araştırmacılar tarafından önerilmiş aderans formüllerinin değerlendirilmesindeki önemli kıstaslardan biri de önerilen ifadenin ne tür deney sonuçlarını içerdiğidir. Günümüze dek birçok aderans deneyi şekli geliştirilmiş, bunların bir kısmının gerçek durumu ve davranışı tam olarak yansıtamamasından dolayı

kullanımından vazgeçilmiştir. Genel olarak aderans deneyleri, kiriş deneyleri ve çekip çıkartma deneyleri şeklinde iki gruba ayrılmaktadır. Gerçek eleman davranışını sergileyebilmek için yapılan deneylerde numunenin üzerinde, belirli miktarlarda kesme kuvveti ve moment etkisi olması gerekmektedir. Bu nedenle kiriş deneyleri, en doğru sonuçları vermektedirler. Bununla birlikte kiriş deneyleri, maliyetlerinin yüksek ve imalatının zor olması nedenleriyle çok sıklıkla yapılamamaktadır. Öte yandan eksantrik çekip çıkarma deneyleri, hem imalat kolaylığı ve düşük maliyeti, hem de uygun sonuçlar vermesi açısından, bu konudaki en sık kullanılan deney tipi olma özelliğini kazanmıştır.

Aderans gerilmesinin çeşitli değişkenler etkisinde tanımlanmasını amaçlayan deneysel ve analitik makaleler incelendiğinde Orangun, Jirsa ve Breen'in 1977'de oldukça kapsamlı bir çalışma yaptıkları görülmektedir. Bu çalışmada, literatürden elde edilen deney verileri ile regresyon analizi yapılmış ve ortalama aderans gerilmesini veren bir ifadeye ulaşılmıştır (Denklem 2).

$$u = \left[1.2 + \frac{3C}{d_b} + \frac{50d_b}{l_s} + \frac{A_{tr}f_{yt}}{500sd_b} \right] \sqrt{f'_c} \quad (\text{psi}) \quad (2)$$

Denklem (2) düzenlendiğinde, uygulamaya yönelik ankraj boyu l_d ifadesi, Denklem (3)'teki hale gelmektedir.

$$l_d = \frac{\left[\frac{f_s}{4\sqrt{f'_c}} - 50 \right] d_b}{3(C/d_b) + 1.2} \quad (\text{psi}) \quad (3)$$

Denklem (2)'nin türetilmesinde kullanılan deneysel veriler aderans boyu, pas payı, donatılar arası mesafe, donatı çapı, beton dayanımı ve sargılama donatısı değişkenlerini içermektedir. Bu çalışmada donatı etrafındaki silindirin kalınlığının donatı çapına oranının (C/d_b) aderansa etkisinin önemi üzerinde durulmuş ve büyük C/d_b değerlerinde (>3) göçmenin, yarılma olmadan donatının sıyrılması ile olacağı ifade edilmiştir. Aynı çalışmada, sargılama donatısının etkisi de incelenmiş ve sargılamanın aderansı olumlu etkilediği fakat belirli bir noktadan sonra etkisinin sabit kaldığı görülmüştür. Bu sınır $u_{tr}=2*f'_c^{(1/2)}$ olarak ifade edilmiştir.

Moehle (Moehle ve diğ., 1991) yaptığı araştırmada, literatürdeki ankraj boyu denklemlerini irdelemiş ve ankraj gerilmesi ifadesi yerine, ankraj boyunun hesaplandığı bir denklem önermiştir (Denklem 4).

$$l_{db} = 1.4d_b f_y / \sqrt{f'_c} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (4)$$

Önerilen Denklem (4), aderans problemi için en olumsuz şartlara göre tasarlanmış ve bu sayede kullanımda hata yapılsa bile çıkacak olan sonucun güvenli bölgede kalacağı düşünülmüş; donatı yerleşimini belirleyen d_b/C değeri gözönüne alınarak tanımlanan bazı katsayılar ile elde edilen sonuçta azaltılma yolu seçilmiştir. Burada C , betonun donatıya en yakın yüzeyi ile donatı arasındaki net mesafe ile donatılar arası net uzaklığın yarısı değerlerinden küçük olanına, donatı çapının yarısı eklenerek elde edilmektedir.

Darwin (Darwin ve diğ., 1992) çalışmasında, pas payı ve donatılar arası mesafenin fonksiyonu olan ve Orangun'un aderans ifadesine benzeyen bir denklem geliştirmiştir (Denklem 5).

$$\frac{A_b f_s}{\sqrt{f'_c}} = 6.67l_d \left(C + 0.5d_b \right) \left[0.92 + 0.08 \frac{C_{\max}}{C_{\min}} \right] + 300A_b \quad (\text{psi}) \quad (5)$$

Bu çalışmadaki belirgin fark, temel olarak aderans gerilmeleri yerine, ankraj kuvvetinin kullanılmasıdır. Bunun nedeni aderans gerilmelerinin kullanılmasıyla birlikte ortaya çıkan, aderans gerilmelerinin ankraj boyunca düzgün dağılmadığı gerçeğidir. Temelde ankraj kuvvetinin kullanılmasıyla birlikte bu sorunun ortadan kalkacağı ve daha doğru sonuçlar elde edileceği düşünülmüştür. Denklem (5) düzenlendiğinde, ankraj boyu ifadesi Denklem (6)'daki hale gelmektedir.

$$l_d = \frac{0.15 \left[\frac{f_s}{\sqrt{f'_c}} - 300 \right] A_b}{(C + 0.5d_b)(0.92 + 0.08C_{\max}/C_{\min})} \quad (\text{psi}) \quad (6)$$

Darwin'e göre ortaya konulan bu yeni formülün bir diğer belirgin farkı ise donatılar arası mesafe ile pas payı arasındaki farklılıkların, ankraj boyuna olan etkilerinin daha net biçimde ortaya çıkması ve aynı zamanda daha doğru sonuçlar veriyor olmasıdır.

Ülkemizde kullanılmakta olan TS500 "Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları" şartnamesinde yer alan ankraj ifadesi, yukarıda bahsedilen formüllerde olduğu gibi, temel kenetlenme boyunu vermektedir (Denklem 7). Donatı yerleşim bölgesine bağlı kalmak kaydıyla l_b değerinin yine TS500'de verilen katsayılarla çarpılması gerektiği belirtilmiştir.

$$l_b = \left[0.12 \frac{f_{yd}}{f_{ctd}} \phi \right] \geq 20\phi \quad (\text{N/mm}^2) \quad (7)$$

TS500'de kenetlenme "donatının gereksinme duyulmayan noktadan düz olarak l_b kadar uzatılması ile sağlanabilir" şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (7)'de verilen ifade nervürlü donatılar için geçerli olup gerekli durumlarda aderans gerilmesinin hesaplanması için TS500, Denklem (8)'in kullanılmasını önermiştir.

$$\tau_{bd} = \frac{\sigma_s}{4l_b} \phi \quad (\text{N/mm}^2) \quad (8)$$

Kullanılan Deneysel Veriler

Yukarıda verilen aderans gerilmesi denklemlerinin literatürden elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılabilmesi amacıyla güç tükenmesine aderans göçmesi ile ulaşılmış olan deneylerin sonuçları seçilmiştir. Seçilen deney numunelerinin alındığı referans numaraları, numune isimleri, beton kalitesi f'_c , donatı çeliğinin akma gerilmesi f_y , donatı çapı d_b , nervür açısı, donatı pas payı C_x ve C_y , eklenen donatılar arası mesafe C_s , ankraj boyu L_b , aynı kesitte yapılan bindirme adedi n , göçme yükü $F_{\max}$, ve aderans gerilmesi u_{test} değerleri Tablo (1)'de verilmiştir.

Tablo 1. Deney Numunelerinin Özellikleri

	Numune	f'_c	f_y	d_b	Nerv.Açıl.	C_y	C_x	C_s	L_b	Bindirme	$F_{\max}$	u_{test}
Ref.	Adı	(MPa)	(MPa)	(mm)	(derece)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	Adedi	(N)	(MPa)
8	D12-1	85	448	12	60	69	69	-	144	-	47268	8.71
8	D9-3	70	433	20	60	65	65	-	180	-	78845	6.97
8	N10-3	17	438	20	60	65	65	-	200	-	65616	5.22
8	N15-2	26	378	16	60	67	67	-	240	-	74531	6.19
8	N15-3	26	442	20	60	65	65	-	300	-	113757	6.03
8	N20-1	22	469	12	60	69	69	-	240	-	44522	4.92
8	N20-3	24	426	20	60	65	65	-	400	-	122975	4.89
8	NE1531	14	436	20	60	15	65	-	300	-	79267	4.21
9	6Φ12-8015	77	491	12	72	15	69	-	72	-	41195	15.78
9	7Φ12-8015	76	496	12	72	15	69	-	84	-	45417	14.91
9	9Φ12-8015	77	478	12	72	15	69	-	108	-	49185	12.56
9	9Φ12-7015	72	506	12	72	15	69	-	108	-	50874	12.99
9	6Φ16-8015	77	398	16	73	15	67	-	96	-	57824	12.38
9	7Φ16-8015	82	403	16	73	15	67	-	112	-	63786	11.71
9	6Φ20-8015	81	359	20	61	15	65	-	120	-	72465	10.05

Tablo 1. Deney Numunelerinin Özellikleri (Devam)

	Numune	f'_c	f'_v	d_b	Nerv.Açı.	C_v	C_x	C_s	L_b	Bindirme	F_{max}	u_{test}
Ref.	Adı	(MPa)	(MPa)	(mm)	(derece)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	Adedi	(N)	(MPa)
9	7Φ20-8015	75	339	20	61	15	65	-	140	-	82370	9.79
9	6Φ26-8015	81	482	26	67	15	62	-	156	-	117388	10.42
9	9Φ26-8015	81	505	26	67	15	62	-	234	-	166038	9.82
9	10Φ26-9015	89	482	26	67	15	62	-	260	-	190863	10.16
9	8Φ16-6015	64	393	16	73	15	67	-	128	-	69994	11.24
9	5Φ16-7015	69	388	16	73	15	67	-	80	-	50133	12.88
9	6Φ16-7015	69	393	16	73	15	67	-	96	-	62046	13.29
9	7Φ16-7015	70	338	16	73	15	67	-	112	-	60810	11.16
9	4Φ16-9015	89	393	16	73	15	67	-	64	-	52001	16.17
9	5Φ16-9015	93	393	16	73	15	67	-	80	-	57824	14.86
9	5Φ16-9015	89	403	16	73	15	67	-	80	-	65867	16.38
9	6Φ16-9015	87	388	16	73	15	67	-	96	-	64846	13.89
9	6Φ16-9015	89	398	16	73	15	67	-	96	-	69583	14.42
9	4Φ16-8020*	79	388	16	73	20	67	-	64	-	59719	19.18
9	6Φ16-8020	84	398	16	73	20	67	-	96	-	66926	14.33
9	4Φ16-8025	77	403	16	73	25	67	-	64	-	53850	17.30
9	5Φ16-8025	78	403	16	73	25	67	-	80	-	66020	16.96
9	4Φ16-8030*	79	393	16	73	30	67	-	64	-	56897	18.28
9	4Φ16-8030	77	403	16	73	30	67	-	64	-	48145	15.46
9	5Φ16-8030	78	398	16	73	30	67	-	80	-	49638	12.76
10	1.1 (8C1)	35	467	25		74.6252	75	74.63	406	2	92034	5.56
10	1.2 (8C1)	35	467	25		49.2252	52	57.94	406	2	158045	4.80
10	1.3 (8C1)	35	467	25		49.2252	52	36.53	406	3	118945	4.85
10	2.4 (8F1)	36	520	25		33.3502	51	48.62	610	2	85584	3.88
10	2.5 (8F1)	36	520	25		46.0502	52	47.14	610	2	92034	4.21
10	4.5 (8C1)	28	467	25		46.8376	52	49.17	610	2	80157	3.67
10	6.5 (8F1)	29	520	25		50.0126	51	48.41	610	2	83226	3.85
10	8.3 (8N0)	26	538	25		50.8	51	49.61	610	2	94747	4.41
10	10.2 (8N3)	29	556	25		49.0982	52	47.63	660	2	96348	4.06
10	13.4 (5C2)	28	426	16		34.3916	53	25.81	406	3	63965	4.04
10	15.5 (11F3)	36	536	36		48.4632	78	75.79	1016	2	163027	3.29
10	16.2 (11F3)	36	536	36		48.133	77	75.41	1016	2	159780	3.18
11	19.1NNL(8N3)	29	556	25		49.8094	50	49.02	914	3	169833	3.52
11	20.6NNL(8N3)	35	556	25		33.02	39	17.07	1016	3	131712	2.46
11	24.1NNL(8N1)	30	550	25		48.3362	51	47.63	813	2	95815	3.33
11	26.3NNL(8N1)	34	550	25		47.9806	39	16.56	1016	3	143856	2.69
11	26.5NNL(8N0)	34	538	25		48.0314	38	17.37	1016	3	147725	2.77
11	34.3NHL(8C0A)	38	479	25		50.3174	53	46.84	610	3	136294	4.23
11	36.3NHL(8C0A)	35	479	25		50.8	51	46.63	660	3	145368	4.16
11	38.2NNL(8C0A)	35	479	25		52.705	54	46.84	660	3	139719	4.01
12	3-30-0.5-0.06	21	414	20	30	25.4	143	-	254	-	82737	5.32
12	3-45-0.5-0.06	21	414	20	45	25.4	143	-	254	-	84071	5.40
12	3-60-0.5-0.06	21	414	20	60	25.4	143	-	254	-	88075	5.66
12	3-75-0.5-0.06	21	414	20	75	25.4	143	-	254	-	86296	5.55
12	3-90-0.5-0.06	21	414	20	90	25.4	143	-	254	-	82292	5.29
12	3-45-0.3-0.06	21	414	20	45	25.4	143	-	254	-	79178	5.09
12	3-45-0.35-0.06	21	414	20	45	25.4	143	-	254	-	80513	5.17

Tablo 1. Deney Numunelerinin Özellikleri (Devam)												
	Numune	f'_c	f_v	d_b	Nerv.Açıl.	C_v	C_x	C_s	L_b	Bindirme	F_{max}	u_{test}
Ref.	Adı	(MPa)	(MPa)	(mm)	(derece)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	Adedi	(N)	(MPa)
12	3-45-0.4-0.06	21	414	20	45	25.4	143	-	254	-	92078	5.92
12	3-45-0.45-0.06	21	414	20	45	25.4	143	-	254	-	85406	5.49
12	3-45-0.5-0.06	21	414	20	45	25.4	143	-	254	-	82737	5.32
12	3-45-0.5-0.04	21	414	20	45	25.4	143	-	254	-	75620	4.86
12	3-45-0.5-0.06	21	414	20	45	25.4	143	-	254	-	88964	5.72
12	3-45-0.5-0.08	21	414	20	45	25.4	143	-	254	-	95192	6.12
12	3-45-0.5-0.1	21	414	20	45	25.4	143	-	254	-	85851	5.52
12	3-45-0.4-0.06	21	414	20	45	25.4	143	-	254	-	88075	5.66
12	3-45-0.4-0.08	21	414	20	45	25.4	143	-	254	-	106313	6.83
12	3-60-0.4-0.06	21	414	20	60	25.4	143	-	254	-	101864	6.55
12	3-60-0.4-0.08	21	414	20	60	25.4	143	-	254	-	109426	7.03

Karşılaştırmalarda kullanmak üzere, literatürden yetmiş üç adet deney verisi ve numune özellikleri alınmıştır. Kullanılan dataların deneysel farklılıkları da içermesi için, değişik test düzenekleri kullanılarak yapılmış olan deneylerden seçilmiştir. Yerlici'nin (Yerlici ve diğ., 1994) yaptığı, değişik beton dayanımlarını ve konsantrik yüklenen numuneleri de içeren çalışmadan, biri eksantrik yüklemeli olmak üzere sekiz adet veri alınmıştır. Yerlici'nin (Yerlici ve diğ., 1997) bir başka çalışmasından tümü eksantrik yüklenmiş ve yüksek dayanımlı betondan oluşan verilerden yirmi yedi tanesi alınmıştır. İçerik olarak birbirinin devamı olan, Darwin (Darwin ve diğ., 1996) ile Zuo'nun (Zuo ve diğ., 2000) çalışmalarından toplam yirmi adet deney sonucu alınmıştır. Bu çalışmalarda, test tipi olarak kiriş deneyleri kullanılmıştır. Hamad (1995)'in yaptığı eksantrik yüklemeli çalışmadan on sekiz adet deney verisi bu çalışma kapsamında incelenmek üzere alınmıştır (Tablo 1)

Deney Verilerin ve Aderans Denklemlerinin İrdelenmesi

Beton Dayanımı ve Aderans Gerilmesi İlişkisi

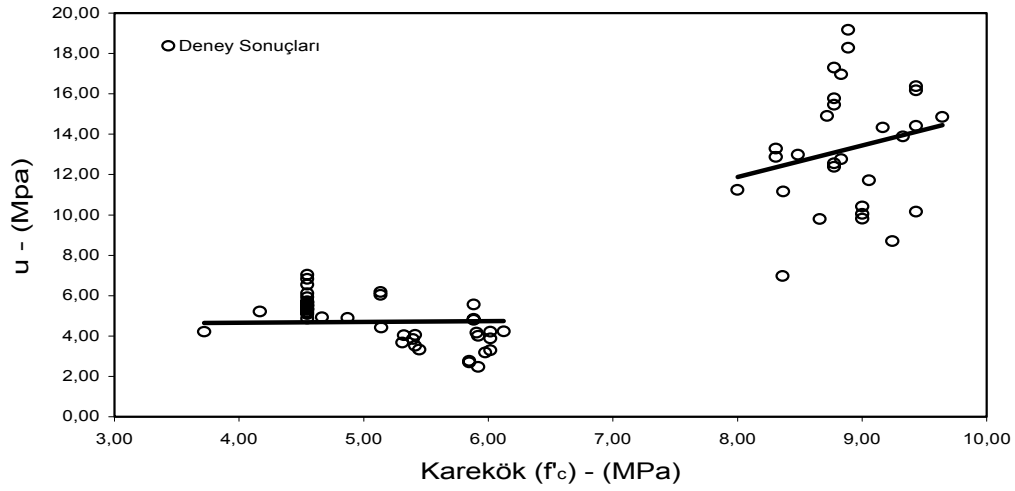
Şekil 3'de beton kalitesinin, aderans gerilmelerine etkisi incelenmiştir. Literatürden toplanan deneysel verilerdeki beton basınç dayanımının kare kökü $f_c^{(1/2)}$ ve aderans gerilmesi değerleri u sırasıyla x ve y eksenlerine yerleştirilmiştir. Şekil 3'deki eğilim çizgileri incelendiğinde, $f_c^{(1/2)}$ nin 3 - 6 MPa arası ndaki değerlerinde yani normal dayanımlı beton (NDB) sınıfında sonuçların dağılımındaki değişimin çok az olduğu görülmektedir. Buna karşın $f_c^{(1/2)}$ nin 8 - 10 MPa arasındaki değerlerinde yani yüksek dayanımlı beton (YDB) sınıfında aderans gerilmesi değerlerindeki dağılımın daha fazla olduğu izlenmektedir. Bunun sonucu olarak, NDB ve YDB'da oluşan aderans gerilmesi değerlerinin ve dağılımlarının birbirinden farklı olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 3).

Aderans Gerilmesi Formüllerinde Beton Dayanımının Etkisi

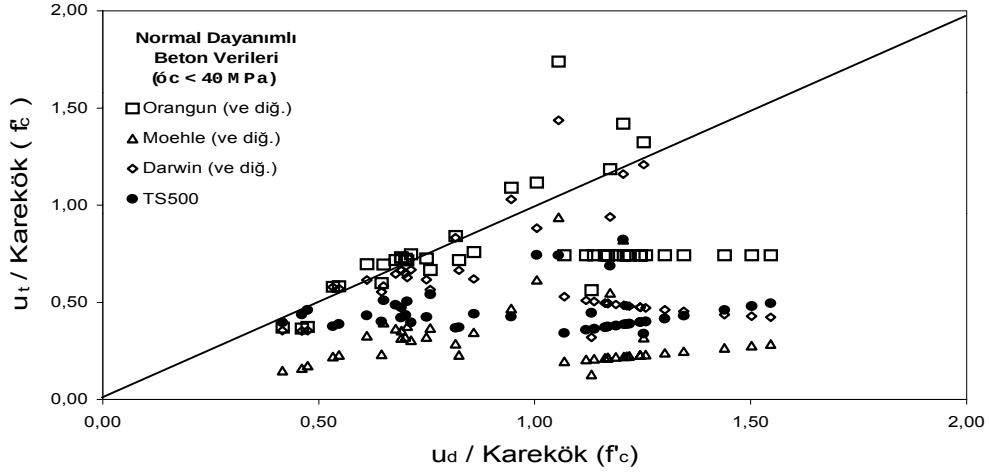
Şekil 4 ve Şekil 5'de eldeki NDB ve YDB gruplarındaki veriler için yukarıda verilen denklemlerden elde edilmiş teorik aderans gerilmeleri ile deneysel aderans gerilmeleri $f_c^{(1/2)}$ ile normalize edilerek oluşturulan grafikler yer almaktadır. Bu grafikler sayesinde denklemlerden elde edilen sonuçların, gerçek değerlerle karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Şekil 4'de görüldüğü gibi, Orangun'un önerdiği ifadenin sonuçları ile deneysel veriler oldukça iyi bir uyum içindedir. Şekil 5 için ise durum değişmekte ve Orangun'un önerdiği ifade NDB'daki hassasiyetini kaybetmektedir. Diğer denklemlerin ise yaklaşık sabit bir eğilim izledikleri bu grafiklerden görülmektedir. Moehle'nin önerdiği formülün eğilimi incelendiğinde ise NDB ve YDB için belirgin bir farklılığın olmadığı görülmektedir. Şekil 4 ve Şekil 5'den YDB kullanımında Moehledenkleminin gereğinden çok fazla ankraj boyu kullanılmasına neden olacağı söylenebilir.

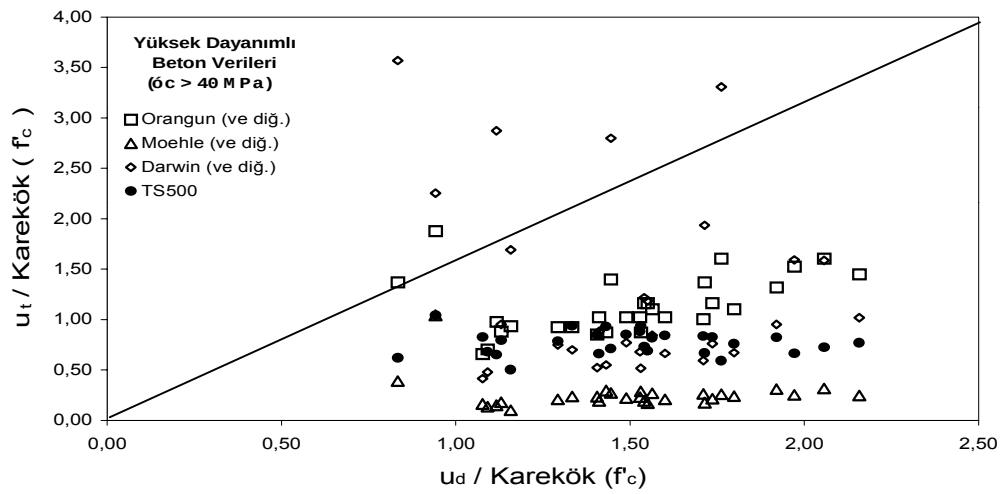
Şekil 4 ve Şekil 5'deki karşılaştırmalardan genel olarak teorik olarak hesaplanan aderans gerilmesinin u_t deneysel aderans gerilmesine u_d oranının sıfırdan küçük olduğu görülmektedir. Bunun sonucu olarak ifadelerce önerilen ankraj boyları ihtiyaç duyulandan daha fazladır. TS500'de dahil olmak üzere bu çalışmada kullanılan aderans gerilmesi ifadeleri, genel olarak güvenli sonuçlar vermekte fakat gerçek durumu tam olarak yansıtmamaktadırlar.



Şekil 3. Beton Kalitesine Göre Deneysel Verilerin Dağılımı



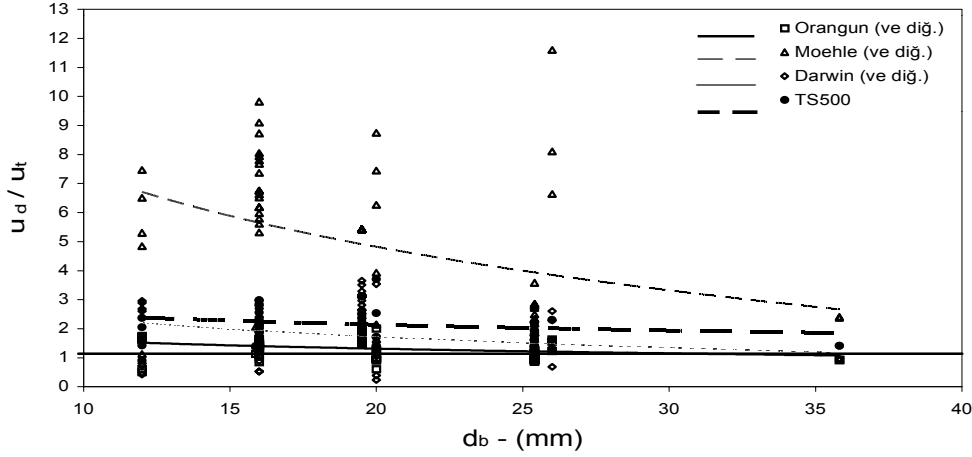
Şekil 4. Deneysel ve Teorik Aderans Gerilmelerinin Karşılaştırılması (NDB'da)



Şekil 5. Deneysel ve Teorik Aderans Gerilmelerinin Karşılaştırılması (YDB'da)

Aderans Gerilmesi Formüllerinde Donatı Çapı Etkisi

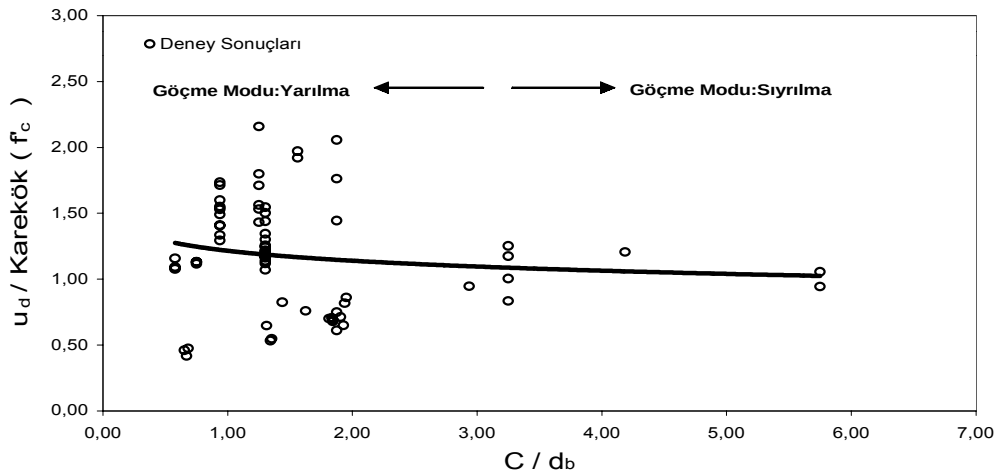
Şekil 6'da kullanılan deneysel veriler teorik sonuçlara bölünerek donatı çapındaki değişimin aderans gerilmelerine olan etkileri incelenmiştir. Orangun ve Darwin'in önerdiği denklemlerin sonuç eğilim çizgilerinin birbirine yaklaştığı görülmekte ve bunun sonucu olarak iki formülün donatı çapı değişimine benzer duyarlılıkta olduğu düşünülmektedir. Grafik üzerinde u_d/u_t değerinin "1" olduğu seviyede çizilen hattın olması gereken durumu yansıttığı düşünülürse, Orangun ve Darwin'in önerdikleri ifadelerin donatı çapındaki değişimde gerçeğe yakın sonuçlar verdiği söylenebilir. TS500'deki ifade kullanılarak elde edilen sonuçlarının eğilimi, belirli bir donatı çapı değerinden sonra (yaklaşık 25 mm) aderans gerilmelerinin hemen hemen sabit kaldığını göstermektedir. TS 500'deki denklemden bulunacak aderans gerilmesi değerlerinin güvenli olmakla birlikte belirli bir noktadan sonra donatı çapına yeterli ölçüde duyarlı olmadığı söylenebilir.



Şekil 6. Deneysel Sonuçların Donatı Çapına Göre Teorik Sonuçlara Oranı

Beton Örtüsü Kalınlığının Aderans Gerilmesine Etkisi

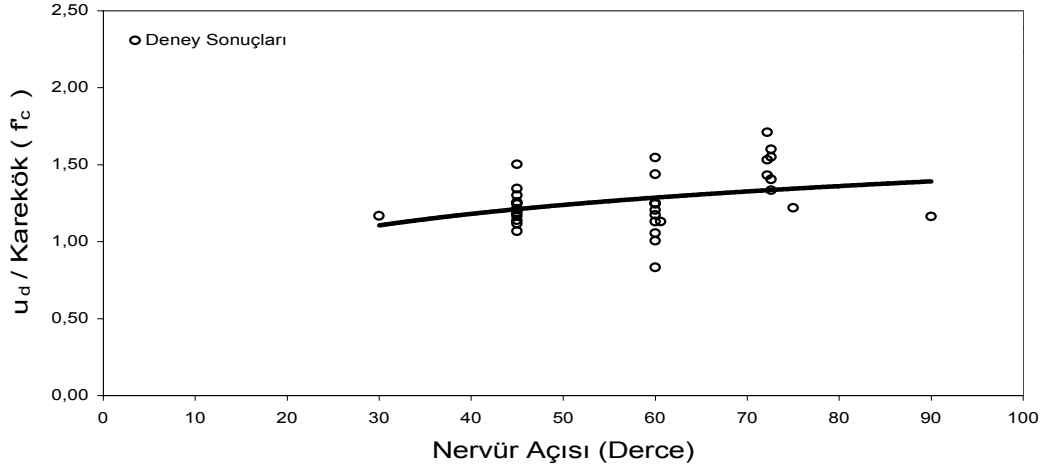
Şekil 7'de, C/d_b parametresinin aderans gerilmeleri üzerindeki etkileri görülmektedir. C/d_b değişkeni literatürde yapılan çalışmaların geçerli olduğu bölgeyi gösteren önemli bir parametre olup çubuk etrafındaki betonun kalınlığı C göçmeyi belirleyen parametrelerden biridir. Aderans gerilmeleri için kullanılan çoğu denklemin C/d_b değerinin 2.5 yada daha az olduğu durumlar için türetilmiştir. Bazı araştırmacılar önerdikleri ifadelerdeki C/d_b teriminin belirli bir seviyeyi aştığı durumlarda denklemlerinin hatalı sonuçlar verebileceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada, temel teorik boylar incelendiği için, benzer herhangi bir sınır gösterilmemiştir. Artan yükler etkisinde donatı etrafındaki beton silindiri yaramaya çalışacaktır. C/d_b oranının büyük olduğu durumlarda, beton silindir kalın olduğu için yarılmayacak ve yetersiz ankraj boylarının kullanılmasıyla birlikte donatı betondan sıyrılarak göçme oluşacaktır (Orangun ve diğ. 1977).



Şekil 7. C/d_b Değişkeninin Aderans Gerilmesine Etkisi

Nervür Açısının Aderans Gerilmesine Etkisi

Şekil 8’de, nervür açısının aderans gerilmesine etkisi incelenmiştir. Literatürden derlenen deney setlerinde, kullanılan donatıların nervür açıları 30 ile 90 derece arasında değişim göstermektedir. Bu parametre ve $f_c^{(1/2)}$ ile normalize edilmiş deney sonuçları şekilde görülmektedir. Nervür açısının artması ile birlikte aderans gerilmelerinde genel olarak artış olduğu söylenebilir. Nervür açısıyla ilgili dikkat edilmesi gereken, aderans oluşumu ve mekanizması başlığı altında incelenmiş olan aderans gerilmesinin bileşenlerinin değişiklik göstereceği gerçeğidir. Artan nervür açısı ile birlikte, donatı etrafındaki beton silindire gelecek olan radyal bileşenin azalacağı ve kenetlenmeyi oluşturan aderans gerilmelerinin artacağı zaten açıktır. Bununla birlikte artan donatı eksenine paralel bu gerilmelerin, nervürler arasındaki beton dişleri daha fazla zorlayarak, sıyrılma modundaki göçmelere neden olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 8. Nervür Açısının Aderans Gerilmesine Etkisi

KAYNAKLAR

1. Leet, K., *Reinforced Concrete Design*, McGraw-Hill Book Company, 207-245
2. Ersoy, U., 2001. *Betonarme*, Evrim Yayınevi, 719-169, Ankara
3. Goto, Y., April 1971. “Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars” *ACI*, 244-251,
4. Orangun C.O., Jirsa J.O., Breen J.E., March 1977, “A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices”, *ACI*, 114-122
5. Tepfers, R., 1973, “A Theory of Bond Applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars” *Div. of Concrete Str., Chalmers Univ. of Technology, Publ.No 73:2*, 328, Göteborg
6. Moehle J.P., Wallace J.W., Hwang S.J., Sept-Oct 1991, “Anchorage Lengths for Straight Bars in Tension” *ACI Structural Journal*, 531-537
7. Darwin D., McCabe S.L., Idun E.K., Schoenekase S.P., Nov-Dec 1992, “Development Length Criteria: Bars Not Confined by Transverse Reinforcement” *ACI Structural Journal*, 709-720
8. Yerlici V., Ersoy U., Özturan T., Karakoç C., Aşkar G.A., Eylül 1994. *Yüksek Dayanımlı Beton Elemanlarda Donatı Kenetlenme Özelliklerinin İncelenmesi*, TÜBİTAK, İNTAG 509, İstanbul
9. Yerlici V., Ersoy U., Özturan T., Kasım 1997. *Yüksek Dayanımlı Beton Elemanlarda Donatı Kenetlenme Özelliklerinin İncelenmesi – II*, TÜBİTAK, İNTAG 541, İstanbul
10. Darwin D., Tholen M. L., Idun E. K., Zuo J., Jan-Feb 1996, “Splice Strength of High Relative Rib Area Reinforcing Bars” *ACI Structural Journal*, 95-107
11. Zuo J., Darwin D., July- Aug 2000, “Splice Strength of Conventional and High Relative Rib Area Bars in Normal and High-Strength Concrete” *ACI Structural Journal*, 630-641
12. Hamad B. S., Jan-Feb 1995. “Bond Strength Improvement of Reinforcing Bars with Specially Designed Rib Geometries” *ACI Structural Journal*, 3-13
13. TS500, Şubat 1985. *Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları*, TSE, Ankara

ADERANS BOYU HESAP YÖNTEMLERİNİN DENEYSEL VERİLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

Şevket ÖZDEN¹, Erkan AKPINAR¹

Betonarme elemanların yük taşıma kapasitesi hesaplarındaki en temel kabul, donatı çeliğinin beton içerisinde yeterli kenetlenmeye sahip olduğu, yani yükleme etkisinde sıyrılıp çıkmayacağı kabulüdür. Aksi durumlarda elemanlar, hesap kapasitelerine ulaşmadan göçme yüküne ulaşırlar. Aderans gerilmesinin şiddeti, temelde beton basınç dayanımına bağlı olmak kaydıyla, kenetlenme boyunca değişim göstermektedir. Yapı kodları ve yönetmeliklerde kullanılan çoğu ampirik aderans gerilmesi hesap yöntemleri ve formüllerin gerçek durumu yansıtabilmesi ve uygulamalar için temel oluşturmasının ilk şartı, bu formüllerin türetilmesinde kullanılan deney numunelerinin ve deney düzeneklerinin yapı sistemlerindeki gerçek durumu yansıtabilirliliğidir.

Günümüze dek yapılmış olan çalışmalarda, donatı kenetlenmesi modellerle ortaya konulmuş ve çeşitli ifadeler uygulamalar için tavsiye edilmiştir. Goto, yaptığı çalışmada kenetlenme bölgesindeki çatlak oluşumlarını inceleyerek, kenetlenme bölgesindeki davranışı ortaya koymuştur; Tepfers nervürlü donatılar için bir aderans modeli oluşturmuş; Orangun Jirsa ve Breen temelde bu modeli kullanarak literatürdeki deney sonuçlarıyla yaptıkları analizler sonucunda bir çok araştırmacının kaynak olarak kullandığı yeni bir formülasyon geliştirmişlerdir. Darwin'in yaptığı çalışmalarda ise ankraj ifadelerindeki parametrelerin kapasiteye olan katkısı deneysel veriler ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Günümüzde kullanılan şartnamelerdeki ankraj gerilmesi ve kenetlenme boyu ifadelerine, araştırmacıların tavsiye ettikleri formüllere güvenlik payları eklenerek ulaşılmıştır.

Burada özetlenen çalışmada, nervürlü donatılarda aderans gerilmesinin çeşitli parametreler etkisinde değişimi incelenmiştir. Donatı etrafındaki beton örtü kalınlığının, donatılar arası mesafenin, beton dayanımının ve donatı çapının etkisi literatürdeki ifadeler doğrultusunda ve yine literatürdeki deneysel veriler kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda, günümüzde kullanılan yönetmelik formülleri de incelenmiştir.

¹ Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli

Aderans Boyu Hesap Yöntemlerinin Deneysel Verilerle Karşılaştırılması	86
Şevket ÖZDEN, Erkan AKPINAR	
Yüksek Yapılarda Cephe Sistemlerinin Depreme Dayanıklı Tasarımı	87
Volkan GÜR, Ayşin SEV	
Depreme Dayanıklı Yapıda, Taşıyıcı Olmayan Düşey Elemanların Dayanımının İncelenmesi	88
Yaşar SUBAŞI	
Mimar ve Deprem	89
Türker İLTER, Yaşar Subaşı DİREK	
Depreme Dayanıklı Çok Katlı Yapı Tasarımında Japon Prefabrikasyon Teknolojisi Ala-Sawa Sistemi	90
Fatih SAYAN, Birol DOYRANLI	
Kahramanmaraş'ta Kentleşme ve Yapı Sistemlerinin İncelenmesi	91
Melike ÖZKAN, C. D. KUŞAT GÜRÜN, H. TEMİZ	
Çanakkale Kenti Yeni Yerleşim Alanında Jeofizik-Jeolojik Uygulamalar	92
M. Ali KAYA, Mithat F. ÖZER, S.Zeki TUTKUN, Alper BABA, İ. Talih GÜVEN, Taciser ÇETİROL, Ebru ŞENGÜL, Ozan DENİZ, Savaş GÜRÇAY	
Depremde Hasar Görmüş Yapıların Beton Kalitesinin İncelenmesi	94
Mansur SÜMER Mehmet SARIBIYIK, Seyhan FIRAT, Ferhat AYDIN	
Silika Dumanı ve Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı Kullanımının Betonda Kendiliğinden Yerleşebilirlik ve Basınç Dayanımı Üzerine Etkileri	95
Selçuk TÜRKEK, Burak FELEKOĞLU	
Lifli Betonlarda Yorulma Tesirlerinin Araştırılması	96
S. Taner YILDIRIM	
Çelik Tel Donatılı Betonların Deprem Etkisi Altında Davranışları	97
Mehmet YERLİKAYA	
Pencerelerde Deprem Faktörünün İrdelenmesi	98
Serpil KEÇELİ, Ayşe ELAGÖZ	
Türkiye'de Kalıcı Deprem Konutlarında Kullanılan Yapım Teknolojilerinin Kullanıcı Gereksinimlerine Uygunluğunun İrdelenmesi	99
Kamuran ÖZTEKİN	
Türkiyede, Deprem Sonrası Hemen Kurulması Gereken Acil Yapıların Mimari ve Yapısal Elverişlilik Kriterlerinin Çok Yönlü Olarak İrdelenmesi	100
S. Cengiz YESÜGEY	
17 Ağustos 1999 Marmara Depremi Sonrası Ortaya Çıkan Acil Barınma İhtiyacının Çözümlemesine Yönelik Barınma Mekanı Çalışmaları ve Afet Sonrası Belirlenen Kullanıcı İhtiyaçlarının Konut Tasarımına Etkilerinin İrdelenmesi: Kocaeli Örneği	102
Kamuran ÖZTEKİN, Deniz DEMİRARSLAN	
17 Ağustos 1999 Marmara Depremi Sonrası Ortaya Çıkan Geçici ve Kalıcı Yerleşimler İle Mevcut Yerleşimlerin Planlama ve Kimlik Sorunları Açısından İrdelenmesi - Kocaeli Geçici ve Kalıcı Yerleşimlerinde Görülen Kimliksizlik	

KOCAELİ 2003
DEPREM SEMPOZYUMU

12-14 MART 2003

BİLDİRİ ÖZETLERİ

düzenleyen

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

yer

GRAND MARMARA HOTEL

yubam.kou.edu.tr