

YÜKSEK DAYANIMLI BETONUN YAPISAL DAVRANIŞI İLE İLGİLİ BİR İRDELEME

Uğur ERSOY
Prof. Dr.
ODTÜ
Ankara

Tuğrul TANKUT
Prof. Dr.
ODTÜ
Ankara

ÖZET

Bu yazıda yüksek dayanımlı betonun (YDB) yapısal davranışı deneysel ve analitik çalışmaların ışığında gözden geçirilmiştir. Bugün betonarme hesabını yönlendiren yönetmelik hükümlerinin ve denklemlerin büyük bir bölümü dayanımı 400 kgf/cm^2 den az betonla yapılmış eleman deneylerinden elde edilmiş olduğundan, aynı denklem ve hükümlerin (YDB) için de geçerli olup olmayacağı henüz aydınlığa kavuşmamıştır. Yapılan irdelemede, taşıma gücü hesabında kullanılan beton gerilme dağılımının, kesme ve eğilme için öngörülen minimum donatının ve bileşik eğilme altında zorlanan elemanlar için önerilen sargı donatısının (YDB) için yetersiz kalabileceği gösterilmiştir. Bu konularda gerekli verilerin toplanabilmesi için deneysel çalışmalara gereksinme olduğu yazıda vurgulanmaktadır.

1. GENEL

Özel ve yüksek yapılarda daha yüksek dayanımlı betonlara gereksinme duyulması ve piyasaya yeni katkı maddelerinin çıkması ile yüksek dayanımlı beton (YDB) ile ilgili araştırmalar son 10-20 yılda büyük bir ivme kazanmıştır. Bundan yirmibeş yıl kadar önce A.B.D. deki araştırma laboratuvarlarında bile 700 kg/cm^2 dayanımlı işlenebilir bir betonun elde edilmesinde büyük sorunlarla karşılaşılırken, bugün artık 1300 kg/cm^2 dayanımlı beton kolaylıkla yapılabilmektedir. Bu kolaylığı sağlayan katkı maddeleridir. Bu nedenle (YDB) için katkı maddelerine borçlu olduğumuz söylenebilir.

Bugün çeşitli Avrupa ve Amerika ülkelerinde yüksek dayanımlı beton (YDB) geniş uygulama alanları bulmaktadır. Önceleri (YDB) yalnız deniz yapılarında ve köprülerde kullanılmışken, bugün prefabrik elemanlarda ve yüksek bina kolonlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır [1,2].

Yüksek dayanımlı betonun kesin tanımını yapmak oldukça zordur, çünkü bu tanım zamanla değişmektedir. Bundan 20 yıl önce yüksek dayanımlı olarak tanımladığımız beton bugün normal dayanımlı beton (NDB) sınıfına girmektedir. Biz burada yüksek dayanımlı betonu, TS-500 deki en yüksek dayanımlı betondan daha yüksek dayanıma sahip olan beton olarak tanımlama eğilimindeyiz, $f_{ck} > 500 \text{ kg/cm}^2$.

Dünyanın çeşitli ülkelerinde üretilen (YDB) doğal olarak ülkemizde de üretilmektedir. Bazı firma ve üniversitelerimizin laboratuvarlarında basınç dayanımı 1000 kg/cm^2 yi geçen beton zorluk çekilmeden hazırlanabilmektedir. Şu anda ülkemizde (YDB) yaygın olarak kullanılmıyorsa da, yakın bir gelecekte bu tür betonlara gereksinme duyulacağı kesindir.

Biz bu yazıda (YDB) kullanılarak imal edilen betonarme yapı ve yapı elemanlarında karşılaşılabilecek sorunlara ve bu konuda neyin bilinip neyin bilinmediğine değinmeye çalışacağız. Yazıdan görüleceği gibi, özellikle son 10 yılda (YDB) konusunda batı ülkelerinde birçok araştırma yapılmış olmasına karşın, bu konudaki bilgi birikimimizde hala önemli boşluklar vardır [1,2]. Unutulmaması gereken çok önemli bir nokta, betonarme hesabını yönlendiren

yönetmelik hükümlerinin, denklemlerin ve kullanılagelen yöntemlerin, dayanımı 400 kgf/cm² den az olan betonla yapılmış eleman deneylerinden elde edilmiş olduğudur. Ayrıca, bu konudaki deneyimiz de yine aynı dayanımdaki betonlarla yapılan yapı ve yapı elemanlarında yapılan gözlemlere dayanmaktadır. Bu yöntemlerin, denklemlerin ve gözlemlerin $f_{ck} > 500$ kgf/cm² ve özellikle $f_{ck} > 1000$ kgf/cm² için ne denli geçerli olacağı tam olarak bilinmemektedir. (YDB) nun yapılarda kullanılmasında en büyük sorun da bu bilinmeyenlerden kaynaklanmaktadır.

2. (YDB) GERİLME-BİRİM DEFORMASYON İLİŞKİLERİ

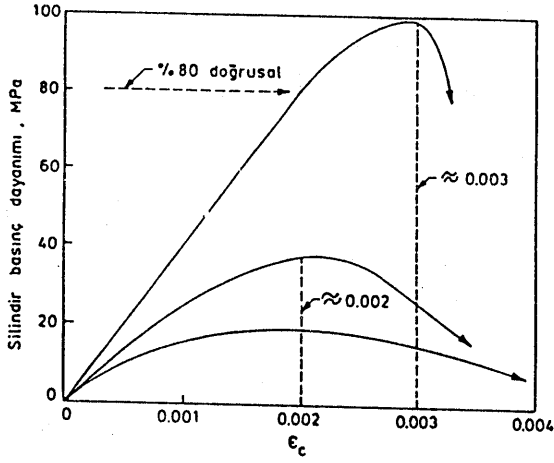
(YDB) ile ilgili çalışmalar, beton dayanımı yükseldikçe betonun gerilme - birim deformasyon ilişkisini belirleyen σ - ϵ eğrisinin önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. (NDB) ile (YDB) gerilme- birim deformasyon eğrileri arasındaki fark, Şekil 1 den izlenebilir.

Şekilden görüleceği gibi, (YDB)'nin (NDB)'den üç önemli farkı vardır.

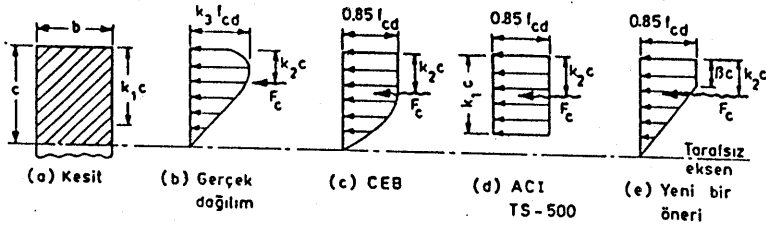
- (NDB)'da maksimum gerilmeye (dayanım) yaklaşık 0.002 gibi bir birim deformasyonda ulaşıırken, bu değer (YDB)'da 0.003'e yaklaşmaktadır.
- (YDB) gerilme-birim deformasyon eğrisi yaklaşık dayanımın %80 ine kadar doğrusal kalmaktadır. Şekilde gösterilmemiştir ama, bu noktaya kadar gözlenen davranış aynı zamanda oldukça elastiktir. (YDB)'nin bu noktaya kadar doğrusal elastik kalmasının nedeni, mikroçatlamaların (NDB)'a oranla çok daha az olmasıdır.
- (YDB)'da ulaşılan en büyük birim kısalma (NDB)'a oranla çok daha küçüktür. Başka bir deyişle (YDB)'nin deformasyon kapasitesi daha azdır.

(YDB)'nin elastisite modülünün bugün yönetmeliklerde verilen denklemlerle sağlıklı bir biçimde hesaplanamayacağı birçok araştırmacı tarafından kanıtlanmıştır [2]. Bu denklemlerle hesaplanan E_c , gerçek değerden daha büyük çıkmaktadır. Bu konuda (YDB)'nu da içeren yeni denklemler önerilmiştir [2].

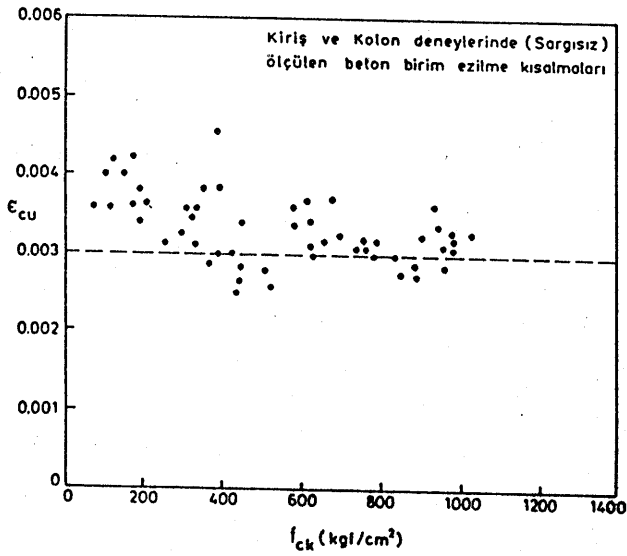
(YDB)'nin Poisson oranını saptamaya yönelik deneysel araştırma sayısı çok kısıtlıdır [2]. Bazı araştırmacılar bu oranın normal betondaki gibi 0.20 alınabileceğini savunurken, diğerleri daha yüksek değerler önermiştir. Bu kısıtlı



Sekil 1



Sekil 2



Sekil 3

çalışmaların ışığında bugün için $\mu=0.20$ alınmasında fazla sakınca olmadığı söylenebilir.

(YDB)'un çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin (NDB)'dan farklı olmadığı anlaşılmaktadır [2]. Bu konuda da ek araştırmalar gerekmele birlikte, bugün yönetmeliklerde verilen denklemlerin geçerli olduğu kabul edilebilir.

(YDB)'da dayanımın zamanla artma hızı, (NDB)'a oranla ilk aşamada daha fazladır. Ancak zaman ilerledikçe bu fark yok olmaktadır [2].

(YDB)'daki büzülme (rötre) ile ilgili yeterli sayıda deneysel veri yoktur. Az sayıdaki deneylerden elde edilen sonuçların ışığında (YDB)'un ilk andaki büzülmesinin (NDB)'a oranla biraz yüksek olduğu söylenebilir. Ancak 180 gün kurutulmuş numuneler üzerinde yapılan deneyler, (YDB)'un (NDB)'dan değişik olmadığını göstermiştir [2,9].

Yapılan deneysel araştırmalar (YDB)'daki sünmenin (NDB)'a oranla daha az olduğunu göstermiştir [2,3,9,10]. (YDB)'da gerilme ve sünme deformasyonu arasındaki ilişkinin doğrusal bölümü (NDB)'a oranla çok daha uzundur. Bunun nedeni (YDB)'daki mikroçatlakların (NDB)'a oranla çok daha az olmasıdır [10].

3. (YDB) TAŞIMA GÜCÜ HESABI (BASİT EĞİLME, BİLEŞİK EĞİLME)

Eğilme veya bileşik eğilme altındaki betonarme elemanların taşıma gücü bazı varsayımlara dayanarak hesaplanır. Bu varsayımların büyük bir çoğunluğu genel bir kabul görürken, aşağıdaki iki varsayımla ilgili görüş ayrılıkları vardır [4].

- Beton basınç bölgesindeki gerilme dağılımı,
- Taşıma gücüne erişildiğinde en dış basınç lifi beton birim kısalması.

Literatürde bunlarla ilgili çeşitli varsayımlara dayanan birçok yöntem bulunmasına karşın, genelde aşağıdaki üç yaklaşımdan biri benimsenmektedir.

(a) CEB Yaklaşımı :

Bu yaklaşımda beton basınç dağılımı için basitleştirilmiş bir model, dikdörtgen-parabol kullanılmaktadır, Şekil 2(c). Betondaki maksimum birim kısalma ise, birim deformasyon dağılımına bağlı olarak 0.002 ve 0.0035 arasında değişmektedir. Birçok Avrupa ülkesinin ulusal yönetmeliklerinde CEB yaklaşımı benimsenmiştir.

(b) ACI Yaklaşımı :

Bu yaklaşımda beton basınç bloğunun bir dikdörtgenle modellenebileceği varsayılmıştır. Şekil 2(d)'de gösterildiği gibi, dikdörtgenin genişliği $0.85f_{cd}$, derinliği k_1c alınmaktadır. 250 kgf/cm² dayanıma kadar olan betonlar için $k_1=0.85$ alınmakta, daha yüksek dayanımlı betonlar için bu değer azaltılmaktadır. TS-500'de $f_{ck}>500$ kgf/cm² için bir alt sınır verilmemişken, ACI'da $f_{ck}>560$ kgf/cm² için $k_1=0.65$ alınması önerilmektedir. Maksimum birim kısalma tüm durumlar için 0.003 tür.

Bu yaklaşım A.B.D., Kanada, birçok Güney Amerika ülkesi ve bazı Kuzey Avrupa ülkelerinde kullanılmaktadır. TS-500 de ACI yaklaşımı benimsenmiş olmasına karşın (a) yaklaşımı da dışlanmamıştır.

(c) Gerçek σ - ϵ Eğrisinin Kullanıldığı Yaklaşım :

Kesit taşıma gücü hesabı yapılırken deneylerden elde edilen σ - ϵ eğrisinin biraz idealize edilerek kullanılması daha gerçekçi sonuçlar verir. Bu durumda sargı etkisi, yüksek dayanımlı betonun kendine özgü davranışı ve σ - ϵ eğrisini etkileyen diğer parametreler de kolayca dikkate alınabilir. Betondaki maksimum birim kısalma için sabit bir değer yerine, bir optimizasyon yapılarak en fazla momente karşı gelen birim kısalma hesaplarda temel alınabilir.

Yukarıda özetlenen (a) ve (b) yaklaşımlarındaki gerilme dağılımları $f_{ck}<400$ kgf/cm² betonlardan elde edilen σ - ϵ eğrileri idealize edilerek oluşturulmuştur. Şekil 2(b) de gösterildiği gibi, herhangi bir basınç dağılımı k_1k_3 ve k_2 olarak gösterilen boyutsuz parametreler ile temsil edilebilir. Önemli olan beton basınç dağılımının geometrisi değil, bu parametrelerin gerçek dağılımındakine uymasındır. Gerekli iki denge denklemi için beton bileşkesi ile ilgili ilişkiler Şekil 2(b) den aşağıdaki gibi

yazılabilir. (*)

$$F_c = k_1 k_3 f_{cd}(c) b \quad (1)$$

$$M_c = F_c (c - k_2 c) = k_1 k_3 f_{cd}(c) b (c - k_2 c) \quad (2)$$

$k_1 k_3$ ve k_2 parametreleri için (a) ve (b) yaklaşımından, dikdörtgen kesitler için aşağıdaki değerler elde edilir.

(a) CEB Yaklaşımı (**)

$$k_1 k_3 = 0.68 \text{ ve } k_2 = 0.415$$

(b) ACI Yaklaşımı

$$k_3 = 0.85 \quad k_2 = k_1/2$$

$$0.85 < k_1 = [0.85 - (f_{ck} - 250)0.0006] < 0.65$$

Düşük beton dayanımlarından elde edilen bu parametrelerin yüksek dayanımlı betonlar için geçerli olup olmayacağı tartışmaya açıktır, çünkü Şekil 1 den görüleceği gibi (YDB)'un σ - ϵ eğrisi oldukça değişiktir.

Sözü edilen $k_1 k_3$ ve k_2 parametrelerinin (YDB) için geçerli olup olmadığını saptamak için Çizelge 1 hazırlanmıştır. Çizelgede, Şekil 1 deki σ - ϵ eğrilerinden hesaplanan parametreler, CEB ve ACI yaklaşımları ile elde edilenlerle (NDB) ve (YDB) için ayrı ayrı karşılaştırılmaktadır. Çizelgede ayrıca beton bileşkesi F_c ve tarafsız eksene göre moment hesaplanmış ve bunların gerçek egriden elde edilenlere oranları verilmiştir.

(*) M_c tarafsız eksene göre alınan momenttir.

(**) Bu yaklaşımda yüksek eksenel yükler için $\epsilon_{cu} < 0.0035$ olacağından basınç dağılımının dikdörtgen parçası yok olabilir. Ancak TS-500 de eksenel yük için yapılan sınırlama nedeni ile bu gibi durumlar enderdir.

ÇİZELGE 1 :BETON BASINÇ DAĞILIMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Parametre	C30 ($f_{cd} = 200 \text{ kgf/cm}^2$)			C100 ($f_{cd} = 670 \text{ kgf/cm}^2$)		
	Gerçek $\sigma - \epsilon$ Eğrisi	CEB Parabol- Dikdört.	ACI (TS500) Dikdört	Gerçek $\sigma - \epsilon$ Eğrisi	CEB Parabol- Dikdört.	ACI (TS500) Dikdört
$k_1 k_3$	0.678	0.679	0.679	0.530	0.679	0.550
k_2	0.410	0.415	0.410	0.340	0.415	0.325
F_c ----- $b c f_{cd}$	0.678	0.679	0.697	0.530	0.679	0.550
M_c ----- $b c^2 f_{cd}$	0.400	0.397	0.411	0.350	0.397	0.370
F_c (gerçek) ----- F_c	1.000	0.998	0.973	1.000	0.780	0.960
M_c (gerçek) ----- M_c	1.000	1.007	0.973	1.000	0.881	0.950

Çizelge 1 de verilen değerler incelenirken unutulmamalıdır ki, basit eğilmede yalnız M_c önemli iken, bileşik eğilmede hem F_c , hem de M_c önemlidir. Çizelge 1 den görüldüğü gibi, (NDB) için CEB ve ACI yaklaşımından elde edilen değerler gerçek değerlere çok yakındır. (YDB) için aynı şeyleri söylemek pek mümkün değildir. CEB yaklaşımı F_c hesabında %22 dolaylarında hata içerirken, bu hata M_c için %12 ye düşmektedir. Görüldüğü gibi sözü edilen hatalar ihmal edilemeyecek düzeydedir. ACI yaklaşımında (dikdörtgen dağılım) hatalar %5 dolaylarına inmektedir. Ancak bu hata oranını genellemek çok yanlış olur. ACI da (YDB) için k_1 parametresi sabit olduğundan ($k_1=0.65$), $f_{ck} > 1000 \text{ kgf/cm}^2$ için hata oranının artması mümkündür. ACI ve CEB yaklaşımından elde edilen F_c ve M_c değerlerinin gerçek değerlerden büyük olması, bu yöntemlerle elde edilen sonuçların güvensiz yönde olacağını göstermektedir.

Görüldüğü gibi, bugün kullandığımız taşıma gücü parametrelerinin (YDB) için değiştirilmesi gerekir. Bu parametrelerin belirlenmesine yönelik deneysel araştırmalara biran önce başlanmalıdır.

k_1k_3 ve k_2 parametreleri, Şekil 1 deki (YDB) eğrisine daha uygun bir yamuk kullanılarak da saptanmıştır. Şekil 2(e) ye göre hesap yapıldığında, $k_1k_3=0.53$ ve $k_2=0.35$ bulunmuştur. Görüleceği gibi elde edilen değerler gerçek eğriden hesaplananlara çok yakındır. Ancak bu konuda genelleme yapabilmek için daha fazla araştırma yapılmalıdır.

Yukarıda özetlenen incelemeye benzer bir inceleme Wang ve arkadaşları tarafından da yapılmıştır [5]. Bu araştırmacıların vardığı sonuçlar yukarıda belirtilen sonuçlardan değişiktir. Wang ve arkadaşları dikdörtgen gerilme dağılımının (YDB) için de güvenle kullanılabileceği sonucuna varmışlardır. Bunun nedeni büyük bir olasılıkla hesaplarda Şekil 1 de gösterilen $\sigma-\epsilon$ eğrisinden oldukça değişik olan ve tepe noktasından sonra da süneklığe sahip olan bir eğrinin kullanılmış olmasıdır.

Bu konuda yapılan deneysel araştırmalarda kullanılan kirişlerin tümünün denge altı olması varılan sonuçların yanıltıcı olmasına neden olmuştur [6,7,8]. Bilindiği gibi denge altı kirişler için hangi basınç dağılımı kullanılırsa kullanılsın, benzer sonuçlar elde edilecektir.

Taşıma gücü için incelenmesi gereken diğer bir parametre, betonun maksimum birim kısalmasıdır. TS-500 de maksimum birim kısalma için sabit bir değer verilmektedir, $\epsilon_{cu}=0.003$. Bilindiği gibi (YDB)'un deformasyon kapasitesi normal dayanımlı betona oranla daha azdır. Şekil 3 te kiriş ve kolon deneylerinde ölçülen maksimum birim kısalma değerleri gösterilmiştir [2,5]. Şekilde dayanım arttıkça birim kısalmanın küçüldüğü gözlenmektedir. Ancak $f_{ck} \leq 1000 \text{ kgf/cm}^2$ lik betonlar için 0.003 hala geçerli görülmektedir.

Üzerinde durulması gereken diğer bir nokta da, kirişler için "dengeli donatı oranının" (YDB) için değişip değişmeyeceğidir. Hatırlanacağı gibi dengeli donatı oranı aşağıdaki ilişkiden hesaplanmaktadır.

$$\rho_b = \frac{k_1k_3f_{cd}}{f_{yd}} \frac{0.003E_s}{0.003E_s + f_{yd}} \quad (3)$$

Çizelge I incelendiğinde CEB veya ACI yöntemi ile hesaplanan $k_1 k_3$ parametresinin gerçek değerinden büyük olduğu görülür. Bu durumda elde edilecek dengeli donatı oranı da gerçek değerinden büyük olacaktır. Bu da güvensiz yönde bir durum yaratacak ve denge altı sanılan bir kirişin denge üstü olması ile sonuçlanabilecektir. Dengeli donatı konusu da daha etraflı araştırılmalı, o zamana kadar donatı oranı küçük tutularak dengeli sınırdan uzak kalınmalıdır.

4. (YDB)'UN SÜNEKLİĞİ

(YDB)'un (NDB)'a oranla çok daha gevrek bir davranış gösterdiği Şekil 1 deki eğrilerden kolayca görülebilir. Gevrek davranış istenen bir davranış biçimi değildir. Özellikle deprem etkisi altındaki elemanlarda kullanılan malzemenin gevrek bir davranış sergilemesi, tersinen ve tekrarlanan yükler altında çok önemli olan süneklilik ve enerji tüketimini olumsuz yönde etkiler. Bilindiği gibi, sünekliliği artırmanın en etkili yolu sargı donatısı kullanmaktır. Beton, sık yerleştirilmiş ve iyi detaylandırılmış enine donatı ile sarıldığında, göbek betonunda eksenel basınç altında oluşacak basınca dik yöndeki genişleme eğilimi (Poisson etkisi nedeniyle), enine donatı tarafından önleneceğinden, beton göbek alanı etrafında bir yanıl basınç oluşacaktır. Uygulanan eksenel basınca dik yöndeki bu sargı gerilmeleri genelde σ_2 ile gösterilmektedir. Yine bilindiği gibi, σ_2 nin varlığı göbekteki beton dayanımını artırmakta, daha da önemlisi sünekliliği büyük oranda iyileştirmektedir. Beton dayanımındaki artışın aşağıdaki gibi ifade edilebileceği gösterilmiştir [2].

$$\Delta f = 4 \sigma_2 \left(1 - \frac{s}{D}\right) \quad (4)$$

σ_2 - sargı donatısının oluşturduğu yanıl basınç gerilmesi

s - enine donatı aralığı

D - göbek çapı

ρ_s - enine donatının hacımsal yüzdesi

f_{yw} - enine donatının karakteristik akma dayanımı

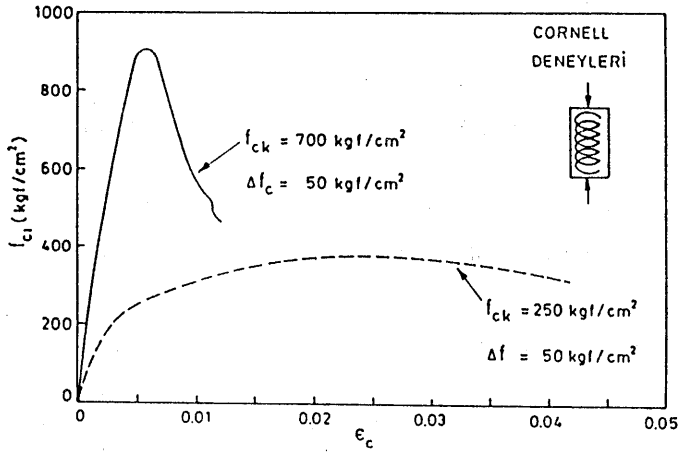
(YDB)'da sargı donatısının etkisini incelemek üzere bazı deneysel araştırmalar yapılmıştır. Bunları iki grupta incelemek gerekir; (a) basit eğilme uygulanan deneyler ve (b) eksenel yük uygulanan deneyler.

Basit eğilme uygulanarak yapılan kiriş deneylerinde ve yapılan bazı analitik çalışmalarda sargı donatısı ile sünekliğin etkili olarak artırılabilceği kanıtlanmıştır [6,11]. Kirişler için bilinen yöntemlerle belirlenen moment-eğrilik ilişkisinin (YDB) için de oldukça geçerli olduğu deneylerle gösterilmiştir [5].

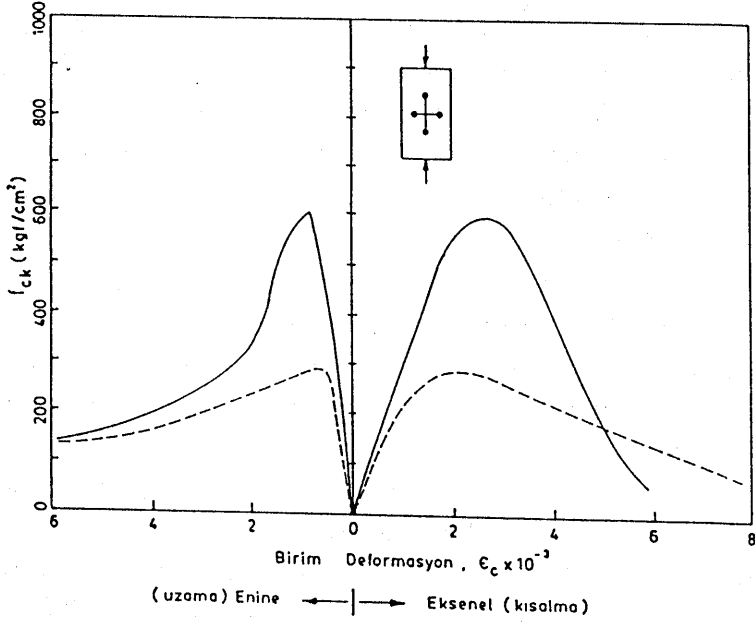
Sargı etkisini incelemek üzere (YDB)'dan yapılmış eksenel yüklü betonarme eleman deneyi son derece azdır [6,12]. Toronto Üniversitesi'nde yapılan deneyde (YDB) ile yapılmış kolonlarda yeterli sargı donatısı ile istenen sünekliğin elde edilebileceği sonucuna varılmıştır [6]. Ancak, yapılan analitik çalışmada (NDB) için geçerli olan beton modellerinin (YDB) için aynı derecede geçerli olmadığı da belirtilmiştir. Ayrıca, Toronto deney elemanlarındaki beton dayanımı yeterince yüksek değildir.

Cornell Üniversitesi'nde eksenel yüklü fretli silindirlerle ilgili deney sonuçları (YDB)'daki sargı etkisi ile ilgili bazı endişeler uyandırmaktadır [2]. Şekil 4 te bu araştırmada (NDB) ve (YDB) ile yapılmış eksenel yüklü silindir deneylerinden elde edilen gerilme-birim kısalma eğrileri gösterilmiştir. Her iki deney elemanında sargı etkisini eşit düzeyde tutacak biçimde fret yerleştirilmiştir. Başka bir deyişle, Denklem (5) teki Δf her iki eleman için de 50 kgf/cm^2 dolaylarında tutulmuştur. Şekil 4 ten görüleceği gibi bu düzeyde bir sargı etkisi ($\Delta f=50 \text{ kgf/cm}^2$) (NDB) için yeterli sünekliği sağlarken, aynı sargı etkisine sahip (YDB) son derece gevrek bir davranış sergilemiştir.

Cornell deneylerinde gözlenen bu olayın nedenlerini anlamak için aynı üniversitede daha önce yapılmış bir çalışmaya göz atmakta yarar vardır. Eksenel yüklü donatısız elemanlar üzerinde yapılan ölçümler Şekil 5 te gösterilmiştir [13]. Bu şekilden görüleceği gibi, dayanımı yüksek olan betonlarda tepe noktası geçildikten sonra yanal birim deformasyon artışı oldukça küçüktür ve artış ancak eksenel gerilmede büyük düşmeler olduktan sonra oluşabilmektedir. Enine donatı tarafından önlenen yanal birim deformasyonun daha az olması ve bu aşamada betondaki dayanım kaybının belki de fret etkisinden daha fazla olması, Şekil 5 te görülen davranışın nedenleri olabilir. Ayrıca Δf beton dayanımını içermediğinden yüksek dayanımlı betonlar için iyi bir ölçü olmayabilir. Cornell deneylerinde kabuk kalınlığının sıfır olması da genelleme yapmayı olanaksız kılmaktadır.



Şekil 4



Şekil 5

Bu konu biran önce deneysel olarak araştırılmalı ve (YDB) için etkili sargı donatısı belirlenmelidir. Bu yapılmadan (YDB)'nun kolonlarda yol açabileceği gevrek kırılma önemli sorunlar çıkarabilir.

5. (YDB) İLE YAPILMIŞ B/A ELEMANLARIN KESME DAYANIMI

(YDB)'dan yapılmış kirişlerin kesme dayanımını saptamak amacı ile birçok deneysel araştırma yapılmıştır. Bunları aşağıda iki grupta gözden geçirilecektir.

5.1. Kesme Donatısı Bulunmayan Kirişler

Kesme donatısız kiriş deneylerinin temel amacı, eğik çatlama dayanımının saptanması ve betonun kesme taşıma mekanizmasının araştırılmasıdır. Bu konuda yapılan deneylerin ışığında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır [1,2,14,15,16,17].

- a/d oranının (veya M/Vd) küçük olduğu kirişlerde, $a/d < 3.0$, yönetmeliklerdeki denklemlerden elde edilen kesme dayanımı (veya kesme çatlaması) güvenli yönde kalmaktadır.
- Yukarıda sözü edilen güvenlik, a/d oranının daha büyük olduğu durumlarda beton dayanımı arttıkça azalmaktadır. Bu durum çekme donatısı oranı çok küçük olan kirişlerde daha da belirgin olmaktadır. Bu nedenle çekme donatısı az (YDB) kirişler üzerinde ek deneylere gereksinme vardır.
- (YDB) ile yapılmış, çekme donatı oranı düşük olan kirişlerde gözlenen çatlak eğimleri (NDB) kirişlerden farklı olmaktadır.
- (YDB) kirişlerde gözlenen eğik çatlak yüzeyleri (NDB) kirişlerde gözlenenlere oranla daha pürüzsüz olmaktadır. Sürtünmenin azalması ile de kayma dayanımında azalma olmaktadır.
- Kesme kırılması oluşan ve kesme açıklığı büyük ($a/d > 3.5$) (YDB) kirişlerde Prof. Kani tarafından tanımlanan "kesme vadisi" (NDB) kirişlere oranla daha derin olmaktadır. Başka bir deyişle, (YDB) kirişlerde deneyde ölçülen momentlerin, hesaplanan eğilme kapasitesine oranı daha düşük olmaktadır. Bu durumda bu kirişleri eğilmeden kırılmasma zorlamak için daha fazla kesme donatısına gereksinme duyulacaktır.

5.2. Kesme Donatısı Bulunan Kirişler

Çeşitli araştırmalar tarafından kesme donatılı (YDB) kirişler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir [1,2,17,18,19].

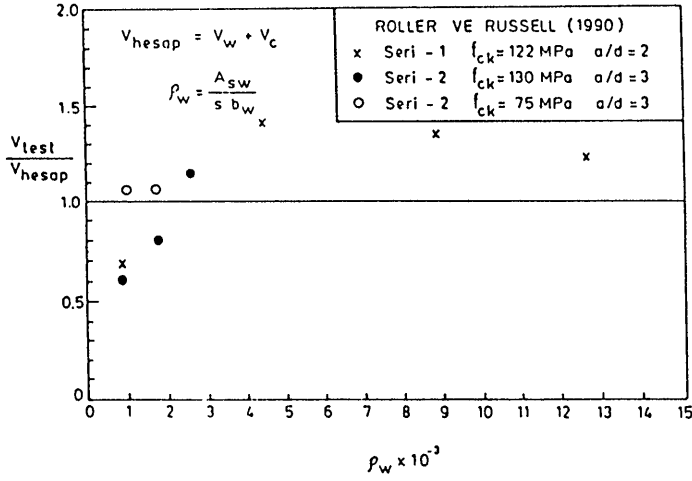
ACI yönetmeliğine göre kayma donatısı yerleştirilen (YDB) kirişlerin deneyde gözlenen kapasiteleri, ACI'ya göre hesaplanan kapasiteden fazla olmuştur. Bunun tek istisnası kayma ve eğilme donatı oranları çok düşük olan kirişlerdir.

ACI yönetmeliğinde öngörülen minimum kesme donatısı oranı beton dayanımından bağımsızdır.

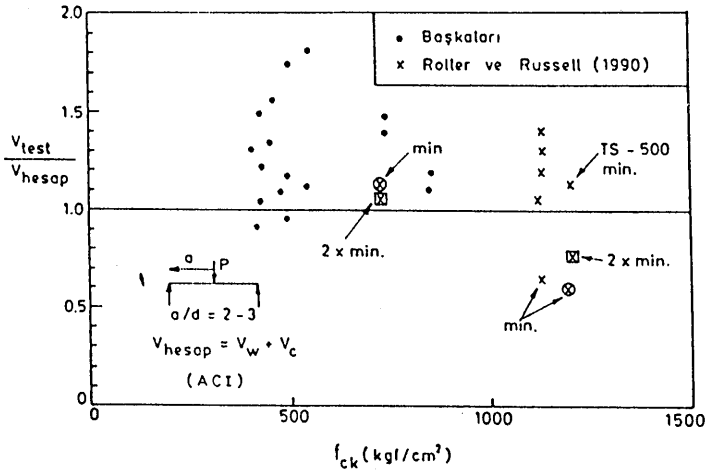
$$\min p_w = \frac{A_{sw}}{sb_w} = \frac{3.5}{f_{yk}} (ACI-metrik) \quad (5)$$

Yapılan deneysel çalışmalar (NDB) için yeterli olduğu kanıtlanmış bu oranın (YDB) için yetersiz olduğunu göstermektedir. Şekil 6 da Roller ve Russel tarafından (YDB) ve (NDB) kiriş deneylerinden elde edilen sonuçlar özetlenmiştir. V_{test} deneyde saptanan kesme dayanımı, V_{hesap} ise ACI Yönetmeliğine göre hesaplanan dayanımdır, V_{hesap} =kesme donatısı katkısı + beton katkısı. Şekilden görüleceği gibi düşük kayma donatısına sahip (NDB) kirişlerde V_{test}/V_{hesap} oranı 1.0 den büyükken, aynı donatı oranına sahip (YDB) kirişlerde bu oran 1.0 den oldukça küçük çıkabilmektedir. Bu oranın 1.0 den küçük olması gevrek bir kırılmayı göstermekte olup, minimum donatının yetersizliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Şekil 7 de çeşitli araştırmacılar tarafından denenen kirişlerin kesme dayanımlarının beton dayanımına göre değişimi gösterilmiştir. x işaretli olanlar Roller ve Russel tarafından yapılan deneylerdir. Etrafına daire konan iki deney elemanı ACI'a göre minimum kayma donatısına sahip kirişlerdir. İki kiriş arasındaki tek fark, beton dayanımıdır. Şekilden görüleceği gibi (NDB) kiriş güvenli yönde kalırken, (YDB) kiriş hesaplanan dayanımın çok altında kalmaktadır. ACI da öngörülen minimum kayma donatısının iki katına sahip iki kiriş kare ile işaretlenmiştir. Bu kirişlerden (YDB)'la yapılanın dayanımı da yine hesaplanan dayanımın altında kalmıştır.



Sekil 6



Sekil 7

Bilindiği gibi TS-500 de minimum kayma donatısı çekme dayanımına bağlı olarak verilmektedir. Bu durumda $f_{ck}=1200-1300 \text{ kgf/cm}^2$ için TS-500 den elde edilen minimum kayma donatısı oranı ACI'dan elde edilenin yaklaşık 2.5 katı olmaktadır. Russell ve Roller tarafından denenen 10 nolu kiriş TS-500 de öngörülen minimum donatıya sahiptir. Şekil 7 den görüleceği gibi bu kirişin deneyde eriştiği maksimum kesme kuvvetinin hesaplanana oranı 1.0 in üzerinde kalmaktadır. Bu durumda TS-500 de öngörülen minimum kayma donatısının (YDB) için de geçerli olduğu izlenimi uyanmaktadır. Ancak bu konuda daha fazla deneysel veriye gereksinme vardır.

Özet olarak, tüm kiriş boyunca kayma donatısı bulundurulması zorunlu olan ülkemizde TS-500 ile yapılacak hesapların (YDB) için de geçerli olduğu söylenebilir. Tek sorun minimum kayma donatısıdır ki, bunun da TS-500 e göre hesaplandığı takdirde yeterli olabileceği yazarlarca deneysel verilerden saptanmıştır. Ancak bu konuda daha fazla deneysel veriye gereksinme vardır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bildiride yapılan irdelemelerden anlaşılabacağı gibi, (YDB) ile yapılan betonarme yapı elemanlarının davranışı (NDB) ile yapılanlardan bazı farklılıklar göstermektedir. Mevcut yönetmeliklerdeki denklemlerin, dayanımı 400 kgf/cm^2 yi geçmeyen betonlardan yapılmış eleman deneylerinden elde edildiği unutulmamalıdır. Bu denklemden bazılarının (YDB) için sağlıklı sonuç vereceği kuşkuludur. Bu nedenle, (YDB) ile yapılan elemanların hesabı yapılırken dikkatli davranılmalı ve güvenli yönde kalınmasına çalışılmalıdır.

Taşıma gücü hesabında kullanılacak beton basınç dağılımının özellikleri (YDB)'un gerçek gerilme-deformasyon ilişkisi temel alınarak yeniden saptanmalıdır. Bu bildiride açıkça gösterildiği gibi CEB'nin parabol-dikdörtgenin (YDB) için aynen kullanılması önemli hatalar içerecek ve sonuçlar güvensiz yönde kalacaktır.

(YDB) ve çeşitli donatı sınıfları kullanıldığında, basit eğilme ve bileşik eğilme altında oluşacak moment-eğrilik ilişkileri analitik olarak incelenmeli ve sonuçlar deneylerle kontrol edilmelidir.

(YDB) ile yapılan elemanların davranışının daha iyi anlaşılabilmesi ve ilgili hesap yöntem ve denklemlerinde gerekli değişikliklerin yapılabilmesi için araştırmalara, özellikle de deneysel araştırmalara gereksinme vardır. Yazarların kanısınca özellikle sargı etkisi ile ilgili deneysel araştırmalara öncelik verilmelidir. Kesme ve eğilmeye zorlanan (YDB) kirişlerde sünek davranışı sağlayacak minimum eğilme kesme donatısı için de deneysel çalışmalara gereksinme vardır.

(YDB) araştırmacılara yeni ufuklar açmaktadır.

KAYNAKLAR

1. "Design Aspects of High Strength Concrete", CEB Bulletin no.193, Lausanne, Dec. 1989, pp.13-163.
2. "State of the Art Report on High Strength Concrete", ACI Comm. 363, Journal of ACI, July-August 1984, pp.364-411.
3. Held, M., "Mechanical Properties of High Strength Concrete", Darmstadt Concrete, V.4, 1989, pp. 71-79.
4. Ersoy, U., "Betonarme-Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı", Ankara, 1986.
5. Wang, T., Shah, S.P., and Naaman, E.A., "High Strength Concrete in Ultimate Strength Design", Journal of Structural Div., ASCE, ST-11, Nov. 1978, pp. 1761-1773.
6. Üzümeri, S.M., "Yüksek Dayanımlı Beton Elemanların Yapısal Davranışı", TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası X. Teknik Kongresi, Cilt 1, 1989.
7. Leslie, K.E., Rajagopalan, K.Z., and Everard, J.N., "Flexural Behaviour of High Strength Concrete Beams", Journal of ACI, Sept. 1976, pp. 517-521.
8. Ehsani, M.A., Moussa, A.E., and Vallenilla, C.R., "Comparison of Inelastic Behaviour of Reinforced Ordinary and High Strength Concrete in Frames", ACI Structural Journal, March-April, 1987, pp. 161-170.
9. Ngab, S.A., Nilson, A.H., and Slate, F.O., "Shrinkage and Creep of High Strength Concrete", Journal of ACI, July-August 1981, pp 262-268..
10. Ngab, S.A., Slate, F.O., and Nilson, A.H., "Microcracking and Time Dependent Strains in High Strength Concrete", Journal of ACI July-August 1981, pp.262-268.

11. Shin, S., Ghosh, K.S., and Moreno, J., "Flexural Ductility of Ultra-High Strength Concrete Members", *ACI Structural Journal*, July-August 1989, pp. 394-400.
12. Fattah, H., and Ahmad, S.H., "Behaviour of Hoop Confined HSC Under Axial and Shear Loads", *ACI Structural Journal*, Nov.-Dec. 1989, pp. 652-659.
13. Ahmad, S.H., and Shah, S.P., "Complete Triaxial Stress-Strain Curves for Concrete", *Journal of Structural Div.*, no.ST4, ASCE April 1982, pp. 728-742.
14. Mphonde, A.G., and Franz, G.C., "Shear Tests of High and Low Strength Concrete Beams Without Stirrups", *Journal of ACI*, July-August 1984, pp. 350-357.
15. Elzanaty, A.H., Nilson, A.H., and Slate, F.O., "Shear Capacity of R/C Beams Using High Strength Concrete", *Journal of ACI*, March-April 1986, pp. 290-296.
16. Ahmad, S.H., Khaloo, A.R., and Poveda, A., "Shear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Beams", *Journal of ACI*, March-April 1986, pp. 297-308.
17. Ahmad, S.H., and Lue, D.M., "Flexural-Shear Interaction of Reinforced High Strength Concrete Beams", *ACI Structural Journal*, July-August 1987, pp. 330-341.
18. Johnson, M.K., and Ramirez, J.A., "Minimum Shear Reinforced in Beams with Higher Strength Concrete", *ACI Structural Journal*, July-August 1989, pp. 376-382.
19. Roller, J.J., and Russel, H.G., "Shear Strength of High Strength Concrete Beams with Web Reinforcement", *ACI Structural Journal*, March-April 1990, pp. 191-198.