

YÜKSEK DAYANIMLI BETONUN İNŞAATTA KULLANIMI KONUSUNDA STANDARTLAR VE YÖNETMELİKLERDEKİ GELİŞMELER

Şükrü M. ÜZÜMERİ
Profesör
İnşaat Mühendisliği Bölümü
Toronto Üniversitesi
Toronto, Kanada

Şevket ÖZDEN
Yüksek Lisans Öğ. - Ar. Gör.
İnşaat Mühendisliği Bölümü
Toronto Üniversitesi
Toronto, Kanada

ÖZET

Son yıllarda, beton üretimi ve kullanımı alanlarında bir çok yeni adımlar atılmıştır. Bunlar arasında, "Yüksek Dayanımlı Beton"un üretilmesi ve kullanılması en önemli gelişmelerden biridir. Bu tebliğde, yapı mühendislerini ilgilendiren, Yüksek Dayanımlı Betonun dizayn ve kullanımında etkin olan, ulusal ve uluslararası teknik yönetmelikler ve yeni araştırma raporları taranarak, Normal Dayanımlı Beton'un davranışından alınan bilgileri esas alarak yazılmış olan kuralların, Yüksek Dayanımlı Betondan yapılmış elemanların dizayn ve yapılmasına uygulanmasında çıkabilecek problemler incelenmektedir. Bu konunun incelenmesinin sebebi, bilhassa, kırılış yöntemlerindeki fark dolayısı ile, Normal Dayanımlı Beton ile Yüksek Dayanımlı Beton arasındaki davranış farkının, yapının ve yapı elemanlarının yük taşıma kapasitelerinin hesabında, Normal Dayanımlı Betonlar için geliştirilmiş yöntemlerin "Yüksek Dayanımlı Betona" nasıl uygulanabileceğidir.

Tebliğ, Yüksek Dayanımlı Betonun malzeme ve işlenebilirlik konularına girmemektedir. Onun yerine, Yüksek Dayanımlı Betonun yük altında davranışını ve yapının güvenliğini etkileyen özellikleri incelenmektedir. Önemli hususlar kısaca gözden geçirildikten sonra, incelenen alanda daha fazla bilgi verebilecek kaynaklar okuyucunun dikkatine sunulmaktadır. Tebliğ, ihtiyaç duyulan araştırma konularını özetleyen bir liste de vermektedir.

1. GİRİŞ

1.1 Amaç

Bu tebliğ yapı mühendisleri için yazılmıştır. Burada "Yüksek Dayanımlı Betonun" kullanımı ve yapılara uygulanması için kullanılan kod ve yapı standartlarındaki yeni gelişmelerle, yakın geçmişte yapılan araştırmaların sonuçları verilmiştir. Bu çalışmada sadece normal ağırlıklı beton dikkate alınmıştır. Yüksek dayanımlı betonun üretimi ve üretimini etkileyen malzeme karakteristikleri bu çalışmanın kapsamı dışındadır.

Anlatılan konuların birçoğunda, özellikle American Concrete Institute (ACI) [1,2], Federation Internationale de la Precontrainte/Comite Euro-International du Beton (FIP/CEB) [3] ve British Cement Association (BCA) [4], kaynaklarından faydalanılmıştır.

1.2 Yüksek Dayanımlı Betonun Tanımı ve Tarihsel Geçmişi

"Yüksek Dayanımlı Beton" tanımı sürekli değişmektedir. 1950'lerde standart silindir (6x12inch, veya 150x300mm) basınç dayanımı (f_c') 34 MPa olan beton, "Yüksek Dayanımlı Beton" olarak kabul edilmekte idi. 1960'larda ABD'de basınç dayanımı 41MPa ve 52MPa olan betonlar piyasada kullanılıyordu. Yakın geçmişte ise basınç dayanımı 80 MPa ile 100 MPa arasında değişen beton, yerinde dökülmüş betonla yapılan yapılarda ve öngerilmeli beton yapı elemanlarında ticari olarak uygulanmıştır [1,3]. Ayrıca, çok yüksek dayanımlı agrega kullanarak, basınç dayanımı 250 MPa a ulaşan betonlar da üretilebilmiştir.

"Yüksek Dayanımlı Beton" tanımı üretim yapılan bölgede yaygın olan üretim teknolojisi ile değişebilir. Eğer bölgede kullanılan beton basınç dayanımı 30 MPa ise f_c' değeri 50 MPa olan beton o bölgedeki mühendisler tarafından "Yüksek Dayanımlı Beton" olarak kabul edilebilir. Bunun yanında, eğer bölgede kullanılan betonun basınç dayanımı 50 MPa ise, bu durumda f_c' değeri 80 MPa olan beton o bölgede "Yüksek Dayanımlı Beton" olarak kabul edilebilir. Fakat burada mesele betonun dayanımları arasındaki relativ oran değildir. Mesele değişik basınç dayanımlı betonların göstereceği davranış değişiklikleridir.

Her ne kadar, ulusal yapı kodlarında var olabilen herhangi bir dayanım limitinin üzerindeki beton dayanımları "Yüksek Dayanımlı Beton" olarak tanımlanırlarsa da, yapı dizaynında kullanılacak olan basınç dayanımının minimum ve maksimum limitlerinin mutlaka gözönünde bulundurulması gerekir. FIP/CEB State-of-the-Art Report [3] "Yüksek Dayanımlı Beton" tanımı için $f_c' = 60$ MPa ı minimum limit, $f_c' = 130$ MPa ı maksimum limit olarak öngörmektedir.

ACI Yapı Kodunda [2] ise 41 MPa, Normal Dayanımlı Beton için maksimum limit olarak verilmiştir. Yapı kodlarında kullanılan çoğu dizayn denklemi, maksimum basınç dayanımı yaklaşık 41 MPa a kadar değişen beton dayanımlarının kullanıldığı deney sonuçları analiz edilerek ortaya çıkarılmıştır. Basınç dayanımı yukarıda verilen limiti geçen tüm betonlar "Yüksek Dayanımlı

Beton" olarak düşünölmeli, ve genelde kullanılan kod denklemleri "Yüksek Dayanımlı Beton" a uygulanırken, denklemin geçerlilikleri incelenmelidir.

Bu çalışmada, aksi belirtilmedikçe, standard silindir (150mm çapx300mm yükseklik) deneylerinde ölçölen basınç dayanımları, beton basınç dayanımı (f_c') olarak kullanılmaktadır. "Yüksek Dayanımlı Beton" un minimum basınç dayanım limiti olarak $f_c' = 41$ MPa kabul edilmiştir. Ayrıca, Yüksek Dayanımlı Beton ve Normal Dayanımlı Beton yerine sırasıyla YDB ve NDB kısaltmaları kullanılacaktır.

1.3 Yüksek ve Normal Dayanımlı Beton Arasındaki Farklar

Kesme, eğilme, burulma ve eksenel yükleme gibi yükleme şekilleri; gerilme-deformasyon ilişkisi, aderans ve ankraj, sargılama ve süneklik gibi eleman davranışları için kullanılan denklemler basınç dayanımı yaklaşık 41 MPa a kadar olan betonlarla yapılan deneylerin sonuçlarından çıkartılmışlardır. Bundan dolayı Normal Dayanımlı Betonun (NDB) davranış özellikleri daha iyi bilinmektedir. Tüm dizayn ve davranış hesapları doğrudan doğruya f_c' parametresine bağılı olduğundan, genellikle betonun basınç dayanımındaki bir değişme tüm sonuçları etkilemektedir. Fakat eleman davranışındaki değişme basınç dayanımındaki değişme ile doğru orantılı olmayabilir.

Örnek olarak, laboratuvar deneyleri Yüksek Dayanımlı Betonun (YDB) Elastisite Modölünün (E_c), NDB için türetilen denklemlerle hesaplanamayacağını göstermiştir. Belli bir basınç dayanımından sonra NDB için türetilen denklemler, YDB un E_c değerini gerçeğinden daha fazla olarak vermektedir.

NDB ile yapılan dizayn uygulamalarında, maksimum gerilme seviyesindeki basınç deformasyonu $\epsilon_s = 0.002$ olarak alınır. Fakat YDB da bu deformasyon limitinin yükselen basınç dayanımı ile arttığı görölmektedir. Bu durum YDB elemanların eğilme hesaplarında etkili olabilir ve bu etki şu an bazı araştırmacılar tarafından incelenmektedir. Bazı yapı kodları, elemanların taşıyabilecekleri maksimum kesme yüklerinin hesabında kullanılacak olan beton basınç dayanımını bir üst limit vererek sınırlamışlardır. Bu durum betonun bütün özelliklerinin artan basınç dayanımı, f_c' , ile daha da iyileşeceği anlamına gelemeyeceğini gösterir. Ayrıca ateşe dayanıklılık gibi bazı beton özellikleri YDB için daha da düşüktür. Buna rağmen, sünme, büzölme ve geçirgenlik gibi bazı özellikler YDB da, NDB a göre daha iyidir. Bu düzelme YDB un daha pek bir iç yapısının olmasına bağılıdır ve malzeme matriksinin konfigurasyonundaki değişikliklerden doğmaktadır.

Herhangi bir beton karışımında, karışımındaki su miktarı çimento taneciklerinin tam hidratasyonu için hiçbir zaman yeterli değildir. Bu sebeple beton elemanlarda uygun kür şartları çok önemlidir. YDB da büyük basınç dayanımları elde etmek için azalan su miktarı kullanılır, ve kaybedilen işlenebilirlik akışkanlaştırıcılar kullanılarak tekrar kazanılır. Bu durum hidratasyon için

gerekli olan suyun önemini daha da artırır. Bu suyun eksikliği üretilen YDB un maksimum taşıma kapasitesini ciddi şekilde etkiler ve düşürür.

YDB ile NDB arasındaki farklar, bu iki beton tipinin ayrı kırılma karakteristiklerinden doğar. Eğer bu beton tiplerinden herhangi biriyle yapılan elemanların davranışlarında büyük ayrılıklar var ise, dizayn yaparken hesaplarda düşük betonun basınç dayanımını kullanmak güvenli tarafta kalmayı garanti etmez. Davranışlardaki ayrılıkların tamamen tesbit edilemediği alanlarda, mühendisler YDB nun kırılma karakteristiklerini ve bunun sonuçlarını gözönüne almalıdırlar.

2. MALZEME KONULARI

2.1 Kullanılan Malzemeler

2.1.1 Çimento ve Agrega

Betondaki boşluk oranının azlığı, matriks konfigurasyonunun peklığı (Şekil 1) ve kullanılan agreganın kalitesi, YDB un kalitesini etkileyen ana hususlardır. Boşluk oranının azalması ve yoğunluğun (peklığın) yükselmesi, betonun mukavemetini artırır. Dayanıksız agreganın kullanımı betonun erken kırılmasına sebep olur. Düşük su/çimento (w/c) oranı (0.2~0.4), süper akışkanlaştırıcıların yaygın bir şekilde kullanımı ve "silica fume", "blast furnace slag" ve "fly ash" gibi ince pozolanların kullanımı YDB üretiminde en önemli faktörlerdir.

YDB oldukça pek bir matriks konfigürasyonu ile elde edilir. Çok düşük w/c oranı ve pozolanların uygulanması bu konfigürasyonu oluşturur (Şekil 2). Fakat çimento seviyesini arttırarak w/c oranını düşürmek, hidrasyon hararet derecesini artırır ve istenmeyen yan etkiler doğurur. Bundan dolayı w/c oranının azaltılması, kullanılan su miktarının azaltılması ile sağlanır. Düşük w/c oranının ve pozolanların kullanılması yoğun ve çok pek bir matriksin oluşmasını sağlar. Bu durum pekişmiş karışımın kalıba kolaylıkla yerleştirilebilmesi için ("High-range Water Reducers" [1]) süperakışkanlaştırıcıların kullanımını zorunlu kılar.

Agregaların kalitesi, YDB un kalitesini direk olarak etkiler. Agregalar seçilirken, su gereksiniminin az olmasına önem verilmelidir. Bu da agregaların granülometrisi, parça şekli ve su emme kapasiteleri ile ilgilidir. Maksimum kaba agreg boyutu 22mm ile 25 mm arasında, minimum kaba agreg boyutu ise 9.5mm ile 12.7mm arasında olmalıdır [1,3]. İdeal agreg temiz, kübik, köşeli, %100 kırılmış olmalı ve yassı ve uzun tanelerden sakınılmalıdır.

2.2 YDB un Mekanik Özellikleri

2.2.1 Poisson Oranı

YDB un elastik yüklemeler altındaki Poisson oranı, düşük dayanımlı betonun Poisson oranı ile mukayese edilebilir. Bu oran gerilme düzeyine göre 0.18 ile 0.24 arasında değişir [3]. Fakat

elastik olmayan yüklemeler altında YDB da daha az mikro çatlaklar oluşması nedeniyle yanıl deformasyonlar NDB a oranla daha azdır. Poisson oranının hesaplanması için Ahmad[5] şu denklemin kullanılmasını önermiştir: $[\nu=6.855(f_c)^{-0.77}](MPa)$. Bunun yanısıra, basınç dayanımı 21MPa ile 76 MPa arasında olan betonların deney sonuçlarına göre, çakıl veya kireçtaşından mamül betonların, basınç dayanımları dikkate alınmaksızın, Poisson oranları 0.2 olarak alınabilir [6].

2.2.2 Büzülme

YDB un büzülme özelliği hakkında bilgi veren birçok kaynak vardır [7,8,9]. Aitcin [7] basınç dayanımları 64 MPa, 90 MPa ve 100 MPa olan üç YDB beton grubunda başlangıçtaki büzülme oranının YDB için relativ olarak daha fazla olduğunu gözlemiştir. 91 gün sonunda Aitcin bu üç beton grubunun büzülmelerinde pratik olarak büyük bir fark görememiştir. Fakat iki çok yüksek dayanımlı beton grubunda, büzülmenin ilkinde nazaran daha erken oluştuğunu gözlemiştir. Kesin bir ortak sonuca ulaşamamalarına rağmen, bazı araştırmacılar akışkanlaştırıcıların hidrolik büzülmeyi arttırdığını rapor etmişlerdir. Büzülme düşük dayanımlı betonlarda (27 MPa'a kadar), orta (41 MPa'a kadar) ve yüksek dayanımlı betonlara (62 MPa'a kadar) nazaran daha da fazladır [9].

2.2.3 Sünme

Beton basınç dayanımı ve sünme katsayısı arasındaki ilişki için yapılan çalışmalar aynı yaştaki betonlarda maksimum öz sünmenin YDB için NDB a göre daha az olduğunu göstermiştir. Yapılan deneyler YDB un sünme değerinin NDB un sünme değerinden %25-50 oranında daha az olduğunu göstermiştir [1,3,10]. Benzer kuruma koşullarında ve benzer relativ gerilmelerde, aşırı yüklemeler dahil olmak üzere, sünme deformasyonu, sünme katsayısı ve öz sünmenin YDB için daha küçük olduğu [8,9], Şekil 3 te görülmektedir. Ayrıca betonun sünme davranışı betona uygulanan kür rejimine de bağlıdır. Düşük w/c oranı ve yükleme zamanındaki yüksek hidrasyon derecesi, sünme potansiyalini düşüren etkenlerdir.

2.2.4 Elastisite Modülü

Çeşitli araştırmacılar ve yapı kodları elastisite modülünün (E_c) tayini için çeşitli denklemler önermişlerdir. Bu denklemler Tablo 1 de verilmiştir. Mevcut deney sonuçları ve kullanılabilecek denklemlerin oluşturduğu eğriler Şekil 4 te gösterilmiştir. Aynı şekilden görüleceği gibi ACI 318-89 denklemi E_c değerini YDB grubu için gerçeğinden daha fazla hesaplar. ACI denklemleri YDB için geliştirilmediği için, bu fazla şaşırtıcı olmamalıdır.

TABLO I Elastisite Modülü Denklemleri

ACI 318-89	: $E_c = 0.043 \rho^{1.5} \sqrt{f'_c}$	[2]
FIP/CEB	: $E_c = 10^4 (f_{ck} + 8)^{1/3}$	[3]
ACI Committee 363	: $E_c = 3320 \sqrt{f'_c} + 6900$	[1]
Ahmad et.al.	: $E_c = (1/29510) \rho^{2.5} (\sqrt{f'_c})^{.65}$	[5]
Norwegian Code	: $E_c = 9500 (f_{cc})^{0.3} (\rho/2400)$	[3]
Shah et.al.	: $E_c = (1/28) \rho^{1.5} \sqrt{f'_c}$	[5]

3. MUKAVEMET ÖZELLİKLERİ

3.1 Basınç Dayanımı

Betonun hemen hemen tüm mühendislik özellikleri tek eksenli basınç dayanımı cinsinden ifade edilmiştir. Beton numunesinin ölçülen basınç dayanımı, kür koşullarına, betonun deney zamanındaki yaşına, yüklenme hızına, geometrisine, ebadına ve numunenin peklilik derecesine bağlıdır. Basınç dayanımını belirlemek için, silindir ve küp gibi çeşitli standart şekilli ve boyutlu numuneler kullanılmaktadır. Değişik yapı kodlarını ve değişik araştırma sonuçlarını inceleyen mühendisler bu farklılıkları ve bu farklılıkların doğuracağı sonuçları göz önüne almalıdırlar.

Kübik ve silindirik beton numunelerinin ölçülen basınç dayanımları arasındaki ilişki FIP/CEB Report [3] da verilmiştir. Norveç Kodundan alınan bu bilgi Tablo 2'de verilmiş ve tablodaki değerlerden çıkartılan bir denklem Şekil 5 te gösterilmiştir.

TABLO II Küp ve Silindir Dayanımları Karşıtları

Küp MPa	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105
Silindir MPa	12	20	28	36	44	54	64	74	84	94

Laboratuvarda ölçülen basınç dayanımı ile yerinde ölçülen basınç dayanımı arasındaki fark çeşitli kodlar tarafından değişik şekillerde göz önüne alınmış, incelenmiş ve hesaplara dahil edilmiştir. Yetersiz pekiştirme ve yetersiz kür rejimi gibi çeşitli nedenlerden dolayı, YDB un yerindeki basınç dayanımı, laboratuvarda ölçülmüş basınç dayanımından daha az olabilir. Bu iki basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi bulmak için şu denklemin kullanılması önerilmiştir [3]: [Yerinde Ölçülmüş Basınç Dayanımı/ Laboratuar Basınç Dayanımı = $(1 - f_{ck}/250)$]. Bu denklemde f_{ck} , 28 günlük silindir beton numunesinin karakteristik basınç dayanımıdır. Fakat bu denklem

labaratuvarda ölçülen basınç dayanımı 100 MPa olan beton için, yerinde 60 MPa lık bir dayanımı vermekle, durumu olduğundan çok daha kötü göstermiş olabilir.

3.2 Basınç Dayanımını Etkileyen Faktörler

3.2.1 Beton Basınç Dayanımında Kürün Etkisi

Tam hidratasyon için gerekli olan serbest suyun sınırlı olmasından dolayı, aynı kür koşullarının uygulandığı betonlarda 28 günün sonunda ölçülen beton basınç dayanımının artışı genellikle YDB için NDB a göre daha düşük bulunmuştur [3].

Yakın zamanda yapılmış bir araştırmada, normal hava şartlarında kür edilmiş ve Silica Fume içeren YDB un 91 günlük basınç dayanımı 2 yıllık basınç dayanımından daha fazla bulunmuştur [3]. Bunun yanı sıra, 10 yıllık süre ile aynı şekilde kür edilmiş başka bir numune setinde ise, basınç dayanımının zamanla azalmadığı rapor edilmiştir [11]. Yeterli hidratasyon oranına ulaşmadan önce kesilen kür rejiminin YDB un basınç dayanımını, NDB a göre daha fazla etkilediği görülmüştür [7]. Bu sonuç iyi bir kür rejiminin YDB için çok daha fazla önemli olduğunu gösterir.

YDB da basınç dayanımının zamanla artması Silica Fume içeriğine de bağlıdır [11]. Eğer beton karışımına Silica Fume eklenir ve iyi bir kür rejimi uygulanırsa, betonun 3 ile 28 gün arasında erken dayanım kazanması hızlandırılabilir.

3.2.2 Beton Basınç Dayanımında Yüksek Isının Etkisi

Beton basınç dayanımında yüksek ısının etkisi konusunda çok az şey bilinmektedir.

Bu konuda Diederichs tarafından yapılan bir araştırma FIP/CEB State-of-the-Art Report da [3] verilmiştir. Diederichs, Fly Ash ve Portland Çimentodan ($f_c' = 91.8$ MPa) yapılmış YDB numunesi ile Normal Portland çimentodan ($f_c' = 32.9$ MPa) yapılmış beton numunelerini deneylerinde kullanmıştır. YDB 150°C de %30 gibi bir basınç dayanım düşmesi gösterirken, NDB 350°C ye kadar basınç dayanımını korumuştur. 100 ile 350°C arasında YDB un basınç dayanımında, NDB a nazaran daha büyük bir düşüş görülmüştür (Şekil 6, Şekil 7). YDB da çimento şerbeti daha büyük yükler taşıdığından, çimento şerbetinin ısı ile tahrip olması, NDB a oranla YDB un taşıma kapasitesinde oldukça büyük bir düşüşe sebep olur.

Bunun yanı sıra, Fly Ash kullanılmadan sadece süper akışkanlaştırıcı kullanarak, elde edilmiş YDB un basınç dayanımının dış ısıya tepkisi, süper akışkanlaştırıcı kullanılmadan sadece Fly Ash kullanılarak yapılan YDB un tepkisinden daha değişiktir. Castillo ve Durrani [12] Fly Ash kullanmadan ASTM Tip F süper akışkanlaştırıcı kullanarak elde ettikleri, basınç dayanımı 31.1 MPa ile 89 MPa arasında değişen YDB un, 100°C ile 200°C ısı aralığında, basınç dayanımının %6-10 a varan düşüşler gösterdiğini söylemişlerdir. 200°C civarında YDB un basınç dayanımının toparlanma göstererek %8 ile %13 oranında daha büyük basınç dayanımına ulaşmıştır [12]. Aynı

raporda YDB numunelerinin basınç altındaki kırılma tipinin 200°C ye kadar gevrek kırılma olduğu; 300°C civarında patlayarak kırılma olduğu ve 300°C ile 800°C arasında ise çok düşük bir yük taşıma kapasitesi ile büyük deformasyonlar gösterdiği rapor edilmiştir.

Görülüyorki, YDB un ölçülen basınç dayanımının ısıya olan tepkisi, NDB un tepkisinden daha farklıdır. Ayrıca, YDB un ısıya karşı tepkisinin içinde kullanılan malzeme kombinasyonlarına bağımlı olarak değiştiği gözlenmiştir.

3.2.3 Beton Basınç Dayanımında Yükleme Hızının Etkisi

Şimdiye kadar yapılan araştırmalardan NDB un basınç dayanımının yükleme hızına bağlı olduğu gözlenmiştir. Yüksek deformasyon hızlarında yüksek f_c' değerleri ölçülürken, düşük deformasyon hızları için bunun tersi geçerlidir. YDB un değişik deformasyon hızlarında gösterdiği davranış hakkında çok sınırlı bilgi olmasına rağmen, NDB un davranışına benzer bir eğilim gözlenmiştir. YDB daki yüksek deformasyon hızlarında ölçülen basınç dayanımı artışı NDB dakine oranla daha azdır. YDB değişik yükleme hızlarından, NDB a oranla daha az etkilenmektedir [6].

Basınç kırılma yükü uzun süreli yüksek yoğunluklu yüklemede daha düşük olabilir. Basınç dayanımının %70 ile %75'i civarında olan uzun süreli yüklemeler, zamanla, NDB un kırılmasına yol açar. Ngab [8] YDB un basınç dayanımının %95'ine kadar varan uzun süreli yüklemelerin kırılmaya sebep olmadığını yazmıştır. Bu YDB elemanların uzun süreli ve aşırı yüklemeler altında kırılmaya karşı güvenlik sınırının NDB a oranla daha fazla olabileceğini gösterir.

3.3 Gerilme-Deformasyon Davranışı

Betonarme elemanların eksenel yük ve/veya eğilme altındaki taşıma kapasitesi hesabı betonun kullanılan gerilme-deformasyon ilişkisine bağımlıdır. Genel olarak kullanılan Hognestad Eğrisi [13] NDB ların gerilme-deformasyon ilişkisi için geçerlidir. Sargılanmamış YDB un tipik gerilme-deformasyon ilişkisi NDB unkinden çok farklıdır [1,3,10,14,15]. Bu farklar şöyle sıranabilir: basınç dayanımının %60-90'ına kadar lineer davranış; maksimum basınçta daha büyük deformasyon; maksimum basınçtan sonra daha dik inen bir eğri; ve azalan maksimum deformasyon kapasitesi. Basınç dayanımı 66 MPa dan fazla olan YDB un basınç altındaki davranışı yaklaşık olarak doğrusal elastik ve gevrek denebilir [10]. Basınç dayanımı arttıkça, gerilme-deformasyon eğrisinin iniş kısmı daha da dikleşir. ACI 318 tarafından $\epsilon_{cu}=0.003$ olarak verilen kullanılabilir basınç deformasyon limiti, her ne kadar YDB için güvenlik limitine çok yakın isede, YDB ve NDB larda gözlenen deneysel sonuçları temsil edebilir [1]. Kullanılabilir basınç deformasyon limiti ACI 318-89 [29] tarafından $\epsilon_{cu}=0.003$ olarak verilirken, bazı değişik raporlar [3,14], $\epsilon_{cu}=0.0025$ gibi daha düşük bir limitin, basınç deformasyon limiti olarak daha uygun olacağını belirtmektedirler. FIP/CEB Report [3], CEB Model Code-90 ın değişik basınç dayanımlı betonlar için değişik

kullanılabilir deformasyon değerleri verdiğini ve bu değerin $f_{ct}'=80$ MPa beton için $\epsilon_{cu}=0.0022$ değerine kadar düşebileceğini belirtiyor. Bunu yanı sıra YDB un idealize edilmiş gerilme-deformasyon eğrilerinde maksimum deformasyonun $\epsilon_{cu}=0.0035$ 'e varan değerlere çıktığı gözlenmiştir [16].

Detaylı gerilme-deformasyon eğrileri, Norveç Kodu [3] ve Shah [5] tarafından önerilmiştir. Şekil 8, YDB için Shah [5] tarafından önerilen gerilme-deformasyon eğrileri ile Hognestad eğrisinin mukayesesini göstermektedir.

3.4 Aderans ve Ankraj

Bugün elimizde YDB un aderans ve ankraj tepkilerini tahmin etmeye yarayacak denklemleri türetebilmek için çok az bilgi vardır. Genellikle NDB için türetilen denklemler, YDB içinde kullanılmaktadır. ACI 318-89 Yapı Kodunda YDB içindeki donatı çubuklarının gerekli ankraj uzunluklarını hesaplamak için verilmiş bir prosedür yoktur. Ehsani [17] bir YDB çerçevenin mafsallık bölgesindeki donatı ankraj uzunluğunu hesaplamaya yarayacak bir ifadeyi yakın zamanda yazdığı bir raporunda vermektedir.

3.5 Çekme Direnci

Beton basınca karşı oldukça dirençli fakat çekmeye karşı çok zayıf (basınç dayanımının 1/20 ile 1/10'u kadar) olan bir inşaat malzemesidir. Bundan dolayı beton elemanların taşıyabilecekleri eğilme yükleri hesaplanırken, betonun çekme direnci hesaba katılmaz. Fakat betonun deformasyon hesapları için, ve çekme çeliğinin ani bir eleman çatlamasında kopmasını önlemek için kullanılacak olan minimum boyuna çekme donatısının hesaplarında, betonun çekme direncini bilmek çok önemlidir. Betonun çekme direnci direk çekme testi, split silindir testi ve kopma modülü testi ile bulunabilir.

FIP/CEB Report [3]da Norveç Standardına göre, betonun çekme direncinin, split silindir direncinden hesaplanabileceğini ve direk çekme direncinin, split silindir direncinin yaklaşık 2/3'ü olarak alınabileceği belirtilmiştir.

Kür koşulları YDB elemanların çekme dayanımlarında, NDB a göre daha önemli bir etki gösterir. Bundan dolayı bazı araştırmacılar [10] ACI 318-89 Yapı Kodunda NDB için verilen kopma modülü denkleminin $[f_t' = 0.7\sqrt{f_c'}](\text{MPa})$ hiç değiştirilmeden YDB içinde kullanılmasını savunmuşlardır. Aitcin [7], 90 MPa beton üzerinde yaptığı deneylere dayanarak kopma modülünün $[f_t' = 1.15\sqrt{f_c'}](\text{MPa})$ denklemi ile hesaplanabileceğini önermiştir. Carrasquillo [6] ise basınç dayanımları 21 MPa ile 83 MPa arasında değişen betonlar için kopma modülünün daha düşük bir değer alabileceğini ve $[f_t' = 0.94\sqrt{f_c'}](\text{MPa})$ denkleminin kullanılabileceğini söylemiştir.

Görülüyorki, YDB için önerilen kopma modülü değerleri $0.7\sqrt{f_c}$ MPa ile $1.15\sqrt{f_c}$ MPa arasında değişmektedir. ACI 318-89 Yapı Kodu kopma modülü denklemi önerilenler arasında en düşük değeri verir.

4. YAPI ELEMENLARININ DAVRANIŞI

4.1 Eğilme Etkisi Altında Davranış

YDB yapı elemanlarının eğilme etkisi altındaki davranışlarının genelde kullanılan eğilme formülleriyle anlatılabilirliği hakkında bazı şüpheler vardır. Bu, temelde YDB ile NDB nun gerilme-deformasyon özelliklerinin farklılığından kaynaklanır. Araştırmacılar ACI 318-89 Yapı Kodunun önerdiği dikdörtgen basınç bloğunun YDB a uygunluğu konusuna özel ilgi göstermişlerdir.

Aşağıda literatürde geçen bazı basınç blokları verilmektedir.

Dikdörtgen Basınç Bloğu (Whitney's Equivalent Stress Block) [2] : ACI Yapı Kodu gerçek gerilme-deformasyon dağılımını, $0.85 f_c$ kadarlık homojen bir gerilmenin kesitin belirli bir bölgesine uygulanmasıyla idealize eder. Bu bölge, yanlarda kesit sınırları ile nötral eksene paralel çizilen, maksimum basıncın olduğu kenardan $\beta_1 c$ uzaklıktaki çizgi arasında kalır. Değişik beton dayanımlarının etkisi β_1 in değişimiyle hesaplara dahil edilir. Basınç dayanımı $f_c' = 30$ MPa a kadar olan betonlar için $\beta_1 = 0.85$; $f_c' = 30$ MPa dan sonra her 1 MPa lık artış için 0.008 lik bir düşmeyle $[\beta_1 = 0.85 - (f_c' - 30) \times 0.008]$ (MPa) olarak alınır. Ancak β_1 hiç bir zaman 0.65 den küçük alınamaz. Maksimum kullanılabilir beton deformasyon limiti $\epsilon_{cu} = 0.003$ tür.

Trapezoid Basınç Bloğu [18] : Basınç dayanımı, f_c' arttıkça beton daha gevrek bir kırılma gösterir ve plastik deformasyon yapabilme özelliğini kaybeder. Zia [18] betonun plastisite oranı β yı kullanarak trapezoid bir basınç eğrisi ve eşdeğer bir basınç bloğu tanımlamıştır. Maksimum deformasyon $\epsilon_{cu} = 0.003$ dür.

Üçgen Basınç Bloğu [19] : Nötral ekseninde sıfır gerilme ve maksimum basıncın olduğu kenarda $f = E_c \epsilon_{cu}$ kadarlık bir gerilmeyle tarif edilir. Shin [19] üçgen basınç bloğu için $\epsilon_{cu} = 0.003$ ve $E_c = 4700\sqrt{f_c'}$ değerlerini önermektedir.

Kare kesitli, az donatılı kirişlerin eğilme etkisindeki maksimum mukavemetleri genelde çekme donatısının özelliklerine bağlıdır. Bundan dolayı, değişik ve geliştirilmiş basınç bloklarının eğilme mukavemetinin hesaplanmasında oldukça az bir etkisi vardır [20]. Gerilme-deformasyon özelliklerinin farklılığından ötürü betondaki kuvvet bileşkesinin yeri ve büyüklüğünün farklılığına rağmen ACI 318-89 Yapı Kodunun önerdiği dikdörtgen basınç bloğu YDB için yaygın şekilde kullanılmaktadır.

ACI 318-89 Yapı Kodu NDB elemanlarda minimum çekme çeliği oranını $[\rho_{\min} = 1.4/f_y](\text{MPa})$ olarak vermektedir. YDB kirişlerde ise elemanın, çekme çeliğinin kopmasından dolayı taşıma kapasitesine ulaşmadan gevrek bir şekilde kırılmaması için daha fazla çekme çeliğine ihtiyaç vardır. Minimum çekme çeliği oranı; çatlamış kesitin $f_t = 2f_y/3$ kadarlık bir çelik gerilmesiyle taşıyacağı momentin aynı kesiti çatlatmak için gerekli olan momente eşit olması gerektiği düşüncesiyle hesaplanır [1]. Bu hesapta betonun taşıyacağı maksimum çekme gerilmesi, kopma modülüne (f_c') dayanılarak bulunur. Betonun basınç dayanımı (f_c') arttıkça bununla orantılı olarak kopma modülünde artmaktadır. Dolayısıyla yukarıda bahsedilen hesap yönteminde beton basınç dayanımının etkisi minimum çekme çeliği oranı hesabına aksettirilmelidir. Buna dayanarak $[\rho_{\min} = (0.225\sqrt{f_c'})/f_y](\text{MPa})$ formülü önerilmektedir [1]. Bunun yanı sıra Nilson [21] daha büyük bir oranın gerektiğini söylemiş ve şu formülü vermiştir; $[\rho_{\min} = (0.250\sqrt{f_c'})/f_y](\text{MPa})$.

4.2 Kolonlar

Akma mukavemeti normal seviyede olan ($f_y \approx 400 \text{ MPa}$) inşaat çeliği ile NDB dan yapılan betonarme elemanlarda beton maksimum taşıma kapasitesine ulaştığı zaman çelik de yaklaşık olarak akma deformasyonuna ulaşır. Normal inşaat çeliği ile yapılan YDB elemanlarda ise boyuna donatılar betonun maksimum taşıma kapasitesine ulaşmadan çok önce akma deformasyonuna ulaşırlar. Bununla beraber ACI 318-89 Yapı Kodunun verdiği $[P = 0.85f_c' A_c + f_y A_s]$ denklemin YDB elemanlar için de geçerliliğini destekleyen araştırmalar vardır. Eksenel basınç altındaki NDB elemanların burkulma ve narinlik hesaplarında kullanılan metodların, aynı şekilde, YDB elemanlar içinde kullanılabileceği ayrıca düşünülmektedir [1].

4.3 Sargılamanın Eleman Davranışına Etkisi

Betonarme elemanlar normal taşıma kapasitelerinin ötesinde yüklendikleri zaman (pas payı olarak bırakılan beton, ya elemandan ayrıldığı yada düştüğü zaman) sargılamanın etkisi oldukça belirgin bir şekilde ortaya çıkar. Sargılamanın faydası temelde elemanın taşıdığı maksimum yükü sabit veya sabite yakın bir değerde tutmaktır. İyi desteklenmiş boyuna donatı, birleştirilmiş elemanlar veya enine donatı kullanımı ile elde edilen sargılama, maksimum deformasyon limitinin ($\epsilon_{cu} = 0.003$), elemanın yük taşıma kabiliyeti korunurken daha büyük değerlere ulaşmasını sağlar.

Betonarme elemanlardaki enine donatının faydaları şöyle sıralanabilir : 1-Basınç altındaki betonun sargılanması, dolayısıyla maksimum yük ve deformasyon limitlerinin artırılması; 2-Boyuna çeliğin sabitleştirilmesiyle sargılamaya katkıda bulundurulması; 3-Kesme etkisi altında kayma donatısı olarak çalışması; ve 4-Boyuna donatının burkulmasını önlemesi veya geciktirmesi.

Eksenel yük veya eğilmeden dolayı basınç etkisi altında olan elemanlar veya eleman bölgelerindeki pas paylarının dökülmesinden dolayı eleman taşıma kapasitesinde düşmeler olabilir.

Bundan dolayı yapı kodları kolonların gevrek kırılmalarını önleyerek pas payının dökülmesiyle kaybedilen mukavemetin tekrar kazanılmasını sargılama ile yapmaya çalışmaktadırlar.

Hali hazırda literatürde sargılamanın mukavemet ve süneklik üzerindeki etkilerini hesaplayan sargılama modelleri vardır [22,23]. Bu modeller NDB elemanlar için geliştirildiklerinden YDB elemanlara uygulanabilirlikleri konusunda belirsizlikler vardır.

Spiral etriyeli kolonlardaki sargılama etkisinin hesabı için ACI-363 Committee Report [1] $[f_c'' = f_c + 4.0f_2'(1-s/d_c)]$ denklemini önermektedir. Burada f_c'' = sargılanmış spiral etriyeli betonun basınç dayanımı, f_c = etriyesiz kolonun basınç dayanımı, f_2' = spiral etriyenin oluşturacağı sargılama basıncı, s = spiral ayağı, d_c = sargılanmış betonun çapıdır. Martinez [15] basınç dayanımı 59 MPa'a kadar olan spiral etriyeli kolonlar için yukarıda verilene benzer bir bağıntı önermektedir.

Eksenel yüklü kolonların aşırı yüklemeler altında şekil değiştirebilme kabiliyetleri incelendiğinde bunun sargılamanın etki seviyesine bağlı olduğu görülmektedir. Ancak sargılamanın etkisi bütün beton dayanımları için aynı oranda değildir. Aynı spiral etriye miktarı YDB elemanlarda NDB elemanlardakinden daha az sargılama etkisi gösterir. Şekil 9 da değişik beton dayanım seviyelerinde sargılama basıncının eksenel deformasyon miktarı üzerindeki etkisi Martinez'in [15] deney sonuçlarından alıntı yapılarak gösterilmiştir.

4.4 Kesme Etkisi Altında Davranış

ACI 318-89 Yapı Kodundaki eğilme ve kesme yükleri altında olan elemanların kesme mukavemetlerinin hesabı için kullanılan denklemlerin genelde güvenli tarafta sonuçlar verdiği bilinmektedir. Buna rağmen $41 \text{ MPa} \leq f_c' \leq 83 \text{ MPa}$ aralığında, Nilson [10] yaptığı deneylere dayanarak yukarıda bahsedilen hesap şekillerinin güvensiz tarafta sonuçlar verdiğini açıklamıştır. Özellikle büyük kesme açıklığı ve düşük çekme donatısı oranlarında bu durum daha belirginleşir. Kiriş deneylerinde, etriyenin taşıdığı kesme kuvveti miktarının (V_e) normal hesap metodlarıyla bulunandan daha fazla olduğu açıklanmıştır. Bu betonun taşıyabildiği kesme yükünün hesaplanan değerden daha az olmasından dolayı olabilir.

Buna karşılık $21 \text{ MPa} \leq f_c' \leq 83 \text{ MPa}$ basınç dayanımı aralığında 12 adet kesme donatılı YDB kiriş üzerinde yaptığı deneylerin sonuçlarını açıklayan Mphonde [24], ACI Yapı Kodunun kesme mukavemeti ile ilgili denklemlerinin güvenli tarafta olduğunu belirtmiştir.

Beton basınç mukavemetinin elemanların kesme mukavemetleri üzerindeki etkisi, elemanın kesme açıklığının eleman derinliğine oranı azaldıkça, daha önemli olur. Kısa kirişlerde, kesme açıklığının eleman derinliğine oranının (a/d) 1.5 olduğu ve $20 \text{ MPa} \leq f_c' \leq 103 \text{ MPa}$ beton kullanıldığı durumlarda ACI Yapı Kodu derin kirişler için olan hesap denklemlerinin gerçek kesme mukavemetinden çok daha düşük değerler verdiği açıklanmıştır [25]. Bununla beraber maksimum kesme mukavemetinin artan çekme donatısı miktarıyla arttığı da gözlenmiştir [26].

Basınç mukavemetinin $f_c' = 54$ MPa dan $f_c' = 78$ MPa'a değişmesiyle elemanın kesme mukavemetinde belirgin bir artış; buna karşılık basınç mukavemetinin $f_c' = 98$ MPa'a yükselmesiyle de belirgin bir düşüş rapor edilmiştir [26]. Bu NDB ile YDB nun kırılma şekillerinin farklılığından kaynaklanıyor olabilir. NDB da kırılma, çimento şerbetinden olurken, YDB da çimento şerbetinin çok güçlü olması dolayısıyla kırılma yüzeyi agreganın içinden geçmektedir.

Norveç Yapı Kodunda kesme mukavemeti hesaplarında kullanılabilecek maksimum beton basınç dayanımı $f_c' = 74$ MPa ile sınırlandırılmıştır [3]. Bu limit ACI 318-89 Yapı Kodunda [2] ise $f_c' = 69$ MPa olarak verilmektedir. FIP/CEB raporunda da normal ağırlıklı betondan yapılmış elemanlarda beton basınç dayanımının $f_c' = 80$ MPa dan büyük değerlere çıkmasının kesme mukavemetinin düşmesine sebep olabileceği söylenmektedir [3].

4.5 Zımbalama Etkisi Altında Davranış

Betonarme elemanlarda zımbalama etkisi ile ilgili çalışmalar beton basınç dayanımının 20 MPa ile 40 MPa arasında değiştiği bölgede yapılmıştır. YDB elemanlar için güvenilir ampirik formüllerin oluşturulmasına yarayacak yeterli sayıda test bulunmamaktadır. Artan beton basınç dayanımıyla ters orantılı olarak test sonuçlarının hesabelenen değerlere oranı azalmaktadır. Kirişlerdeki kesme deneylerine dayanarak Norveç Yapı Kodu [3] YDB elemanlardaki zımbalama mukavemetinin $f_c' = 74$ MPa dan sonra artmıyacağı limitini koymuştur.

4.6 Mafsallı Kayması

Çerçeveedeki mafsalların ana görevi yapı elemanlarının birarada tutulmasıdır. ACI-ASCE Committee 352 [27] raporuna göre deprem yükü altında bir mafsallı taşıyabileceği güvenli kesme gerilmesi $\gamma \sqrt{f_c'}$ şeklinde ifade edilir. Burada γ , mafsallı kayma gerilmesi faktörü, yüklemenin şiddeti ve mafsallı tipine (köşe mafsallı vs.) göre değişmektedir. Mafsallı kayması hesabında ACI Yapı Kodunda genel yaklaşımlar haricinde maksimum basınç dayanımı f_c' için herhangi bir sınırlama bulunmamaktadır.

Ehsani [17] $f_c' = 66$ MPa ile yapılan kolon kiriş birleşimlerinde deprem yükünün etkisini araştırmak için yaptığı alternatif yükler altındaki deneyden γ nın NDB için alınan değerden %13 oranında daha küçük olması gerektiğini söylemiştir.

4.7 YDB Elemanlarda Süneklik

YDB ile NDB un kırılma mekanizmalarının farklılığı şimdi kullanılan ve betonarme elemanların değişik yükler altında sünek davranış göstermelerini sağlayan dizayn prosedürlerinin değişmesine sebep olabilir. NDB larda gerilme-deformasyon eğrileri f_c' nin maksimum değerine ulaştıktan sonra makul miktarlarda plastik deformasyon yaparlar, buna mukabil YDB daki plastik deformasyon oldukça azdır. Basınç dayanımının 80 MPa dan büyük olduğu hallerde gerilme-

deformasyon eğrisinin en yüksek noktasından sonraki eğimi o kadar fazladır ki, testler sırasında beton maksimum taşıma kapasitesine ulaştıktan hemen sonra parçalanarak kırılır. Bu farklılıklar YDB elemanlarda sünekliğin incelenmesi gerektiğini gösterir.

İyi boyutlandırılmış ve detaylandırılmış betonarme elemanlar beton ve inşaat çeliğinin uygun şekilde birleştirilmesiyle oldukça sünek bir davranış gösterebilirler. Sünek eleman davranışlarının konu edildiği testlerdeki başlıca değişkenler; çelik ve betonun gerilme-deformasyon özellikleri, beton basınç dayanımı, çekme çeliğinin miktarı, basınç çeliğinin miktarı, etriye aralığı, etriye tipi, etriye çeliğinin akma mukavemeti ve yükleme tipi olarak sıralanabilir.

Collins ve Mitchell [28] eksenel yük, kesme yükü, eğilme, öngerilmeli beton elemanlarda öngerilme miktarı gibi yükleme tiplerinin elemanın sünekliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Aynı referansda verilen bilgisayar programı RESPONSE yukarıda bahsedilen yükler altındaki elemanların dizayn ve analizinde oldukça güçlüdür.

Gerekli miktardaki çekme, basınç ve etriye donatılarının iyi detaylandırılması, uygun şekilde yerleştirilmesi ve basınç çubuklarının burkulmalarının önlenmesi sünek bir davranış elde etmek için gerekli olan önemli noktalar. Şekil 10 da Leslie [29], Shin [19] ve Uzumeri [30,31] nin test sonuçları verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi çekme donatısı miktarının artması eleman sünekliğini azaltan bir etki göstermektedir.

Çekme donatısının miktarıyla beraber, basınç donatısının miktarı ve etriyelerin akma mukavemetleri de eleman davranışını değiştiren etkenlerdir. Muguruma YDB ile normal ($f_y=328$ MPa) ve yüksek ($f_y=792$ MPa) akma mukavemetli etriye çeliklerini kullanmış ve sonuçlarını karşılaştırmıştır. Yüksek akma mukavemetli etriye çeliği kullanıldığında $f'_c=85.7$ MPa ve $f'_c=115.8$ MPa gibi yüksek beton dayanımları seviyelerinde oldukça büyük sünekliklerin elde edildiğini açıklamıştır [32]. Eleman sünekliği ile ilgili yapılan test sonuçları incelendiğinde, beton basınç dayanımı arttıkça, etriyelerin, sünekliği artırıcı etkilerinin azaldığı görülmüştür. Ancak YDB elemanlarda yüksek akma mukavemetli etriye çeliğinin kullanılması elemanın eğilme etkisi altındaki sünekliğini oldukça artırır, hatta eksenel yük altındaki elemanlarda da aynı süneklik artışı gözlemlenebilir. Bu tip etriye çeliğinin kullanıldığı durumlarda NDB için kullanılan ankraj tipi ve uzunluklarının yeterli olmadığı [33], eleman maksimum taşıma kapasitesine ulaşmadan önce etriyelerin ankrajlarından sıyrılarak daha düşük yüklerde elemanın kırılmasına sebep olduğu dolayısıyla ya kaynakla birleştirilmiş ya da daha iyi ankrajlanmış etriyelerin kullanılması gerektiği yapılan bir araştırma ile gösterilmiştir. Yakın sıralanmış etriyelerin bir başka faydası da basınç çeliğinin burkulmasını önlemek ve betonun sargılanmasıyla taşıma kapasitesinin artırılmasını sağlamaktır [31]. Betonarme elemanlarda iyi desteklenmiş basınç çeliği eğilme yüklemesi altında pas payının dökülmesinden sonra belirgin bir basınç yükü taşıyarak elemanın sünekliğini artırır.

Betonarme elemanların sünek davranması, çekme çeliğinin akmasından sonra yük taşıma kapasitesinde aşırı bir düşüş olmadan büyük deformasyonlar yapabilmesi için gereklidir.

Elemandaki yük taşıma kapasitesi, maksimum değerine ulaştıktan sonra ani düşüşler göstermemeli ve yavaş yavaş azalmalıdır. İncelenen deney sonuçlarından çekme donatısı miktarının sünek davranışların incelenmesinde iyi bir gösterge olduğu görülmüştür (Şekil 10). Büyük eksenel yük taşıyan elemanlardaki süneklilik, daha az eksenel yük taşıyanlara oranla daha azdır. Artan beton basınç dayanımı sargılama çeliğinin etkisini olumsuz yönde etkilemektedir.

4.8 Elastik ve Zamana Bağlı Deformasyonlar

Betonarme elemanların elastik deformasyonlarının hesabında kullanılan başlıca değişkenler:

1- elastisite modülü, E_c ; 2-kopma modülü, f_t ; 3-etkin atalet momenti, I_e olarak sıralanabilir. Bu değişkenlerin hepsi beton basınç dayanımıyla doğrudan ilgilidir ve birçok yapı kodu bunların hesaplanmasında değişik beton dayanımlarının etkisini dikkate almamaktadır.

Çatlamış elemanlardaki deformasyonlar ACI 318-89 [2] Yapı Kodunun verdiği şekilde etkin bir atalet momentinin hesaplanmasıyla bulunabilir. Bu metod elastisite modülü ve kopma modüllerinin sağlıklı bir şekilde belirlenmesi ile doğrudan ilgilidir. Elastisite ve kopma modüllerini beton basınç dayanımına bağlı oldukları gibi kopma modülü kür şartlarından da oldukça çok etkilenmektedir. Dolayısıyla elastik ve zamana bağlı deformasyonların hesabı için önceki bölümlerde bahsedilen elastisite ve kopma modülleri dikkatli bir şekilde kullanılmalıdır.

YDB üzerinde yapılan deneyler beton basınç dayanımının artmasıyla birlikte zamana bağlı deformasyonlarında azaldığını ortaya koymuştur [10]. Şu an kullanılmakta olan ACI 318-89 Yapı Kodu zamana bağlı deformasyonların hesabında beton basınç dayanımının etkisini dikkate almadan hesap yapma yoluna gitmektedir. Dolayısıyla bu yöntemle bulunan sonuçlar YDB elemanlarda gerçek değerlerden daha büyüktürler. FIP/CEB raporunda [3], CEB MC-90 ve İsviçre Yapı Kodlarında kullanılan NDB ve YDB için elastik ve zamana bağlı deformasyon hesap şekilleri özet olarak verilmektedir.

5. SONUÇ

YDB un kullanımında son yıllarda oldukça önemli gelişmeler olmuştur. Kuzey Amerikada ve dünyanın birçok yerinde çok katlı binaların kolonlarında, köprülerde ve açık deniz petrol platformlarında YDB un kullanımı, üniversitelerin ve araştırma şirketlerinin laboratuvarlarında birçok araştırmanın yapılmasına, ve YDB üzerine olan yayınların artmasına sebep olmuştur. Bu çalışma da, konu ile ilgili yayınlar ve konferans tebliğleri incelenerek oluşturulmuştur. Önceleri araştırmaların çoğunluğu YDB un üretilmesi ve malzeme özellikleriyle ilgiliyken sonraları YDB elemanlarının davranışlarıyla ilgili araştırmalar ve yayınlarda artış gözlenmiştir. Bu araştırma ve yayınları, bazı yapı kodlarındaki ilgili bölümlerin gözden geçirilerek yeniden düzenlenmesi

izlemiştir. Burada yapılan çalışmanın amacı YDB un kullanımıyla ilgili son gelişmeleri ve konuyla ilgili referansları mühendislerin dikkatine sunmaktır.

Betonun yeni bir yapı malzemesi olmamasına karşın "Yüksek Dayanımlı Betonun" özelliği, istenilen yüksek basınç dayanımına ulaşmak için en iyi kalite agrega ve katkı maddelerinin belirli oranlar dahilinde birleştirilmesi, kalıplara yerleştirilmesi ve dikkatli bir kür rejiminin uygulanması gerekliliğinden kaynaklanır. Kullanılan her madde ve yapılan her iş sonuçta basınç dayanımı üzerinde belirli bir etki yapar. Dolayısıyla sadece çok iyi kalite malzemenin biraraya getirilmesi sonuçta yüksek dayanımlı bir betonun elde edilmesine yetmez. Kullanılan malzeme ne kadar iyi olursa olsun, iyi bir işçilik ve üretim kontrolü, iyi boyutlandırma ve detaylandırma yapılmadığı sürece YDB kullanımı için harcanan para boşa harcanmış olur. Gerçekte, dizayn ve detaylandırma YDB dikkate alınarak yapılmış ancak yetersiz üretim kontrolü sonucu şantiye şartlarında YDB basınç dayanımına ulaşamamışsa bu durum hiç YDB kullanılmamasından daha kötü sonuçlar doğurabilir. Eğer YDB kullanılacaksa, YDB ile yapılmış yapı elemanlarının değişik yüklemeler altındaki davranışları net olarak anlaşılmış olmalıdır. Herşeyden önemlisi üretim ve inşaat kalitesi kontrolünün YDB üzerindeki etkisi, hiç bir zaman unutulmamalıdır.

6. GEREKLİ ARAŞTIRMA KONULARI

YDB un binalarda, köprülerde ve petrol platformlarında kullanımı oldukça yenidir. Bu konuda yapı kodlarında ve standartlarda birçok boşluklar vardır. Aşağıda verilen liste ilk anda araştırma ve cevap gerektiren konuların kısa bir özetidir. Sıralama, konuların önem derecelerine göre yapılmamıştır. Ayrıca ortaya konulan araştırma alanları temelde yapı mühendisliğini ilgilendiren konulardır ve YDB un malzeme karakteristikleri ile ilgili konular listeye dahil edilmemişlerdir.

1. Çeliğin akma dayanımı: Değişik akma dayanımlarındaki inşaat çeliğinin YDB elemanlarda ekonomik ve etkili kullanımının incelenmesi gerekmektedir.
2. Sargılama: Donatı konfigürasyonunun (etkiye aralığı, şekli vs.) ve beton dayanımının sargılama üzerindeki etkisi araştırılmalıdır.
3. Kolonlarda zamana bağlı davranış: Sünme, rötne ve elastisite modülünün zamana bağlı azalmasının YDB elemanlardaki etkisi ile yüklerin donatı ve beton arasında zaman içerisinde nasıl paylaşıldığı bir başka cevap bekleyen konudur.
4. Kesme etkisi: Deney sonuçları artan beton dayanımının belirli bir seviyeden sonra kesme mukavemetini daha fazla arttırmadığını göstermiştir. Kesme yükünün beton ve etriyeler arasında paylaşılma şeklide NDB dakinden daha farklıdır. Bu farklılıklardan dolayı YDB elemanlarda hesap edilen kesme mukavemeti güvensiz tarafta sonuçlar verebilir.

5. Yüksek akma mukavemetli kesme donatısı: Eksenel yüklenmiş YDB elemanlarda yüksek akma mukavemetli kesme donatısı kullanılmasının eleman sünekliği bakımından faydalı olduğu rapor edilmiştir. Bunun araştırılması gerekir.
6. Ateşe dayanıklılık ve sıcaklık etkileri: Bu konuda çok sınırlı sayıda araştırma vardır. Yapılan deney sonuçları betonun sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisinin YDB üretiminde kullanılan maddelerle ilgili olduğunu göstermiştir, bu konu açıklığa kavuşturulmalıdır.
7. Laboratuvar da ölçülen basınç dayanımının, yerinde ölçülen basınç dayanımına oranı: Betonarme elemanların dizaynlarında sabit şekil ve boyutlardaki beton örneklerinin laboratuvar da kırılmaları ile elde edilen basınç dayanımları kullanılmaktadır. Eğer yapıların güvenlik kontrolleri ve davranışları, yerinde ölçülen basınç dayanımına dayanacaksa, basınç dayanımları arasındaki oran daha iyi bir şekilde verilebilmelidir.
8. Ani ve/veya alternatif yüklemeler altında davranış: Servis sürelerinde bu tip yüklemelere maruz kalabilen YDB dan imal edilmiş yapı ve yapı elemanlarının davranışları ve yorulma limitleri incelenmelidir.
9. Aderans ve kenetlenme: Şu anda NDB için kullanılmakta olan limitler YDB elemanlar için de incelenmelidir. Bu konuda mühendislerin faydalanabilecekleri bir kaynak bulunmamaktadır.
10. Çekme pekleşmesi "Tension stiffening" ve çok yönlü gerilmeler altında davranış: YDB elemanlar için geliştirilmiş analitik davranış modellerinin oluşturulması incelenmeli ve deneylerle desteklenmelidir.
11. Eğilme: YDB elemanların taşıyabilecekleri maksimum yük hesabı için kullanılan basınç blokları incelenmelidir.
12. Minimum çekme donatısı oranı: YDB daki çekme dayanımının NDB dan fazla olması sebebiyle elemanın çatlamasından hemen sonra çekme çubuklarının kopmasından ötürü elemanın kırılmasını önlemek için minimum çekme donatısı oranı tekrar incelenmelidir.
13. Maksimum çekme donatısı oranı: Yayınlanan deney sonuçlarından, aynı orandaki çekme donatısı için daha yüksek dayanımlı betondan yapılan elemanlarda daha düşük süneklik oranları görülmüştür. Bu sebepten değişik beton dayanımlarıyla çekme donatısı oranının sünek davranış üzerindeki etkisi önemlidir.

7. KAYNAKLAR

- [1] ACI Committee 363, "State-of-the-Art Report on High Strength Concrete", Journal of the American Concrete Institute, July-August 1984, NO.4 Proceedings, V.81, pp.364-411, 1984, Detroit
- [2] Building Code and Commentary, ACI 318M-89/318RM-89, Detroit, p.351
- [3] FIP/CEB Bulletin d'Information No. 197, "High Strength Concrete State-of-the-Art Report", FIP-London, August 1990, p.61

- [4] PARROTT,L.J., "A Literature Review of High Strength Concrete Properties", British Cement Association, Januar 1988, 87 pp.
- [5] AHMAD,Shuaib H.;SHAH,S.P., "High Strength Concrete - A Review",Utilization of High Strength Concrete,Preceedings,Symposium in Stavanger,Norway,June 15-18,1987,pp.255-268, Tapir
- [6] CARRASQUILLO,Ramon L.;NILSON,Arthur H.;SLATE,Floyd O., "Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads",American Concrete Institute Journal,ACI,May-June,1981,pp.171-178
- [7] AITCIN,Pierre-Claude;LAPLANTE,Pierre;BEDARD,Claude, "Development and Experimental Use of a 90 MPa (13,000 psi) Field Concrete",High Strength Concrete ACI SP-87, pp.51-70,1985,Detroit
- [8] NGAB,Ali S.;NILSON,Arthur H.;SLATE,Floyd O., "Shrinkage and Creep of High Strength Concrete",American Concrete Institute Journal,ACI,July-August,1981,pp.255-261
- [9] SMADI,Mohammed M.;SLATE,Floyd O.;NILSON,Arthur H., "Shrinkage and Creep of High-,Medium- ,and Low-Strength Concretes,Including Overloads",ACI Materials Journal, May-June,1987,pp.224-234
- [10] NILSON,Arthur H., "Design Implications of Current Research on High-Strength Concrete",High Strength Concrete ACI SP-87,American Concrete Institute,pp.85-118,1985,Detroit,U.S.A.
- [11] MAAGE,Magne;SMEPLASS,Sverre;JOHANSEN,Randulf, "Long Term Strength of High Strength Silica Fume Concrete",High Strength Concrete,Second International Symposium,ACI SP-121,pp.399-408, 1990,American Conrete Institute,Detroit,U.S.A.
- [12] CASTILLO,Carlos;DURRANI,A.J., "Effect of Transient High Temperature on High-Strength Concrete", ACI Materials Journal, V.87 No.1, January-February 1990
- [13] HOGNESTAD,E.;HANSON,N.W.;MCHENRY,D., "Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design",ACI Journal,Proceedings,Vol.52,No.12,December 1955,pp.455-479
- [14] SWARTZ,S.E.;NIKAEEN,A.;BABU,Narayan H.D.;PERIYAKARUPPAN,N.;REFAI,T.M.E., "Structural Bending Properties of Higher Strength Concrete",High Strength Concrete ACI SP-87,pp.147-178,1985,Detroit
- [15] MARTINEZ,Salvador;NILSON,Arthur H.;SLATE,Floyd O., "Spirally Reinforced High-Strength Concrete Institute Journal,ACI,September-October,1984,pp.431-442
- [16] NIELSEN,Knut Hj., "Ductility of Sections Designed in High Strength Concrete",Utilization of High Strength Concrete,Proceedings,Symposium in Stavanger, Norway,June 15-18,1987,pp.535-546,Tapir

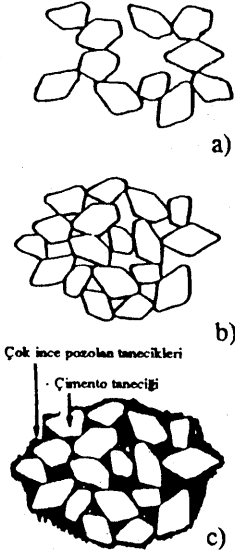
- [17] EHSANI,M.R.;MOUSSA,A.E.;VALLENILLA,C.R., "Comparison of Inelastic Behaviour of Reinforced Ordinary- and High-Strength Concrete Frames", *ACI Structural Journal* March-April, 1987, pp.161-169
- [18] ZIA,Paul, "Review of ACI Code for Design with High-Strength Concrete", *Concrete International*, ACI, August 1983 Vol.5 No.8, pp.16-20
- [19] SHIN,Sung-Woo;KAMARA,Mahmoud;GHOSH,S.K., "Flexural Ductility,Strength Prediction and Hysteretic Behaviour of Ultra-High-Strength Concrete Members", High Strength Concrete, Second International Symposium, ACI SP-121, pp.239-264, 1990, American Concrete Institute, Detroit, U.S.A.
- [20] THORENFELDT,E.;TOMASZEWICZ,A.;JENSEN,J.J., "Mechanical Properties of High-Strength Concrete an Application in Design", *Utilization of High Strength Concrete*, Proceedings Symposium in Stavanger, Norway, June 15-18, 1987, pp.149-159, Tapir
- [21] NILSON,Arthur H., "High-Strength Concrete - An Overviev of Cornell Research", *Utilization of High Strength Concrete*, Proceedings, Symposium in Stavanger, Norway, June 15-17, 1987, pp.27-38, Tapir
- [22] PARK,Robert;PRIESTLY,M.J.;GILL,Wayne D., "Ductility of Square-Confined Concrete Columns", *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, ASCE, Vol.108, No.ST4, April 1982, pp.929-950
- [23] SHEIKH,Shamim A.;UZUMERI,S.M., "Analytical Model For Concrete Confinement in Tied Columns", *Journal of the Structural Division*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ASCE, Vol.108, No.ST12, December, 1982
- [24] MPHONDE,Andrew G.;FRANTZ,Gregory C., "Shear Tests of High- and Low-Strength Concrete Beams with Stirrups", *High Strength Concrete* ACI SP-87, pp.179-196, 1985, Detroit
- [25] MPOHONDE,Andrew G.;FRANTZ,Gregory C., "Shear Tests of High- and Low-Strength Concrete Beams Without Stirrups", *Journal of the American Concrete Institute*, July-August 1984, No.4 Proceedings V.81, pp.350-357
- [26] THORENFELDT,Erik;DRANGSHOLT,Geir, "Shear Capacity of Reinforced High-Strength Concrete Beams", High Strength Concrete, Second International Symposium, ACI SP-121, pp.129-154, 1990, American Concrete Institute, Detroit, U.S.A.
- [27] ASCE-ACI Committee 352 Report, "Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures", *ACI Journal*, May-June 1985, pp.266,283
- [28] COLLINS,Michael P.;MITCHELL,Denis, "Prestressed Concrete Structures", Prentice-Hall Inc., 1991, Englewood Cliffs, N.J., U.S.A., 766 pp.
- [29] LESLIE,Keith E.;RAJAGOPALAN,K.S.; and EVERARD,Noel J., "Flexural Behaviour of High-Strength Concrete Beams", *ACI Journal*, September 1976, No.9 V.73, pp517-521

- [30] UZUMERİ,S.M.;BASSET,R., "Behaviour of High Strength Concrete Members",Utilization of High Strength Concrete,Proceedings,Symposium in Stavanger,Norway,June 15-18,1987, pp.237-248,Tapir
- [31] ÜZÜMERİ,Ş.M., "Yüksek Dayanımlı Beton Elemanların Yapısal Davranışı", Türkiye İnşaat Mühendisliği X. Teknik Kongre Bildiriler Kitabı, Milli Kütüphane 9-12 Ekim 1989, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara pp.503-518
- [32] MUGURUMA,H.;WATANABE,F., "Ductility Improvement of High-Strength Concrete Column with Lateral Confinement", High Strength Concrete, Second International Symposium, ACI SP-121,pp.47-60, 1990, American Concrete Institute, Detroit, U.S.A.
- [33]SUMI,Akira;SEGAWA,Teruo;HISATOKU,Toshiharu;MUGURUMA,Hiroshi,"Experimental Study of Reinforced Concrete Beams and Columns Laterally Confined by High Tensile Strength Shear Reinforcements", Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering, August 2-9,1988, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol.VIII, pp.629-634

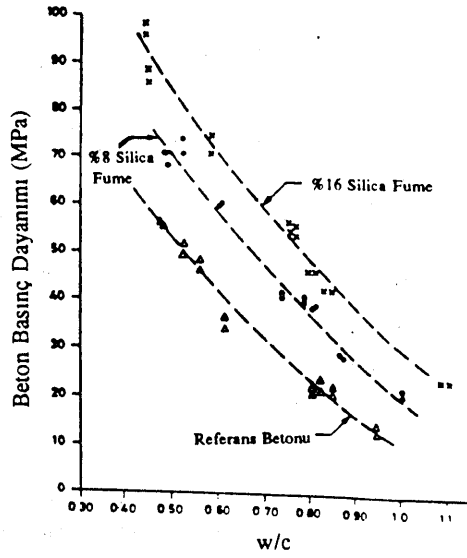
SEMBOLLER VE KISALTMALAR :

- ACI : American Concrete Institute; Box 19150, Redford Station, Detroit, Michigan U.S.A. 48219
- ASTM : American Society for Testing and Materials; 1916 Race Street, Philadelphia, P.A. 19103, U.S.A.
- BCA : British Cement Association; Wexham Springs, Slough SL3 6PL, U.K.
- CEB : Comité Euro-International du Béton; Case Postale 88, CH-1015 Lausanne, Switzerland
- FIP : Fédération Internationale de la Précontrainte; 11 Upper Belgrave Street, London, SW1X 8BH, U.K.
- NDB : Normal Dayanımlı Beton
- YDB : Yüksek Dayanımlı Beton
- f_c' : 28 günlük standart silindir (6x12 in.) beton numunesinin basınç dayanımı (*)
- f_{ck} : 28 günlük standart silindir (150x300 mm.) beton numunesinin karakteristik basınç dayanımı(*)
- f_r' : Kopma modülü
- f_y : Donatı çeliğinin akma mukavemeti
- f_s : Donatı çeliğindeki gerilme değeri
- ϵ_{cu} : Kullanılabilir basınç deformasyon limiti
- ϵ_0 : Maksimum gerilme seviyesindeki gerilme deformasyonu
- E_c : Betonun Elastisite Modülü
- w/c : su/çimento ağırlık oranı
- ρ_{min} : Minimum çekme çeliği oranı
- ρ : Betonun öz ağırlığı
- ν : Poisson oranı

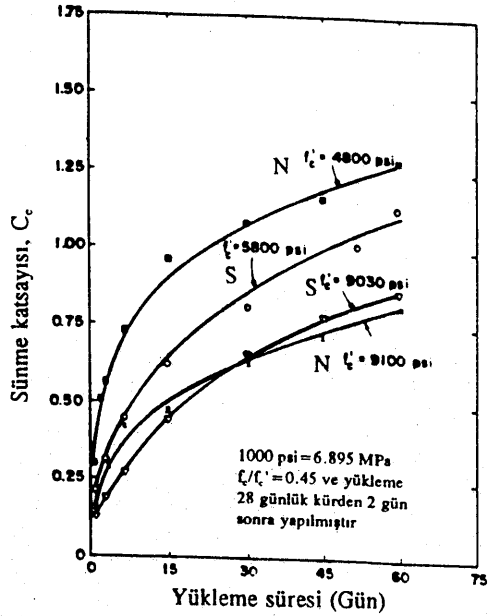
(*) f_c' ve f_{ck} değerleri birbirlerine çok yakındır, aralarındaki fark yönetmeliklerin deney sonuçlarını istatistiki olarak değerlendirmelerindeki küçük farklardan doğmaktadır.



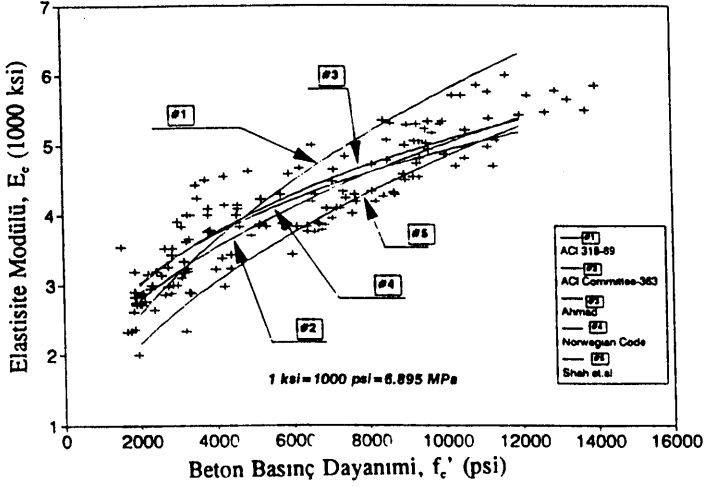
Şekil 1. Taze beton içindeki çimento taneciklerinin konfigürasyonu: a) Portland Çimentosu b) Portland çimentosu + süperakışkanlaştırıcı c) Portland Çimentosu + Silica Fume + süperakışkanlaştırıcı [3]



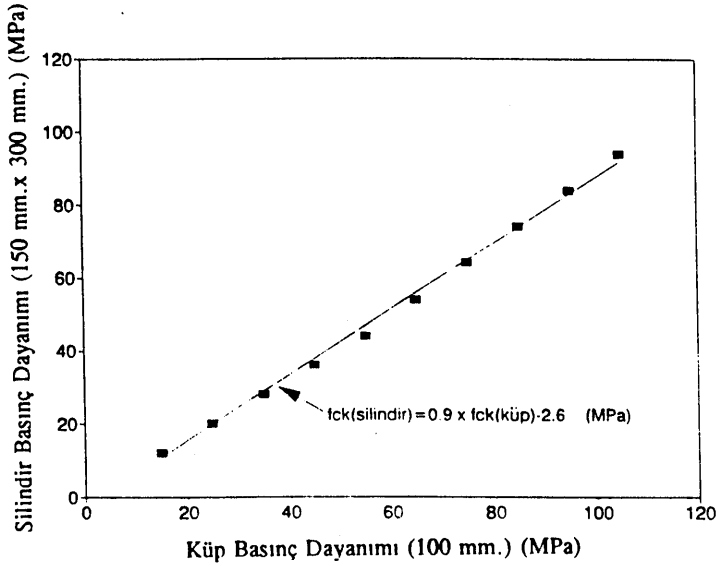
Şekil 2. 28 günlük küp basınç dayanımının su/çimento oranı ve değişik Silica Fume miktarıyla değişimi. [3]



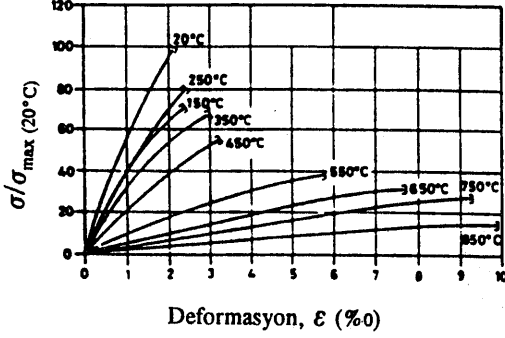
Şekil 3. Sünme katsayısının beton basınç dayanımı ile değişimi [8] (S:Sızdırmaz örtülü, N:Normal)



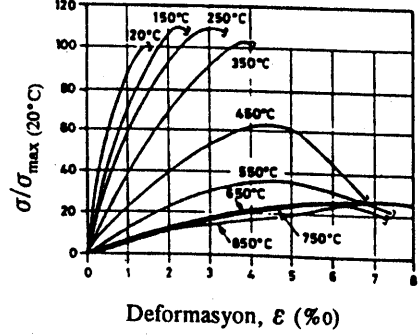
Şekil 4. Elastisite Modülünün beton basınç dayanımı ile değişimi (+ işaretiyle gösterilen veri noktaları ACI Committee 363 Raporundan alınmıştır)



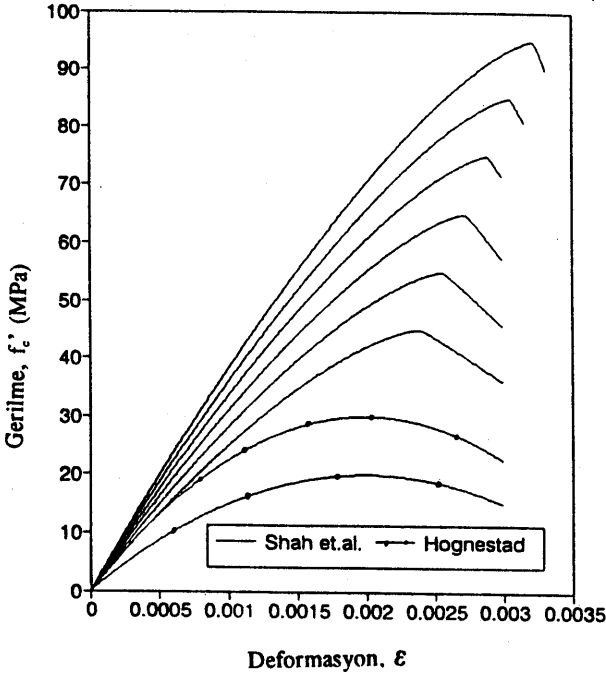
Şekil 5. Standart küp ve silindir şekilli beton örneklerinin ölçülen basınç dayanımları arasındaki ilişki (veri noktaları Norveç Yapı Kodundan alınmıştır)



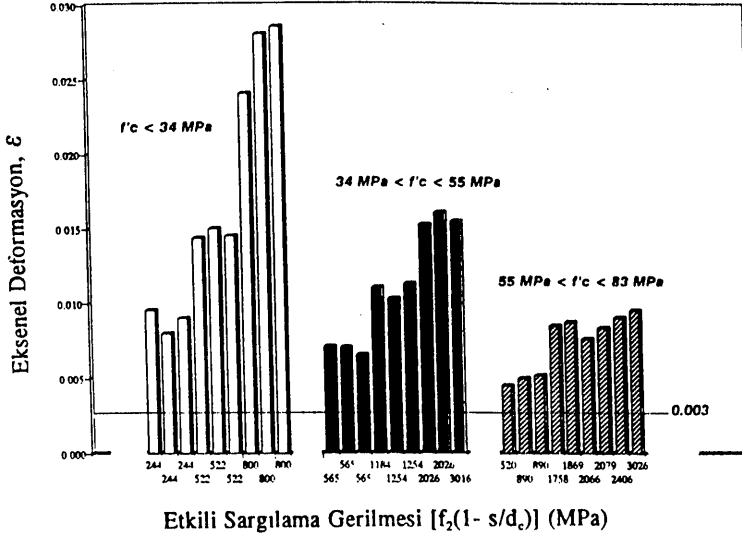
Şekil 6. Fly ash ve portland çimentosundan mamül Yüksek Dayanımlı Betonun yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışı [3] (betonun 20°C deki basınç dayanımı 91.8 MPa dır)



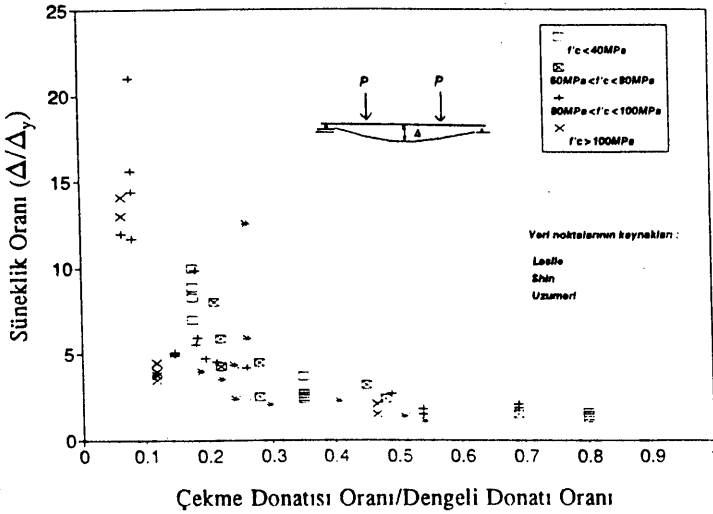
Şekil 7. Portland çimentosundan mamül Normal Dayanımlı Betonun yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışı [3] (betonun 20°C deki basınç dayanımı 32.9 MPa dır)



Şekil 8. Normal ve Yüksek dayanımlı beton için verilmiş analitik gerilme-deformasyon eğrileri



Şekil 9. Eksenel basınç yükü altındaki değişik dayanımlı betonlarda etkili sargılama gerilmesinin eksenel deformasyon değeri üzerindeki etkisi (Martinez'in [15] deney sonuçları kullanılmıştır)



Şekil 10. Eğilme yükü altındaki elemanlarda çekme donatısı miktarının eleman sünekliği üzerindeki etkisi