

RAPÖRTÖR GÖRÜŞ ÖZETİ
KONU:1

GENELDE YÜKSEK DAYANIMLI BETON

İlhan BERKTAY
Profesör
Yıldız Üniversitesi
İstanbul, Türkiye

Beton ve betonarmenin bulunduğu 19. yüzyılın ikinci yarısından günümüze kadar, her dönemde, üretilen standart beton kalitesinden daha üstün nitelikte beton, malzeme ve günün teknolojisindeki iyileştirmelerle, elde edilebilmiştir. Diğer bir deyişle, normal dayanımlı beton ile daha yüksek dayanımlı beton daima birlikte varolmuşlardır. Bu kongrenin konusu olan Yüksek Dayanımlı Beton (kısaca YDB olarak anılacaktır) ise, kendinden öncekilerden, nicelik ve nitelik yönünden çok farklıdır. Halûk Özberki, bildirisinde, yapılarda şu anda erişilebilen en yüksek beton dayanımının 133 MPa olduğunu söylemektedir. Laboratuvarlarda ise 250 MPa'a ulaşıldığı biliniyor. Ülkemizde yürürlükte olan "Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları-TS500/84"de S220 çeliği için öngörülen akma hesap dayanımının $f_{cd}=191$ MPa emniyet gerilmeleri yönteminde ise aynı tür çelik için emniyet gerilmesinin $\sigma_s=140$ MPa olduğu gözönüne alınırsa, beton basınç dayanımında ulaşılan mertebe daha açıklık kazanır. Beton basınç dayanımındaki bu sıçrama, üretimin talepleri ile malzeme bilim ve teknolojisindeki gelişmelerin karşılıklı etkileşimi ile gerçekleşebilmiştir. Türkiye'de de son yıllarda, sanat yapılarında, prefabrikasyon sektöründe ve bazı yüksek yapılarda, C35, C40, C45 betonları üretilebilmiş, laboratuvarlarda ise 100-120 MPa basınç dayanımları elde edilebilmiştir.

Değişiklik yalnız basınç dayanımındaki nicel artışta değildir. Yüksek dayanım, nitelikli agrega ve çimentoyla

birlikte, betondaki boşluk oranının (porozite) küçültülmesini gerektirir. Bunun için su/çimento oranı (W/C), 0,20'lere varan ölçüde düşürülmekte, azalan işlenebilirliği korumak için süper akışkanlaştırıcılar kullanılmakta ve silis dumanı (silica fume), uçucu kül (fly ash) vb. süperaktif ince puzzolanik katkı maddeleri ile çimento-agrega ara yüzeyindeki boşlukların doldurulması sağlanmaktadır. Böylece betonun mikro yapısının pekleştirilmesi ve homojenleştirilmesi ile elde edilen YDB yalnız basınç dayanımı ile değil, bütün fiziksel-mekanik özellikleriyle, nitelik yönünden, normal betondan farklı, sanki yepyeni bir yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Son on yılda yoğunlaşan araştırmalar YDB'nun ani ve uzun süreli yük altında davranışının, dayanıklılığının (Dürabilite), sünme ve büzülmesinin geçirimsizliğinin, elastiklik modülünün vb özelliklerinin normal betondan farklı olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda, sadece kaliteli malzeme ve katkıların kullanılmasının ve ileri teknolojiyen yararlanılmasının YDB elde etmek için yeterli olmadığı da görülmüştür. "Yeterli ve sürekli beton denetimi ve kalite kontrol düzeni kurulması" YDB için "olmazsa-olmaz" ön şart niteliğindedir. Şu halde, bu yeni yapı malzemesini, YDB'ü, bütün özellikleri ile tanımamak, inşaat mühendislerimiz ve beton üreticilerimiz için, zorunlu hale gelmiştir. Bilinçli bir üretim ve tasarımda kullanım için bu gereklidir. Sanırım, İnşaat Mühendisleri Odasının 2. Ulusal Beton Kongresini YDB konusuna ayırmasında ana etken bu olmuştur.

Kongreye "Genelde Yüksek Dayanımlı Beton" konusunda 6 bildiri sunulmuştur. Bir bildiride (Kocataşkın betonun tarihsel gelişimi ve geleceğe yönelik beklentiler, bir bildiride ise (Özberki) günümüzde YDB kullanılarak, gerçekleştirilen yapılar hakkında bilgi verilmektedir. İki bildiri (Malier, de Larrard-Malier) YDB'nun üretimi ve önemli özellikleri ile ilgilidir. Bir bildiride (Akyüz) betonda boşluk geometrisinin basınç dayanımına etkisi, bir bildiride de (Collepardi-Kozanoğlu-Yanardağ) YDB'nun dayanıklılığı (dürabilite) araştırılmıştır. Bu bildiriler aşağıda özetlenmiş ve incelenmiştir.

Ferruh Kocataşkın "Betonun Dünü, Bugünü, Yarını" adlı bildirisinde önce, beton içinde en önemli bileşen olan bağlayıcı maddelerin 5000 yıllık geçmişini açıklamaktadır. Bununla ilgili Çizelge I'de "Ca-Esaslı Bağlayıcıların Tarihsel Gelişimi" kronolojik sırayla verilmektedir. M.Ö. 3000'li yıllarda Mısır ve Babil'de kullanılan alçıdan

başlayarak, YDB'nun oluşumunda büyük önem taşıyan puzzolanik ve bağlayıcı atıklara kadar uzanan bu listede, bu sonuncularla ilgili kaynakların 1980'li yıllara ait olduğu görülmektedir. Bildiride daha sonra, 1850'li yıllarda betonarmenin icadı ile başlayan süreç içinde günümüze kadar gelen gelişmelere değinilmektedir. Çizelge II'de bu gelişme, önemli kilometre taşlarıyla, belirtilmiştir. Çizelgenin incelenmesinde, Kocataşkın'ın deyimiyle bir "faz farkı" hemen farkedilebiliyor. Örneğin ilk Alman Çimento Standartı 1860'da, ilk Alman Betonarme Şartnamesi 1906'da, DIN 1045 ise 1943'de yayınlanmıştır. İlk Türk P.Ç. Şartnamesi 1937'de, ve ilk Türk Beton Şartnamesi ise (Türkiye Köprü İnşaat Cemiyeti Betonarme Şartnamesi) 1953'de yayınlandı. Benzer şekilde, tasarımda limit durumlara göre hesaba ve betonarme kesit hesaplarında taşıma gücünü benimseyen ilk Amerikan Standartı ACI-318'in yayın tarihi 1956, bunda değişiklik yapan ACI-318 M'in 1963'tür. Aynı nitelikteki Türk Betonarme Standartı TS-500 ise 1982'de yayınlandı. Aradan 9 yıl geçmesine karşın, bu yeni gerçekçi yöntemin yaygınlık kazandığı söylenemez. Tam tersine, bilgisayar uygulamaları yaygınlaştığı halde, mevcut programların büyük çoğunluğu, İMO'nun pazarladıkları dahil, statik hesaplarda işletme yüklerine, kesit hesaplarında emniyet gerilmeleri yöntemine bağlı kalmaktadır. Bir yandan YDB tanımak ve ondan yararlanmak için çaba harcanırken diğer yandan NDB'un hesap dayanımının ve basınç gerilmelerinin gerçek dağılımının kullanılmasına bu kadar direnç gösterilmesi düşündürücüdür. F. Kocataşkın, 1990'lı yıllarda var olan 28 özel beton türü saptamış ve bunları Çizelge III'de alfabetik olarak sıralamıştır. 27. sırada yer alan ve bu kongrenin konusu olan YDB ise Çizelge IV de ayrıca ele alınmıştır. Burada YDB'la ilgili değişik konulardaki yayınlara değinilmiş ve ACI Committee 363'ün önerdiği yeni araştırma konuları açıklanmıştır. Bildirinin son bölümünde geleceğe yönelik oluşumlar üzerinde durulmaktadır. Bununla ilgili Çizelge V'de güncel konulara ve gelecek için araştırma önerilerine yer verilmiştir. Kocataşkın, betonun geleceği konusunda çok iyimserdir:

"Beton gelecekte de en ekonomik, en çok kullanılan, en az enerji gerektiren ve en iyi çevre koruyan yapı yapı malzemesi olmayı sürdürecektir."

demektedir. Bildirisinin sonunda, ülkemizde de "belirli bir faz farkı ile" benzer gelişmelerin beklenebileceği kanısında olduğunu açıklamaktadır. TS500/84, YDB'u karakteristik silindirik basınç dayanımı 30 MPa ile 50 MPa arasında değişen betonlar olarak tanımlıyor. Ağustos 1990'da yayınlanan

CEB/FIP komisyon raporunda ise bu sınırların 60 Mpa ile 130 MPa arasında olması öngörülmektedir. Bu durumda bir "faz farkı"nın var olduğu yadsınamaz. F. Kocataşkın'ın bildirisinin sonunda verdiği, 180 eserlik zengin kaynak listesi, bu faz farkını kapatmaya istekli genç araştırmacılarımıza yardımcı olacak niteliktedir.

Yves Malier'nin bildirisi "Yüksek Performanslı Betonlar" başlığını taşıyor. Görüldüğü gibi Malier, YDB yerine Yüksek Performanslı Beton (YPB) deyimini kullanıyor. Bunu açıklarken, geleneksel betonların sadece basınç dayanımları ile anıldığını, yeni betonlarda ise bunun değişmesi gerektiğini belirtiyor. Çünkü yeni betonlar, yüksek dayanımla birlikte, birçok diğer özellikler de kazanmışlardır ve bunlar mühendislik tasarımında, çözümlerin seçimi için belirleyici olabilirler. Bildiride, önce, yüksek performans elde etmenin farklı iki yolu açıklanıyor. Hidratasyona girmeyen su, beton dayanımını ve dayanıklılığını (dürabilite) olumsuz yönde etkilemektedir. Buna karşın yerleştirmede reolojik özelliklerin kazanımı için su gereklidir. Demek ki problem şöyle özetlenebilir: Betonun aranan niteliklerini koruyarak su içeriğini azaltmak. Aynı dönemde diğer bir grup araştırmacı, çabalarını karışım tasarımı üzerinde yoğunlaştırarak, çok kompakt bir karışımdan monolitik, kayaç gibi bir malzeme elde etmeye çalışmaktadırlar. Böylece YPB üretimi için fiziksel ve kimyasal nitelikleri farklı iki ayrı yöntem ortaya çıkıyor.

Birinci yol çimento danelerinin topaklanmasının önlenmesidir (defloculation). Bu organik maddelerden oluşan akışkanlaştırıcılar kullanarak sağlanır. Böylece sudaki çimento süspansiyonunun başlangıçtaki granülometrisi korunur (çoğunlukla 5-50 µm arasında) su gereksinmesi azaltılmış olur.

İkinci bir yol karışımın granülometrisini yaymaktır. Bunun için, kimyasal olarak reaktif olan ya da olmayan, son derece ince -silis dumanı, kalkerli dolgular (filler) vb. -dane arası mikroboşlukları doldurucu maddeler kullanılır. Böylece malzemenin kompaktlığı ve taze karışımın işlenebilirliği sağlanır. Betonu yerleştirmek için su gereksinmesi yine azalmış olur.

Y. Malier, gerekli malzeme bölgede bulunabilirse, beton maliyetinde bir artış olmadan, bu basit yöntemlerden birinin kullanılmasıyla, 60-80 MPa arasındak basınç dayanımı olan YPB

üretilebileceğini söylüyor. Ayrıca maliyetteki artış kabullenilirse, malzeme özenli seçilerek ve her iki yöntem birlikte kullanılarak 90-140 MPa arasında basınç dayanımına ulaşılabileceğini belirtiyor ve Seattle örneğini veriyor. Bilidiride daha sonra, son yıllarda YDB üzerinde kazanılan yeni bilgiler mikroyapı, yerleştirme, mekanik davranış, dürabilite ara başlıkları altında özetleniyor. Beton mikroyapısı üzerindeki gözlemlerde, silis dumanı kullanmadan 65 MPa'lık YDB üretilebildiği ancak silis dumanı ilavesiyle üretilen CYDB'da tam homojen ve amorf bir matris ve 105 MPa basınç dayanımına ulaşıldığı görülmüştür. Akışkanlaştırıcıların katılmasıyla çimento hamurunun kaymadaki akma sınırı azalır ve beton yoğun ve "yapışkan" görünümüne karşın kolayca akar. Bu, yerleştirme ve pompalama işlemlerini kolaylaştırır. YDB'da basınç dayanımı ile birlikte çekme ve kesme dayanımları, elastisite modülü beton ve çelik arasında aderans da artar. Granülometrinin yaygınlaştırılması ile elde edilen YPB (2. yöntem) da sünme etkisi azalmaktadır. YPB ve ÇYPB zararlı kimyasal etkilere korozyona, donma-çözülme çevrimlerine, geleneksel betondan daha iyi dayanmaktadır.

Bildirinin son bölümünde Malier, bu yeni malzeme (YPB) için yeni taşıyıcı sistem tasarımı çağrısını yapıyor. Tasarımda yeni ve global bir yaklaşım benimsenmelidir. Bu yaklaşımda malzeme, teknoloji, taşıyıcı sistemin biçimi, sağlanması istenen özel koşullar, çalışma yöntemleri; ekonomi birlikte ele alınmalıdır. Ancak böyle bir değerlendirmeden sonra o işe uygun beton seçimi yapılabilir.

Halûk Özberki "Kuzey Amerika'da Yüksek Yapılar ve Yüksek Dayanımlı Beton" adlı bir bildiri sunmuştur. Bildirinin ilk bölümünde, Kuzey Amerika'daki yüksek yapılar hakkında bilgi verilmektedir. Bu yapılar, zaman içinde artan yükseklikleri ve beton basınç dayanımları ile birlikte ele alınmıştır. Yüksek yapıların kısa geçmişinde, Chicago kenti özel bir yer tutmaktadır. H. Özberki, dünyanın en yüksek betonarme binasının, bu kentte, 311 South Wacker Drive' yapılmakta olduğunu, yüksekliği 288 m.ye ulaşan bu binadan daha yüksek ancak 10 kadar çelik karkas yapının bulunduğunu söylüyor. Binanın 13. katına kadar olan kolonlarda 84 MPa., geri kalan taşıyıcılarda ise 52,5-70 MPa. basınç dayanımı olan YDB kullanılması bunu olası kılmıştır. Yapımcı, betonu, düşey olarak 320 m. ye yükseltebilen bir pompa ile basmaktadır. Bu pompa 50. kata kadar 92 m³/saat, 50. kattan sonra 38 m³/saat beton basabilmektedir. 5 günde bir kat çıkabilmek için iki takım, özel hareketli kalıp

kullanılmıştır. Bugüne kadar, endüstriyel üretimde elde edilen en yüksek beton basınç dayanımının 133 MPa. olduğu bildirilmektedir. Bu dayanıma Seattle'da 220 m. yüksekliğindeki Two Union Square binası kolonlarında ulaşılmıştır. 3,05 m. çapında olan kolonlarda donatı yoktur. Bunun yerine, aynı zamanda kalıp olarak kullanılan ve içinde kesme dayanımı için saplamaları bulunan çelik kılıf yerinde bırakılmaktadır. YDB'nun üretilmesinde W/C oranı 0,22'de tutulmuş, işlenebilirlik için süperakışkanlaştırıcı kullanılmış ve silis dumanı katılmıştır. Agregası buzul çakılıdır. Özberki, beton dayanımında ve sismik tasarımdaki gelişmelerin, deprem bölgelerindeki yapı yüksekliklerine de yansıdığını söylemekte ve örnek olarak Los Angeles'deki 32 katlı Beaudry Center binasını vermektedir.

Özberki, daha sonra uygulanan teknolojiye değinmektedir. Yüksek yapılarda betonun düşey taşınması için yüksek basınçlı pompalar zorunlu olmaktadır. Yerleştirme için yatay dağıtım kolları kullanılmaktadır. Kalıp için ise vinçlerle aktarılabilen ya da kendi kendine yükslebilen tırmanır kablolarla yararlanılmaktadır. Bu bölümün sonunda Özberki, YDB'un Avrupada yaygın olmadığını, çünkü donatı gerekliliklerinin betonun bu özelliğini kullanmaya elverişli olmadığını söylemektedir. Sanırım bu, tartışılabilir bir görüştür.

Son bölüm 2000'li yıllarda beklenen gelişmelere ayrılmıştır. Portland Çimento Birliğinin (PCA), Amerikada 140 MPa. basınç dayanımlarının yaygın hale geleceğini kestirdiği bildiriliyor. Özberki, önümüzdeki 20 yılda, daha yüksek dayanımlı betondan çok daha yüksek nitelikteki betonda ilerleme beklemektedir.

François de Larrard ve Yves Malier "Çok Yüksek Performanslı Betonların Mühendislik Özellikleri" adlı bir bildiri sunmuşlardır.

Çok Yüksek Performanslı Beton (ÇYPB), 28 günlük karakteristik basınç dayanımı 80 MPa'un üzerinde olan hidrolik beton olarak tanımlanmaktadır. Bildiride, bu malzemenin, üretimden başlayarak göçmeye kadar çeşitli dönemlerdeki özellik ve davranışını tanıtmak ve bunu betonun bileşimine ve iç yapısına bağlı olarak açıklamak amaçlanmıştır. İlk olarak bileşim prensipleri üzerinde durulmuştur. Yerleşme yoğunluğu çok yüksek olan bir beton istenmektedir. Bu karışımın granülometrisinin yayılımını gerektirir. Yerleştirme şartları dane boyutunun üst sınırını 20 veya 25 mm ile kısıtlar. En küçük dane boyutunu ise çimento danelerinin doğal topaklanması sınırlar. Bu

topaklanmayı önlemek için karışıma, topaklanmayı önleyici özellikleri olan bazı organik maddeler (akışkanlaştırıcılar) katılır. Ayrıca çimento daneleri arasındaki boşlukların bir kısmını doldurmak üzere son derece ince, atıl maddeler katarak granülometrinin yayılımı daha da arttırılabilmektedir. Silis ve alaşımları elektrometalürjisinin yan ürünü olan silis dumanı bu işi en iyi yaptığı saptanabilen madde olmuştur. Yazarlar yüksek basınç dayanımı elde etmek için, çimento ve agrega kalitesine çok özen gösterilmesini, çimento dozajının 400-550 kg/m³ arasında, silis dumanı miktarının çimento ağırlığına oranının % 5-%15 arasında, su/çimento oranının % 35'in altında tutulmasını öneriyorlar. W/C oranı daha aşağıya çekilirse YPB'dan ÇYPB'a geçmek mümkün olabilir. Daha sonra betonun taze haldeki davranışı ele alınıyor. Su içeriği çok düşük olmasına karşın bu betonlar 200 mm civarında çökme verirler. Süper akışkanlaştırıcılar taze çimento hamurunun kaymadaki akma sınırını çok azaltırlar. % 30'un altında W/C oranları ile kıvam akıcı olmakla birlikte viskoz ve yapışkandır. Yerleştirmede plastik kıvamdaki normal beton kadar vibrasyon yeterlidir. Normal betonların tersine olarak ÇYPB'ların üst yüzlerinde terleme görülmez. Bu nedenle betonun erken kurummasına ve plastik rötre çatlaklarına engel olmak için özenli bakım gerekir. Sertleşme sürecinde ise, priz sırasında dışarı verilen ısı, toplam bağlayıcı miktarına bağlı olarak değişir. Silis dumanı reaksiyonun başlangıcında katalizör etkisi yaptığından, sıcaklık artışı hızlı olur. ÇYPB, normal kontrol betonuna oranla oldukça yüksek ($\sqrt{5/3}$) bir bünyesel rötre (nem alışverişi olmasızın hidrasyon derecesine bağlı rötre) göstermektedir. Sertleşmiş ÇYPB kırıntılarının elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmesinde, mikroyapının çok yoğun ve tümüyle amorf olduğu ve alışılmamış kadar çok hidrate olmamış danecikler içerdiğinin gözlemlendiği bildiriliyor. ÇYPB'nun mikroyapısını tanımlayan önemli özellikler olarak toplam porozitesi düşük bir çimento hamuru, daha küçük boşluk boyutları, pek az serbest su, çimento hamurunun göbek kısmından farklı olmayan hamur-agrega arayüzleri, azalmış serbest kireç, agrega danelerinin daha güçlü kavranmasına neden olan ve makroskopik boyuta bünyesel rötre ile yansıyan bir içgerilme durumu sayılmaktadır.

Mekanik özelliklerin en önemlisi yüksek basınç dayanımıdır. Laboratuarlarda basınç dayanımı 200 MPa. aşan betonlar üretilebilmektedir. Ancak yazarlar bunun pratikte bir yararı olmayacağı, bugünkü teknolojik gelişme düzeyinde,

normal agregalarla ve işlenilebilir beton üretimi için 100-120 MPa. la yetinmek gerektiği kanısındadırlar. Aynı gerekçelerle Türkiye ölçeğinde düşünülürse, hedeflenen basınç dayanımını çok daha aşağılara çekmek gerektiği ortadadır.

Mukavemetin zamanla artışı, normal betonlara oranla, hızlıdır. Bununla ilgili olarak çizelge 3'de verilen değerler ilginçtir. ÇYPB'lar 1 günde 28 günlük dayanımlarının % 27'sine, 7 günde ise % 85'ine ulaşmaktadırlar. Bu, kalıp alma süresini ve yapım sürecini kısaltacak önemli bir özelliktir. Çekme dayanımı ve elastiklik modülünde ise bu hız daha da fazladır. 7 günde 28 günlük değerlerin hemen tamamına ulaşmaktadırlar. Buna karşın çekme dayanımında ve elastiklik modülündeki toplam artış, NDB'a oranla, basınç dayanımındaki kadar fazla değildir. Basınç dayanımı sertleşmiş çimento hamurunun kompasitesinin karesi ile artarken, diğerlerinde bu bağlantı doğrusaldır. Amerikan yönetmeliğinde çekme dayanımının basınç dayanımının kareköküne bağlı olarak ifade edilmesinin (TS500'de $f_{ctk}=0,35 \sqrt{f_{ck}}$ MPa.) nedeni budur. Ancak yazarlar Fransız yönetmeliğindeki $f_{ctj} = 0,6+0,06 f_{cj}$ formülünün deneysel sonuçlara daha iyi uyduğunu söylemektedirler. ÇYPB elastiklik modülü için ise

$$E = 11000 (f_{cj})^{1/3} \text{ formülünü önermektedirler.}$$

ÇYPB'nun bünyesel rötresinin NDB'un yaklaşık 2 katı olmasına karşın toplam rötreye çok daha düşüktür. Çizelge 4'de verilen deney sonuçlarına göre, toplam rötrenin normal kontrol betonu toplam rötresine oranları, deney sonunda $(\epsilon_r)_{cyp} / (\epsilon_r)_N \sim 1/1,5$, uzun süre ekstrapole edilirse bulunmaktadır.

ÇYPB'da sünme etkisi için verilen bilgiler şöylece özetlenebilir:

- Hızlı bir kinetiği vardır. (1 yıllık değer %67'sine 7. günde ulaşır. Normal betonda bu değer % 41'dir)
- Çok küçük bir genliği vardır $[(K_{cr})_{cyp} / (K_{cr})_N \sim 1/3]$
- Rutubet etkilerinden ve elemanın geometrisinden bağımsızdır.

ÇYPB'un donatı ile aderansı artmaktadır. bildiride bu konuda değişik yöntemlerle gerçekleştirilen deney sonuçları irdelenmektedir. Artmış aderansın getirdiği ilk sonuç

aderans boylarının kısaltılmasıdır. Diğer taraftan çatlak genişliğinin sınırlı olduğu yapılarda (örneğin su yapılarında) normal betonla çalışan mühendisin donatı gerilmelerin düşük tutmak zorunda olduğu bilinir. ÇYPB'la yapıları karşılaştırmalı bir hesap, donatı maximum kapasiteye çalıştırıldığı halde bulunan teorik çatlak genişliğinin, normal betonla ve düşük donatı gerilmesi ile bulunandan küçük olduğunu göstermiştir.

Bildirinin sonunda "Yakıcı Sorunlar" başlığı altında ÇYDB ile ilgili bazı problemler tartışılmaktadır. Önce ÇYPB kullanmaya karar verildiğinde yeni bir malzeme kuşağına geçilineceğinin algılanması gerektiği vurgulanmaktadır. Öyle ki, burada, C80 bugünkü C25'in, C120 ise bugünkü köprülerimizin C35'inin yerine geçecektir. Bunun önlemlerinin alınması, yazarların deyimiyle "yeni silahlarla donatılmanın düşünülmesi" gerekir. Bu amaçla, yazarlar, bir laboratuvar çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada şantiye koşullarına yakın şartlar laboratuvarı yaratılmış ve şantiyede olası kusur ve kazaların etkileri ÇYPB ve kontrol NDB örnekleri üzerinde araştırılmıştır. Açıklanan sonuçlara göre, ÇYPB dayanımı, su artışına, kontrol betonuna oranla daha hassasdır. Buna karşın çimento, akışkanlaştırıcı, silis dumanı öğelerinin azalmasından pek etkilenmemektedir. Zararlı etkilerin eklenmesiyle dayanımdaki azalma her iki malzemede de aynı mertebede kalmaktadır. (%10%15) Buradan, endüstriyel koşullarda ÇYPB'un güvenilir şekilde gerçekleştirebileceği sonucuna varılmaktadır.

ÇYPB'un NDB oranla gevrek bir malzeme olup olmadığını araştıran deneysel çalışmada 3 tip örnek kullanılmıştır. NDB/YPB (silis dumanı içermiyor)/ÇYPB (silis dumanlı). Bu 3 örneğin kırılma tokluğu (belirli bir ortamda ve uzunlukta bir çatlağın genişlemesi için gerekli yük) oranları, deney sonuçlarına göre 1/1,18/1,32 bulunmuştur. Artış hızının, basınç dayanımı hatta çekme dayanımına göre çok yavaş olduğuna dikkat çekilmektedir. Tek eksenli basınç deneyinde elde edilen σ - ϵ eğrisi oldukça lineerdir. Maksimum gerilmede plastik deformasyon toplam deformasyonun %15'i mertebesindedir. Bu değer normal betonlarda %29 dolayındadır. Bu durumda ÇYPB oldukça gevrek bir malzeme görünmektedir. Ancak yüksek donatılı ve normal donatılı kirişler üzerindeki deneysel araştırmalar yukarıdakinden farklı sonuç vermektedir. Taşıma gücünü basınç kırılması ile kaybeden yüksek donatılı kirişte ÇYPB ve kontrol betonunda kırılma anında davranış modeli benzerdir. Basınç lifinde birim deformasyon $\epsilon_{cu} > 0,004$ olduğu halde beton ezilmemiştir.

Normal (denge-altı) donatılı kirişte ise ÇYPB ek bir e neklik sağlamaktadır. Bu nedenle yazarlar, tek eksenli basınç deneyinden elde edilen $\sigma-\epsilon$ diyagramının eğilme hesapları için anlamsız olduğunu ve eğilme deneylerinin sonuçları ile uyum sağlayan genel kurallar seçmek gerektiğini söylüyorlar. ÇYPB'lar için trapez (elasto-plastik) diyagramı  oneriyorlar (bkz. Çizelge 6) Maksimum beton basınç diyagramının silindir mukavemetinin 0,85'i yerine 0,80'i alınması ile güvenlik tarafında kalınaca ını ekliyorlar. Böylece maksimum hesap dayanımı (0,80 fck/1,5) olmaktadır. Bu andaki birim k salma 0,0025, ezilme anındaki birim k salma $\epsilon_{cu}=0,0035$ olmaktadır.

Bildirinin sonunda kısaca dürabilite konusuna de inilmekte ve bu konuda da olumlu görüş belirtilmektedir.

Saim Akyüz "Boşluk Oranı ve Geometrisinin Beton Basınç Dayanımına etkisi, Yüksek Dayanımlı Betonda Boşluk Yapısı" adlı bildirisinde, betonun inelastik davranışını çatlak yüzeyi alanına ba layan matematik bir model geliştirmektedir. Bu model aracılığı ile betonun basınç dayanımının, yalnızca yapısal boşluk oranının değil aynı zamanda boşluk geometrisini simgeleyen k ıcallık katsayısının bir fonksiyonu olduğu sonucuna varılmaktadır. S. Akyüz önce, basınç mukavemetini boşluk oranına ba layan, değişik araştırmacıların önerdiği formülleri incelemekte ve bütün bu formüllerde, boşluk geometrisinin etkisini simgeleyen bir parametre bulunmadığını vurgulamaktadır. Betonun inelastik davranışını mikroyapıya ba layan bir matematik model kurmayı amaçlayan Akyüz, betonun kırılma mekanizmasını özetledikten sonra Enerji Dengesi Teorisine geçmektedir. Dış yükler altında dengede ve y k arttıkça büyüyen çatlakları içeren gevrek bir cismin termodinamik dengesini

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dV}{dt} + \frac{dT}{dt} + \frac{dD}{dt}$$

denklemini vermektedir. Burada t zamanı, U dış kuvvetlerin yapt ı i i, V elastik  ekil değiştirme i ini, T kinetik enerjiyi, D plastik  ekil değiştirme i ini (dissipatif enerjiyi) gösteriyor. Kuvvet sabit kaldığında çatlak ilerlemiyorsa (yarı-kararlı durum) $dT/dt=0$ alınabilir. Daha sonra matematik bir formülasyon için gerekli basitle tirici varsayımlar yapılmakta, betonun $\sigma-\epsilon$ eğrisi için Voelmy

parabolü alınmakta, gerekli integrasyon ve diğer matematik işlemlerden sonra beton basınç dayanımı için:

$$R = M \{1 - [1 - (G/v)^m]^{2/3}\}$$

denklemini elde edilmektedir. Burada R beton basınç dayanımını, M boşluk oranı sıfır olduğu zamanki en büyük beton basınç dayanımını, v beton hacmini, G yapısal tüm boşlukların dışında kalan beton hacmini, m ise yapısal boşlukların geometrisine bağlı bir parametreyi göstermektedir. $1 - (G/v) = p$ boşluk oranı olduğuna göre denklem şu hale gelir:

$$R = M \{1 - [1 - (1-p)^m]^{2/3}\}$$

Boşluk geometrisi parametresi m, $v_0/v = (G/v)^m$ bağıntısıyla tanımlanmaktadır. ($m \geq 1$) v_0 ise betona kuvvet uygulanmadan önce gerilme alanı oluşabilecek hacmi gösteriyor. Örneğin küresel boşluk oluşması durumunda, bu boşluğun etrafında gerilme alansız bölge olmayacağından $m=1$ olur. Boşluk küresellikten uzaklaştıkça $m>1$ olur ve basınç dayanımı azalır. Boşluk geometrisi m ile kılcallık sabiti k arasında $m=1+\alpha.k$ bağıntısı olduğu varsayılarak

$$R = M \{1 - [1 - (1-p)^{1+\alpha.k}]^{2/3}\}$$

denklemini elde edilmektedir. p ve k deneysel olarak elde edilebilen büyüklüklerdir. p ve k'nın artması basınç dayanımını düşürür. Bu sabitlerin belirlenmesi için daha önceki bir çalışmanın sayısal sonuçlarından yararlanılmış, beton porozitesinin, 15 adetlik bir grup için ortalama $p=0,13$, 10 adetlik bir grup için ise $p=0,19$ olduğu saptanmıştır. Bilgisayarda deneme-yanılma yöntemi ile k-R eğrileri çizilmiş M ve α sabitleri bulunmuştur. $p=0$ 'a karşı gelen $M=R_{max}$ her iki grupta yakındır. $M=120$ MPa ve $M=110$ MPa. Ancak α katsayıları farklı çıkmıştır. Bu farklılığın 2. gruptaki örneklerin azlığından mı, yoksa boşluk oranı arttıkça kılcallığın azalmasından mı kaynaklandığı sorusunu yanıtlamak için eldeki verilerin yetersiz olduğu belirtilmektedir. Sonuç olarak beton dayanımını yalnız boşluk oranının değil, aynı zamanda boşluk geometrisinin de

etkilediği, bu nedenle yalnız boşluk oranına bağlı formüllerin yetersiz kaldığı, boşluk oranını azaltmak kadar boşlukları küreleştirmenin de basınç dayanımını arttırdığı vurgulanmaktadır.

Mario Collepari, Celâl Kozanoğlu ve Cevdet Yanardağ "Yüksek Dayanımlı Betonlarda Dürabilite" adlı bir bildiri sunmuşlardır. Dürabilite (Dayanıklılık), "doğal" kimyasal zararlı etkilere karşı koyabilme yeteneği olarak tanımlanmakta, "sunî" zararlı kimyasallara karşı beton dürabilitesinin konu dışında tutulduğu belirtilmektedir. Özellikle süperakışkanlaştırıcı ve silis dumanı kullanımının olumlu etkileri üzerinde, deneysel araştırma sonuçlarına dayanarak, durulmaktadır. Ancak silis dumanının, talebin yüksek üretimin düşük olması nedeniyle, fiyatının arttığı ve sonuçta ancak çok yüksek dayanım ve dürabiliteye sahip betonların istendiği özel yapılarda kullanılabildiğine işaret edilmektedir.

Bildirinin ilk bölümünde YDB ile ilgili bazı kavram ve özellikler üzerinde de açıklamalar yapılmaktadır. Bu arada silis dumanı katkılı çimentoların daha yüksek rötre potansiyeli içerdiği ancak karıştırma yönteminin çatlak oluşumuna etkili olduğu belirtiliyor. Deneysel bulgulara göre, çimento ve silis dumanı normal biçimde suyla karıştırıldığında kalıplanan ve nemli ortamda saklanan örneklerde ilk 24 saat içerisinde bile çatlaklar görülmüş, buna karşın silis dumanının suyla önceden karıştırılarak elde edilen şerbete çimento katıldığında bu çatlaklara rastlanmamıştır.

Daha sonra yüksek dayanım konusunda deneysel araştırma sonuçları açıklanmaktadır. Katkısız, yalnız süperakışkanlaştırıcı katkılı ve süperakışkanlaştırıcı ile birlikte silis dumanı kullanılan 3 tip betonun 1,7,28 günlük dayanım grafiklerinin incelenmesinden, elde edilen dayanımların, beklendiği gibi aynı sırayla yükseldiği görülmektedir.

Bildirinin asıl konusu olan dürabilite son bölümde; yine deneysel araştırmalara dayalı olarak incelenmektedir. Kullanıma hazır süperakışkanlaştırıcı (SP)-silis dumanı (SF) toz ürün katkılarının betonun dürabilitesine etkisi araştırılmıştır.

Betona sülfat etkisi için, sülfat içeren agregalarla üretilip 28 günlük kür sonrasında 5°C su içinde saklanan 350

dozlu beton örnekler kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, katkısız portlanda çimentolu ve $W/C=0,60$ olan beton 6 ayı tamamlamadan çatlamakta, 1 yıla varmadan dağılmaktadır. $W/C=0,45$ olan diğer betonlarda ise bu süreler: (PÇ+SP) için 2 yıl ve 3 yıldan az, (Katkılı PÇ+SP) için ise 2,5 yıl ve 3 yıl olmaktadır. Portland çimentosuna 50 kg/m^3 toz halde (SF-SP) katılarak üretilen beton 4 yıldan beri çatlamamaktadır.

Kalsiyum klorürün neden olduğu beton bozulması, sülfatlara oranla çok hızlıdır. Deneylerde değişik beton örnekleri 5°C sıcaklıkta ve % 30 CaCl çözeltisinde saklanmıştır. Birkaç gün içinde ilk çatlaklar görülmekte, birkaç ay içinde de örnekler parçalanmaktadır. (SF-SP) katkılı beton örneği ise, $W/C=0,50$ olmasına karşın, zarar görmeden dayanabilmektedir.

Sodyum klorür, agrega-alkali reaksiyonuna katkıda bulunarak, dolaylı yoldan, genleşmeye ve betonun çatlamasına neden olabilir. Deneylerde aynı özelliklere sahip iki beton örnekten su içinde saklananda değişiklik olmazken % 10 Na Cl çözeltisindeki örnek bozulmaktadır. Ancak (SF-SP) katkılı beton kullanılırsa, Na Cl çözeltisinde bekletilen örnek bozulmamaktadır. Benzer şekilde bu betonlar yoğun mikroyapılarıyla, klor tuzlarının donatıda yaratacağı korozyona da engel olurlar. 25 mm. pas payının, ağır koşullarda dahi, yeterli olduğu bildirilmektedir. Bir diğer zararlı etki de karbondioksitten gelmektedir. Bu etki su yapılarında ıslanma (leach-out), diğer yapılarda ise karbonatlaşma şeklinde görülmektedir. (SF-SP) katkılı betonların, W/C oranı 0,50'yi aşmamak üzere, her iki durumda da etkili şekilde korundukları belirtilmektedir.

Sonuç olarak (SF-SP) katkılı betonlarda, boşluksuz çok yoğun bir mikroyapı elde edilebildiği, çok yüksek basınç dayanımı ilie birlikte yeterli dürabiliteye sahip betonlar üretilbildiği vurgulanmaktadır.

Genelde YDB konusu, yukarda özetlenen bildiriler çerçevesinde ve Türkiye koşulları ile birlikte değerlendirilirse:

- 1) Nitelikli çimento ve agrega ve iyi bir granülometri ile, su içeriğini azaltıp süperakışkanlaştırıcılar eklenmesiyle YDB elde etmek olasıdır. Bildirilerde bölgesel malzeme kullanılabilirse NDB'a oranla maliyette fazla bir artış olmayacağı konusunda görüş

birliği vardır. Türkiye'de YDB'nun gerektirdiği üstün nitelikte çeliğin bulunmasının güçlüğü ve maliyete katkısı da dikkate alınmalıdır.

- 2) Silis dumanı kullanımı ile çok daha homojen ve yoğun bir mikroyapı ve daha yüksek dayanım elde edilebilir. Ancak bu maliyeti arttırır.
- 3) Bildirilerde YDB'nün gevrek bir malzeme olduğu konusunda da görüş birliği vardır. Ancak bu bir sakınca oluşturmaz. Çünkü, bilindiği gibi, NDB da gevrek bir malzemedir. YDB için minimum ve maksimum donatı oranları belirlenerek, bu sınırlar arasındaki donatı ile sünek (düktil) davranış sağlanabilir.
- 4) Deđerlendirilmesi gereken diğer bir sorun, yeterli bir beton denetim ve kalite kontrol düzeninin gerçekleştirilmesi olanaklarıdır. Burada maliyetten çok risk faktörü önemlidir. Sözü edilen basınç dayanımlarının mertebesi son derecede ciddi bir denetim ve kalite kontrol mekanizmasının kurulmasını gerektirir. Yani sorun bir C16 ya da C20 betonunun gerçekleştirilip gerçekleştirilememesinden farklı boyuttur.
- 5) YDB'nun kullanım alanı, kalın çizgileriyle, sanat yapıları ve yüksek yapılar olarak gruplandırılabilir. Büyük açıklıklı, öngerilmeli köprü kirişleri, viyadükleri ve benzerleri ile birinci grubun yüksek dayanım gereksinmesi daha büyüktür. Ayrıca bu elemanlar çoğunlukla önyapımla (prekast olarak) üretilmektedir. Üretim koşulları kalite kontrol düzenleri dah güvenliirdir. Yüksek yapılarda ise yüksek dayanım gereksinimi, řu anda, sınırlıdır ve şantiye koşulları daha risklidir. Bu nedenlerle Türkiye'de YDB konusundaki gelişmenin daha çok sanat yapılarında, öngerilmeli kirişlerde ve prefabrikasyon sektöründe olması, Yüksek Yapılarda ise daha mütevazi ölçülerde kalması beklenir.
- 6) ÇYDB ise henüz Amerika'da birkaç yapıda üretilebilmiş ve dünyada laboratuardan yeni çıkmış durumdadır. Daha bir süre, üretiminin Türkiye'nin gündeminde olmayacağı, uzak bir hedef konumunu sürdüreceği söylenebilir.