

RAPORTÖR GÜROŞ ÖZETİ

KONU-III

YÖKSEK DAYANIMLI BETONUN BİLEŞİMİ

Ferruh KOCATAŞKIN

Prof. Dr.

Teknik Üniversite

İstanbul, Türkiye

1. YÖKSEK DAYANIMLI BETONUN TARIFI, TARİHÇESİ, ÖZELLİKLERİ

Yüksek dayanımlı beton (YDB), iyi kaliteli çimento ve agrega ile süper akışkanlaştırıcı katkı (SAK) ve silis dumanı (SD) gerektiren, su-çimento (S/C) oranı 0,20 lere kadar düşürülerek basınç dayanımı 100 N/mm^2 mertebelerine çıkarıldığı halde yüksek işlenebilirliğini (20 cm çökme) ve pompalanabilirliğini koruyan özel bir beton türüdür. Kural olarak, betonarme yönetmeliklerinde var olan en yüksek beton sınıfının üstünde olanlar bu özel sınıfa sokulur.

Sunulmuş olan bildirilerden görüleceği üzere 1960 lardan başlayarak $41 \pm 52 \text{ N/mm}^2$ lik betonlar ABD de piyasada kullanılmaya başlamış' yakın geçmişte ise Avrupa ve ABD de $80 \pm 100 \text{ N/mm}^2$ lik yerine dökülmüş yapılar ve öngerilmeli betonlar uygulanmıştır. YDB' lar oldukça gevrek bir malzeme gibi davranırlarsa da, donatı yardımı ile istenildiği kadar sünek elemanlar oluşturmak mümkündür.

Günümüzdeki yapı yönetmeliklerinin düzenlemeleri, denklemleri ve yöntemleri $f_{ck} \leq 41 \text{ N/mm}^2$ olan betonlar için geçerlidir. Bunların $f_{ck} > 50 \text{ N/mm}^2$, hatta $f_{ck} > 80 \text{ N/mm}^2$ olan betonlarda ne denli geçerli olacağı şüphelidir, ve tamamlayıcı araştırmalara gereksinim vardır. YDB ile normal betonun (NB) kırılma karakterlerindeki farklar yapı elemanlarının davranışına aksedecek, ve önceden kestirilemezse, NB'a ait denklemlerle yapılacak hesaplar güvenli tarafta kalmayı garantileyemeyecektir.

YDB' un elastiklik modülü, çekme dayanımı gibi özellikleri ile basınç dayanımı arasındaki, keza küp ve silindir dayanımları arasındaki ve nihayet

yapıda ölçülen ve laboratuvar deneyinde ölçülen basınç dayanımları arasındaki ilişkiler için yayınlarda yeni denklemler önerildiği görülmektedir. YDB' larda sünme, rötire, geçirimsizlik ve kalıcılık(durabilite) özelliklerinin NB'unakilere eşit veya daha iyi olduklarına, buna karşılık yangın ve yüksek sıcaklıklara dayanımın daha düşük olduğuna yine yayınlarda işaret ediliyor.

Özkul ve Karagüler bildirilerinde (III-3) YDB' un dayanımının genel olarak :

- 1- çimento hamurunun boşluk yapısına
- 2- agreganın özeliğine, ve
- 3- agrega-çimento hamuru geçiş bölgesi özelliklerine

bağlı olduğunu belirtip, en zayıfı olan geçiş bölgesi özelliklerinin s/c oranı düşürülerek ve aynı zamanda agreganın max. dane çapı küçültülerek iyileştirilebileceğini, ancak bu iki yaklaşımın belirli bir üst sınırı olduğunu vurgulamışlardır. Bu sınırı aşmak için ise, beton yapısında var olan ve kolay kırılma özeliği gösteren Ca(OH)_2 kristallerinin oluşmasını önlemek gereklidir. Bunların oluşumu puzzolan kullanılarak önlenmektedir. SAK kullanarak s/c oranını düşürmek ve uçucu kül veya silis dumanı (SD) gibi aktif puzzolanlar kullanarak Ca(OH)_2 oluşumunun önlenmesi, YDB bileşiminin temelini oluşturmaktadır. Puzzolanlar arasında bilhassa SD, %90 ın üzerinde aktif silis içeren ve inceliği çimentonun inceliğinin 50~60 katı olduğu için en ince boşlukları doldurabilen bir mineral katkıdır.

Özturan'ın bildirisinde (III-5) SAK ve SD' nın birlikte kullanılmalarının YDB' da $65\sim100 \text{ N/mm}^2$ dayanımlara erişmeyi sağladığı, ayrıca kalıcılık özeliği ve kimyasal etkilere dayanımın da arttığı açıklanmıştır. Silis dumanı veya C-sınıfı (CaO içeren) uçucu kül katılmasının, diğer puzzolanlardan farklı olarak ilk yaşlardaki mukavemetleri arttırdığına işaret edilmiştir.

Tokyay, Ramyar ve Turanlı' nın bildirisinde (III-7) ise YDB' da agrega-çimento hamuru aderansının daha iyi olması nedeni ile mikroçatlakların daha az oluşmasının, $\sigma-\epsilon$ diyagramındaki doğrusal bölümün daha uzamasına neden olduğu, σ_{max} daki ϵ' un da NB' dakine kıyasla biraz daha fazla olduğu, ve $\sigma-\epsilon$ diyagramındaki alçalan kolun eğiminin de NB' unki-ne kıyasla daha dik olduğu, bu nedenle YDB' ların basınç yükleri altında daha gevrek davranış gösterdikleri açıklanmıştır. Beton içine katılacak liflerin başlıca rolünün ise, oluşan mikroçatlakların matris içinde ilerlemesini yavaşlatmaları olduğu belirtilerek, bu yolla liflerle donatılı YDB' ların sünekliği ve tokluğunda önemli artışlar sağlanabildiği, basınç dayanımlarının ise fazla değişmediği belirtilmiştir.

2. YDB' da ÖZELİKLERİN BOŞLUK SİSTEMİ İLE İLİŞKİSİ

Balta'nın bildirisinde (III-1) belirtildiğine göre betondaki boşluk sistemi boyutlarına göre üç türe ayrılabilmekte ve her birinin mekanik özelliklere etkisi farklı olmaktadır. Hamurun s/ç oranını düşük tutarak veya SAK kullanarak bu üç tür boşluğun toplamını azaltmak mümkündür.

Hamurun ve agreganın mukavemetleri, betonun mukavemetinden büyüktür, çünkü zayıf olan hamur-agrega bağıdır. CSH oluşumu agreganın çevrelerinde çimento hamuru içindekine kıyasla daha az olurken, buralarda Ca(OH)_2 oluşumu daha çoktur. Mekanik türden kabul edilen hamur-agrega bağına, agreganın etrafındaki porozitenin ve Ca(OH)_2 oluşumunun zayıflatıcı etkileri önemlidir. SAK ve SD kullanılarak üretilen YDB' larda bu olumsuz etkiler önlen- diği için agreganın hamur bağı kuvvetli olmakta ve kırılmaların agreganın dane- leri içinden geçtiği görülmektedir. Kırılma yüzeyleri azaldığından kırılma daha düşük enerjili, yani daha gevrek olmaktadır.

Akman'ın bildirisinde (III-8) betonda mukavemeti dolu hacmin veya boş- luk hacminin fonksiyonu olarak kestirmeye yarayan çeşitli bağıntılar sıra- landıktan sonra, eski bir ampirik formül olan Alexander formülünden yarar- lanılarak normal beton mukavemetinin 150 N/mm^2 mertebesinde bir üst sınırı olacağı sonucuna varılmıştır.

Akyüz'ün bildirisinde (I-6) ise basınç mukavemetini toplam boşluk hac- minin fonksiyonu olarak kestirmeye yarayan çeşitli formüller sıralandıktan sonra boşluk geometrisinde gözönüne alan yeni bir model geliştirilip, bu- radan basınç mukavemetini, boşluk hacmi ve boşluk geometrisi parametrele- rinin fonksiyonu olarak kestirmeye yarayan ikili bir formül geliştirilmiş- tir. Formülün bazı deney sonuçlarına uygulanması, beton basınç mukavemeti- nin $110\text{--}112 \text{ N/mm}^2$ mertebesinde bir üst sınırı olacağını göstermiştir.

Yukarıda açıklanmış olan iki yaklaşımda formüllerdeki ampirik katsayı- lar nedeni ile kestirilen üst sınır değeri ancak NB'lar için geçerlidir. YDB'da ise pratikte ulaşılan üst sınır değeri 250 N/mm^2 gibi daha yüksek mertebededir.

3. YDB'un MALZEMELERİ

3.1. YDB için Çimento

Çelik' in bildirisindeki (III-6) deney sonuçlarından da görüldüğü gibi $50\text{--}80 \text{ N/mm}^2$ mukavemet seviyesindeki YDB'lar normal bir PÇ ve SAK

kullanılarak elde edilebilmektedir. $80-100 \text{ N/mm}^2$ mukavemet seviyesindeki ÇYDB'lar ise yüksek dayanımlı bir PÇ ile SAK ve SD kullanılmasını gerektirir.

Balta (III-1) büyük bir yapıda sürekli olarak yüksek dayanımlı PÇ kalitesinin sağlanmasının önemi üzerinde durarak, tam kalite kontrolü uygulayan bir üretici seçilmesini ve kimyasal ve fiziksel çimento deneylerinin kullanıcı tarafından sürekli yapılmasını tavsiye etmektedir.

Balta aynı bildirinin başka bir bölümünde YDB için "düşük porozite çimentosu" adı verilen özel bir çimentodan da söz etmektedir. Yüksek dayanım sağlayan "makro kusurlardan arındırılmış çimento" adlı özel bir başka çimentoya ise son yayınlarda rastlanmaktadır (I-1).

3.2. YDB için Agregalar

Agregaların kalitesi YDB'u direkt olarak etkilediği için çimento kalitesi kadar önemlidir. Balta (III-1) agregaların standartlarda konmuş kriterlere uymasının yeterli olmayabileceğini vurgulayarak YDB'da şu amaçlara yönelik özellik aranmasını tavsiye etmektedir: 1- mümkün olan en düşük s/ç oranı, 2- yeterli yerleştirme kolaylığı, 3- hamur ile aderans gerilmelerini alacak yeterli yüzey alanı. Bunu sağlayacak çeşitli agrega özelliklerinin sınır değerleri bildirisinde yer almıştır. Özet olarak agregada silt ve kil kirliliği olmaması, maksimum dane çapının SAK kullanılmadığında $10-16 \text{ mm}$, SAK kullanıldığında 25 mm alınması, iyi bir aderans için kırmataş agrega kullanılması, şekli bozuk danelerin %5'i geçmemesi, düşük s/ç oranlı karışımlarda bir miktar su emen agrega seçilmesi, kaba agrega mekanik özelliklerinin yeterli düzeyde olması, ince agrega olarak düşük s/ç oranları için kaba kum, yüksek dozda SAK kullanılacaksa ince bir kum kullanılabileceği belirtilmiştir.

Çelik'in bildirisinde (III-6) KKTC üretilen kalker kırmataş agregalar ile doğal agregaların YDB'da karşılaştırılmasına imkan sağlayan araştırma sonuçları verilmiştir. Kalker kırmataş agregaların, doğal agregalara kıyasla aynı ortamlarda %30-35 daha yüksek beton basınç dayanımları verdiği, SAK kullanılan fakat SD kullanılmayan bu betonlarda en düşük s/ç oranının $0,36$ ve en yüksek basınç dayanımın 83 N/mm^2 olduğu görülmüştür. Doğal agregalı betonlarda ise en düşük s/ç oranı $0,32$ düzeyine kadar inebildiği halde iyi aderans sağlanmadığından en yüksek beton basınç dayanımı 57 N/mm^2 mertebesinde kalmıştır. Kalker kırmataşın çok iyi aderans sağladığı, ayrıca numunelerde gözlenen agrega kırılma oranının %89 lara çıkması, doğal agregalı betonlarda ise %44 larda kalması ile gerçekleşmiştir.

3.3. YDB İçin Pozzolanlar ve Silis Dumanı (SD)

Özturan'ın bildirisinde (III-5) pozzolanların tanımı; doğal pozzolan, uçucu kül, silis dumanı gibi sınıfları; betonda kullanılabilmeleri için aranacak şartlar ve kullanım yöntemleri konusunda etraflı bilgi verildikten sonra bunların betona katılması ile taze betonda priz sürelerinin gecikebileceği; taze betonun su ihtiyacının artabileceği; uçucu küllerin betonun işlenebilme özelliğini iyileştirebileceği; kohezyon artarken terlemenin azalabileceği, plastik rötrenin artabileceği, hidrasyon ısısının azalacağı; hava sürüklenmiş betonlarda gereken katkı dozunun artacağı belirtilmiştir. Sertleşmiş betonda ise ilk yaşlarda basınç mukavemetleri daha düşük olurken 3 ay veya daha ileri yaşlarda daha yüksek olabileceği; silis dumanı kullanılması halinde ilk yaşlardaki beton mukavemetlerinin de yüksek olarak kontrol betonunkini geçebileceği ve uçucu kül ve/veya silis dumanı ile çok yüksek beton basınç mukavemetleri elde etmenin mümkün olacağı belirtilmiştir. Benzer bilgiler Balta'nın (III-1) ve Özkul ile Karagülerin (III-3) bildirilerinde de özet olarak yer almıştır. Özturan'ın bildirisinde ayrıca pozzolanların betonun elastik özelliklerini fazla değiştirmedikleri; yalnız silis dumanı içeren YDB'ların biraz daha gevrek oldukları; uçucu küller hidrolik rötreyi pek etkilemezken, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun arttırabildiği; sünme konusunda henüz yeterli bilgi olmadığı; tüm pozzolanların betonun geçirimsizliğini azalttıkları; çimento hamurundaki sürüklenmiş havayı azaltmalarına rağmen donmaya dayanımını etkilemedikleri açıklanmıştır. Bu üç bildiride pozzolan ve Portland çimentosu karışımının su ile reaksiyonunda açığa çıkan kirecin sulu ortamda pozzolandaki silis ile birleşerek çimentonun hidrasyon ürünlerine benzer CSH ürünleri oluşturduğu; bağlayıcı hamurdaki serbest kireç miktarının gittikçe azaldığı; daha az kalsit kristallerinin bulunmasının ve büyük boşluklu CH fazı yerine, küçük boşluklu CSH fazı oluşmasının betondaki kılcal boşluk miktarını azaltarak kimyasal etkilere karşı kalıcılığı arttırdığı; ve hamur-agrega geçiş bölgesi özelliklerini iyileştirerek basınç dayanımını arttırdığı da açıklanmıştır.

Yine Özturan'ın bildirisinde (III-6) C sınıfı (kireç içeren) uçucu küller veya silis dumanı katılmış betonlarda mukavemet kazanma hızının normal betonunkinden az olmadığı, bu betonların hem ilk çağlardaki, hem de 28 veya 56 cı günlerdeki mukavemetlerinin kontrol betonlarınkilerden yüksek olabildikleri ve bu nedenle ABD, Avrupa ve Avustralya'daki YDB uygulamalarının hemen hepsinde yüksek aktiviteli C-sınıfı uçucu küller, silis dumanı, veya her ikisi birlikte SAK ile beraber uygulanarak

0.25~0.35 gibi çok düşük s/c oranlarının iyi işlenebilir kıvamla sağlanabildiğine işaret edilmiştir.

Colleparadi, Kozanoğlu ve Yanardağ'ın bildirilerinde (I-7) ise endüstriyel bir yan ürün olarak ortaya çıkan silis dumanı malzemesinin betonda taze haldeki reoloji, sertleşmiş haldeki dayanım ve kalıcılık bakımlarından çok iyi sonuçlar verdiği ve talebi fazla, üretimi düşük ve fiyatı yüksek bir madde olduğu için genellikle ancak ÇYDB üretiminde kullanıldığı vurgulanmıştır.

3.4. YDB için Süper Akışkanlaştırıcı Katkı (SAK)

Balta'nın (III-1) belirttiği gibi son on yılda beton teknolojisinde meydana gelen en önemli gelişme SAK ların yaygın olarak kullanılması ve bunun getirdiği yüksek mukavemet olmuştur. Bu tür katkılar, çimento ve diğer mineral parçacıkların su içinde topaklanmasını engelleyip, ancak çok miktarda su ile elde edilebilecek işlenirliği, betona bir yan etki vermeksizin sağlarlar. Yüksek kalitede çimento, agrega ve mineral katkılarla birlikte kullanılmaları son on yılın içinde 60~80 N/mm² lık YDB sınıfının üretimini olağan hale getirmiştir.

Uyan ve Yıldırım (III-4) SAK'ları birleşimine göre: a) yoğun melamin-formaldehit-sülfonatlar, b) yoğun-naftalin-formaldehit-sülfonatlar, c) dönüştürülmüş liğnosülfonatlar, d) yukarıdakilere çökme kaybını önleyici sülfonik gurup veya karboksil gurubu karıştırılmışlar olarak sınıflandırmaktadır. Amerikan ASTM C494 standardında ise Tip F ve Tip G şeklinde ayırım yapılarak her iki sınıfta aranacak şartlar açıklanmıştır. Bu katkı maddeleri betondaki suda eridiklerinde, çimento danecikleri tarafından adsorbe edilerek onların yüzeylerinde ince bir film oluşturur ve film dışı doğru negatif yüklü olarak danelerin birbirini itmesine yani dispersiyona yol açıp kolay kaymalarına ve betonda işlenebilme özelliğinin artmasına neden olur. Bu katkılar suyun yüzey gerilimini normal akışkanlaştırıcılar kadar fazla düşürmedikleri için de aşırı miktarda hava sürüklemeyi ve onlara kıyasla daha yüksek oranlarda kullanılabilirler.

Balta'ya göre (III-1) SAK'ların ikinci bir yararı da erken yüksek dayanım sağlamalarıdır. Bu da yarattıkları yüksek dispersiyon sonucu daha çok miktarda hidratasyon oluşması ile açıklanabilir. SAK kullanımı ile çimento hamurunda toplam boşlukların biraz artmasına ve bunların boyutlarının büyüüp, aralıklarının biraz artmasına karşın donmaya dayanımın azalmaması, mukavemet ve yoğunluğun artması, geçirimsizliğin ise azalması yolu ile açıklanmaktadır.

Uyan ve Yıldırım (III-4) SAK'ların kullanılma oranlarının çimento ağırlığına kıyasla %0,5~3 arasında değer aldığını, bu nedenle kullanımlarının biraz pahalıya geldiğini, ancak su miktarını %12~35 oranlarında azaltmaya ve böylece düşük s/ç oranlı YDB lar elde etmeye imkan verdiklerini belirtmişlerdir.

Soylu ve Levy (III-9) betonda SAK kullanımı ile birlikte, C_3A 'sı düşük çimentolarla prizin gecikmesi; fazla hava sürüklenmesi, hızlı çökme kaybı; ve çözülme gibi zararlı yan etkilerin meydana çıkabileceğine dikkati çekerek beton üretimine başlamadan önce SAK-Çimento uyumunun araştırılmasını tavsiye etmişlerdir. Bu tür ön araştırmaların yapılması için geliştirilmiş uyuşma deneyi yöntemleri (hamur metodu) ilerde Bölüm 4.2' de ayrıca sözkonusu edilecektir.

Uyan ve Yıldırım (III-4) SAK kullanımı ile sağlanan yüksek işlenebilirliğin beton üretiminden 30~90 dakika kadar bir süre sonra azalarak kaybolduğunu, bu olaya çökme kaybı (slump loss) adı verildiğini ve çökme kaybının sıcaklığa, çimento dozaj ve türüne; su miktarına; katkının zamanına ve dozajına bağlı olarak değişebileceğini vurgulamışlardır.

Katkının 2/3 ünün ilk karma sırasında beton suyuna ilave edilmesi, geri kalan 1/3 ünün ise beton kalıbına dökülmeden hemen önce ilave edilip tekrar bir karıştırma yapılması tavsiye edilmektedir. Çevre sıcaklığının artmasının çökme kaybını arttırdığı, ve sıcaklık arttıkça daha yüksek oranda katkıya gerek olduğu da belirtilmektedir.

Yine aynı bildiride SAK'ların ayrışma ve terlemeye neden olmaları halinde, ince/kaba agrega oranı arttırılarak veya başka bir ince malzeme daha katılarak bunun önlenebileceği; SAK'lar ile üretilen akıcı betonların bilhassa pompa betonu için uygun oldukları, pompalama basıncını düşürerek pompalanacak miktarı ve mesafeyi arttırdıkları açıklanmaktadır. SAK kullanılan akıcı fakat yüksek viskoziteli betonlarda işlenebilirliğin çökme deneyi yerine, DIN 1048 de açıklanan yayılma deneyi yardımı ile ölçülmesinin de daha uygun olduğu ilave edilmektedir. Araştırmaların SAK'lı katkıların betonda rötreyi arttırmadıklarını gösterdiği, sünme konusunda henüz kesin sonuç olmadığı, s/ç oranı 0,40 dan az olmak şartı ile geçirimsizliğin çok az ve kalıcılığın yüksek olduğu ilave edilmektedir.

Uyan ve Yıldırım (III-4) ülkemizde piyasada satılan naftalin-formaldehit-sülfonat bileşimli üç ayrı SAK ile yaptıkları karşılaştırmalı deneylerde bunların 300 ve 400 dozlu betonlarda KPÇ 325 çimentosu ile aynı etkinliği farklı dozlarda verdiklerini, çökme kayıplarının 400 dozlu

betonlarda daha az olduğunu, tekrarlı dozlamamanın yarar sağladığını, her üç katkının betonun 28 günlük basınç dayanımlarında önemli artışlar sağladığını (% 20-36), 7 günlük basınç dayanımlarındaki artışların daha yüksek, eğilme mukavemetlerindeki artışların ise daha düşük oranda olduklarını saptayarak yayınlarda belirtilen hususları gerçekleştirmişlerdir.

4. YDB İÇİN KARIŞIM HESABI

4.1. Bileşim Receteleri

Kongreye sunulan bildiriler içinde rastlanan YDB ve ÇYDB reçeteleri toplu bir fikir vermek amacı ile aşağıdaki çizelgede özetlenmiştir.

Çizelge 1. deki 1 ve 2 no.lu satırlardaki reçetelerin karşılaştırılmasından çimento dozajını fazla arttırmadan, iyi bir normal betona SAK ve SD ilave ederek taze haldeki çökmesini 5~7 cm den 20 cm ve 28 günlük basınç mukavemetini $40\sim50 \text{ N/mm}^2$ den 101 N/mm^2 ye çıkarmanın mümkün olduğu görülmektedir. 3, 4 ve 5 no.lu satırlar ABD' deki ve Kuzey Deniz Platformlarındaki bazı uygulama örneklerini göstermektedir. 6 ve 7 no.lu satırlardaki reçetelerin karşılaştırılması YDB' larda doğal kaba agrega ile kalker kırma kaba agreganın aynı dozaj ve aynı işlenebilirlik için verdiği basınç mukavemetlerinin farkını belirtmektedir. Son olarak 7 ve 8 no.lu satırlardaki reçetelerin karşılaştırılması ise yine aynı dozaj ve aynı işlenebilirlik için SAK kullanımının s/ç oranı ve basınç mukavemetinde sağladığı farkları göstermektedir.

4.2. YDB'ların Karışım Hesabı Metotları

Özümeri ve Özden'in bildirilerinde (II-9) YDB'ların karışım hesaplarında gözönünde tutulacak esaslar şöyle özetlenmiştir :

1. Betondaki boşluk oranının azlığı, matris yapısının yoğunluğu ve kullanılan agreganın kalitesi, YDB'un kalitesini oluşturan ana öğelerdir. Düşük s/ç oranı, (0.2~0.4), SAK kullanımı ve silis dumanı veya uçucu kül gibi ince puzzolanların kullanımı da bu öğeleri sağlamaya yardımcı faktörlerdir.

2. Çimento dozajını arttırarak s/ç oranını düşürmek, istenmeyen yan etkilere neden olduğundan, bu amaç su miktarının azaltılması ile sağlanır. Bu durumda da karışımın kalıba kolay yerleşmesi için SAK'ların kullanımı zorunlu olur.

Çizelge 1. Karşılaştırmalı Olarak NB, YDB ve ÇYDB Receteleri

Sıra No	Beton Sınıfı	Kaba Agrega D_{max} mm	İnce Agrega	Çimento Türü	Çimento Dozajı kg/m^3	Silis Dumanı %	SAK %	s/c	Çökme cm	f'_{c28} N/mm ²	Bildiri No
1	NB	Kalker Kırma 20	Doğal Kum	PC55	410	-	-	0.441	5-7	40-50	I-5
2	ÇYDB	"	"	"	421	22	1.8	0.267	20	101	
3	YDB	Kalker Kırma 25.4	Doğal Kum	PC40	448.5	25	1.8	0.30	10	73	III-3
4	YDB ÇYDB	"	"	(?)	356	Çe- şitli	Çe- şitli	(?)	23	41-83	
5	ÇYDB	Feldspat Kuvars 19	"	PC65	440	5-10	21 t/m ³	0.36-0.40	22-25	70-110	III-6
6	YDB	Deniz Çakılı 25.4	"	DPC	560	-	-	0.35	7.5	54	
7	YDB	Kalker Kırma 25.4	Kalker Kırma	"	565	-	-	0.40	7.5	73	III-6
8	ÇYDB	"	"	"	565	-	0.40	0.36	7.0	90	

* C-tipi ucucu kül (?) - Bildiride açıklanmamış

3.-Agreganın kalitesi YDB'un kalitesini direkt etkiler. Agregası seçilirken su gereksiniminin az olmasına, en büyük dane boyutunun 22~25 mm den fazla ve 9,5~12,7 mm den az olmamasına, ideal granülometrilili ve toplu şekilli olmasına, su emmesinin uygun olmasına dikkat edilmelidir. Agreganın hamur ile aderans bakımından kalker kırma olması ve temiz ve sağlam bir taştan elde edilmesi yararlıdır.

Larrard ve Puch (III-2) YDB bileşimlerinin saptanması için Fransa'da Yollar ve Köprüler Merkez Laboratuvarında geliştirilmiş olan hamur metodu (L.C.P.C. Metodu) açıkladıkları bildiride, bu betonlara SAK ve SD gibi özel bileşenler de girdiği için direkt bir optimizasyonun yüzlerce deneme karışımı yapılmasını gerektirdiğini, bundan kurtulmak için bu özel bileşenlerin betonda yeraldığı çimento hamurunun bileşimi üzerinde deneysel araştırmalarla yetinmenin düşünüldüğünü açıklamışlardır. Agreganın oluşturduğu iskeletin ise, normal betonunkinden farklı olmayacağı kabul edilebilir. Hamur metodunda, önce bölge için uygun olan normal bir betonun bileşimi herhangi ampirik bir karışım hesabı metodu ile hesaplanır ve bu betondaki çimento hamuru hacmi esas alınır. Bu miktarın değişim sınırları azdır ve bu sabit tutularak, betondaki agregası iskeleti içine enjekte edildikleri farzedildiğinde aynı işlenebilirliği sağlayacak bir hamurlar grubu üzerinde akıcılık araştırmalarına başlanır. Deneylerde hamurların akıcılığı, dönüştürülmüş Marsh hunisinden, belirli miktardaki hamurun boşalma süresi ile ölçülür. Araştırmalar çeşitli SAK'lar, SD'ları ve YDÇ'larla tekrarlanarak sonuçları karşılaştırılır. Saptanması istenen en önemli noktalar uygun çimento/SAK çiftinin ve SAK ile SD'nın optimum dozlarının saptanmasıdır. Araştırmada izlenecek adımlar epey uzun olduklarından buraya alınamamıştır. Bildirinin aslından bunlar okunabilir.

Sonuçta sırf hamurlar üzerinde birtakım boşalma süresi deneyleri ile en düşük s/ç oranını verecek en iyi çimento/SAK çifti ve optimum SAK ve SD dozları saptanır. Bundan sonra istenirse Bölüm 4.3 de görülecek olan Féret 'den genelleştirilmiş Larrard formülü kullanılarak bu betonun vereceği basınç mukavemeti kestirilir. İstenirse de bu beton üretilip, gerek taze haldeki işlenebilirliği, gerekse de sertleştikten sonraki dayanımı deneyle bulunarak gerçekleştirir.

Soylu ve Levy'nin bildirisinde (III-9) Fransa L.C:P.C laboratuvarlarında geliştirilen bu birinci hamur, ve daha sonra Kanada da geliştirilen ve reopompa adı verilen bir aletle hamurun karıştırıldıktan sonra boşalma süresinin ölçüldüğü Sherbrooke Üniversitesi yöntemleri özetlendikten sonra; kendilerinin Lafarge Coppee Recherche'de geliştirdikleri, ve hamurun

2800 devir/dak. hızla dönen yüksek türbülanslı bir karıştırıcı ile 3 dakika karıştırıldıktan sonra boşalma süresinin ölçüldüğü yeni hamur yöntemi anlatılmıştır. Yöntemin SAK optimum dozundan başka, çeşitli bölgelerin agregaları, çeşitli çimentolar, değişik SAK'lar ve bunlarla çimentolar arasındaki uyuşmanın SD'lı ve SD'sız olarak araştırılmasına imkan verdiği belirtilmiştir. Ayrıca çimentoda bulunan serbest kireç ve potasyumun (CaO , K_2O) akıcılık üzerindeki olumsuz etkilerinin ortaya çıkarılmasını da sağlayabilmektedir.

4.3. YDB'lar İçin Basıncı Dayanımı Modeli

Normal betonların basınç dayanımının klasik Féret formülü yardımı ile kestirildiği malumdur. YDB'lar için Larrard (III-2) aşağıdaki yeni modelini önermiştir:

$$f_{c28} = \frac{K_g \times R_{c28}}{\left(1 + \frac{3.1 \times S/C}{1.4 - 0.4e^{-11 \times SD/C}}\right)^2}$$

Burada;

- f_{c28} : betonun 28 günlük ortalama basınç mukavemeti,
- S, C, ve SD: sırası ile lm^3 betona giren su, çimento ve silis dumanı ağırlıkları,
- K_g : agregası kalitesine bağlı bir sabit (normal agregada 4.91)
- R_{c28} : çimentonun standard basınç mukavemeti, dir.

YDB'larda $s/c < 0.40$ olduğu için formülün duyarlılığı 5 N/mm^2 mertebesindedir. $K_g \times R_c$ değeri deneysel olarak saptanmakta, silis dumanının boşluk doldurma etkisi, s/c yi düşürmesi ile, ve puzzolanik etkisi ise S.D./C terimi ile gözönüne alınmıştır. Paydadaki üs olarak bulunan 2 sayısı ise, betonun basınçta kırılması sırasındaki mikro-burkulma olaylarını yansıtmaktadır. Larrard formülünün gösterdiği sonuçlardan bir diğeri de bağlayıcı hamurun kalitesinin ve daneli iskelete oranla dozajının basınç mukavemeti üzerinde birinci derecede etkili olduğudur. Mukavemetin seçimi, bağlayıcı hamurun seçimini etkilemekte, sonrada betonun ekonomik olması için hamurun hacmi, istenen işlenebilirliği sağlayacak minimuma indirilerek karışım saptanmaktadır.

5. YDB'LARIN TEKNOLOJİSİ

5.1. YDB'ların Üretimi, Kalite Kontrolü ve Bakımı

Balta (III-1) ve Özümeri ve Özden (II-9) YDB için en iyi kalitede agrega, çimento ve katkıların sağlanıp kullanılmasını, itinalı işçilik ve bakım uygulanmasını, ilgililerin bu beton ile özel olarak ilgilenmelerini, kontrollük ve müteahhitliğin birbirleri ile sıkı ilişki içinde olmalarını tavsiye etmektedirler. İyi bir kalite kontrolü olmazsa, iyi boyutlama yapılmazsa, YDB'a harcanan paranın boşa gideceğine, s/c oranı azaldıkça basınç mukavemeti eğrisinin dikleşmesi nedeni ile düşük s/c oranlı üretimde gerek karma, gerekse de çimento ve katkı dozlarının kontrolüne çok önem verilmesine, ve bütün bu işler için uygun teknoloji seçilmesine işaret edilmektedir.

Çelik (III-6) özellikle sıcak havalı günlerde üretimin zorlaştığını, fazla çökme kaybı nedeni ile suyun arttırılması gerektiğinde dayanımın düşebileceğini, bakım sırasında da bir kısım su buharlaşıp betondan ayrılacak olursa, geri kalanın YDB'un hidrasyonuna yeterli olmayabileceğini vurgulamaktadır.

Arttırma ise bildirisinde (IV-3) 24 saatte erken yüksek dayanım elde etmek için $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ de ısıtıl işlem uygulanan deneylerde, PÇ 45 çimentosu, kalker kırma kaba agrega, doğal ince agrega, 550 kg/m^3 çimento dozu, %17.2 silis dumanı ve %22 katkı (3/5 SAK + 2/5 hızlandırıcı) kullanılan betonlarda 84 N/mm^2 lik yüksek dayanım elde edildiğini, aynı beton oda sıcaklığında kür edildiğinde ise bu dayanımının 53 N/mm^2 olduğunu açıklamaktadır.

5.2. YDB'ların Kalıcılığı (Dürabilite) ve Ömrü

Larrard ve Malier (I-5) fiziksel ve kimyasal bozulma mekanizmalarının çoğu yönünden YDB'ların iyi gözükmekte olduklarını vurguluyorlar. Su ve hava geçirimsizliği, klor iyonu difüzyon hızı azalmış, karbonatlaşma derinliği çok azalmış, ve malzeme, içindeki serbest suyun tümünü sarf edecek kadar yaşlandıktan sonra, donmaya karşı yüksek dayanım, hava sürükleyici katkıya gerek kalmadan oluşmuştur. Bu yazarlar bilhassa ÇYDB'un kalıcılığının, mühendislik yapıları için çok daha uzun ömürler sağlayacağını düşünmenin yanlış olmayacağı inancındadırlar ve yapılarımızın birçoğunda, yalnız bu yararın, ÇYDB seçilip kullanılmasına neden olabileceğini belirtiyorlar.

Collepari, Kozanoğlu ve Yanardağ bildirilerinde (I-7), (SAK+SD) hazır karışımı ile üretilen 350 dozlu beton numuneleri üzerinde yapılan kimyasal etkenlere dayanım araştırmalarını açıklamaktadırlar:

1. Sülfat içeren agregalarla üretilip, 28 günlük kür sonrasında 5°C su içinde tutulan numunelerden, katkısız olanlar kısa sürede bozulurken, (SAK+SD) içerenlerin 4 yıllık bakım süresi sonunda hala sağlam kaldıkları gözlenmiştir.

2. Normal agregalarla üretilip, 28 günlük kür sonrasında 5°C sıcaklığında %30 CaCl₂ çözeltisinde tutulan numunelerden katkısız olanlar birkaç gün gibi çok kısa süre sonunda dağılırken, (SAK+SD) içerenlerin 2 yıllık bakım süresi sonunda hala sağlam kaldıkları gözlenmiştir.

3. Reaktif agregalarla üretilip, 28 günlük kür sonunda %10 NaCl çözeltisi içinde tutulan numunelerden katkısız veya yalnız SAK'lı olanlarda alkali-agrega reaksiyonları sonucunda büyük genleşmeler gözlenirken, (SAK+SD) içerenlerin pek az genleştiği görülmüştür. Yani SD, alkali-agrega reaksiyonlarını önlemiştir.

Bu yazarlar (SAK+SD) katkılı betonların donatı korozyonunu önlemeleri konusunda da, betonda elde edilen boşluksuz, yoğun mikro yapı sayesinde, betonarmedeki pas payı kalınlıklarının azaltılabileceğini açıklamışlardır.

5.3. YDB'ların Fiatı

Larrard ve Malier (I-5) ÇYDB ların YDB lardan ve NB lardan daha pahalı olduklarını, m³ malzeme fiatlarına başka özel depolama, bakım ve işçilik masraflarının da eklendiğini, ancak yerleştirmenin kolaylaşması, kalıpların erken alınabilmesi, beton ve kalıp hacimlerinin azalması gibi bazı bakımlardan da ekonomi yapılması mümkün olacağından neticede YDB ların normal betondan daha ucuz olabileceğinin son zamanlarda iddia edildiğini vurgulamaktadırlar.

Gürlek ve Özturan (II-4) yaptıkları sayısal değerlendirmelerin sonuçlarına göre, yapıların kolonlarında kullanılan betonun mukavemeti arttıkça, toplam malzeme maliyetlerinde azalma olduğunu, bunun yüksek binalar için daha belirgin olduğunu, üst katlarda yüksek dayanım kullanımının gerekmediğini, ve YDB kullanılan binalarda alandan da kazanç sağlandığını belirtmişlerdir.

Özkul ve Karagüler ise bildirilerinde (III-3) 1990 ABD fiatları ile biri normal diğeri YD iki betonu karşılaştırarak :

$$NB \rightarrow f'_c = 21 \text{ N/mm}^2 \text{ Fiyatı} = 58.9 \text{ \$/m}^3$$

$$YDB \rightarrow f'_c = 96 \text{ N/mm}^2 \text{ Fiyatı} = 183.1 \text{ \$/m}^3$$

$$\text{Dayanım artışı} = \frac{96}{21} = 4,7 \text{ kat}$$

$$\text{Fiyat artışı} = \frac{183.1}{58.9} = 3,1 \text{ kat}$$

fiattaki artışın, dayanımdaki artıştan az olduğuna işaret etmişlerdir.

6. YDB'UN ÖZEL TORLERİ

6.1. Polimer İçeren YDB'lar

Balta'nın bildirisinde (III-1) bu tür malzemeler arasında en çok bilinenlerin PMMA, hidrolize PVA ve hidroksi-propil-metil-sellüloz olduğu açıklanmakta, bunların çimento hamuruna katılması ile, çimentonun bunlardan su alarak hidrate olduğu ve polimer matrisi ile içiçe bir çimento matrisi olduğu, polimerlerin betona yüksek plastik özellikler kazandırdığı, çökme ve eğilme dayanımlarını çok arttırdığı, ancak bunların suya dayanıklı olmayışı ve fiyat yüksekliği nedeni ile yalnız küçük özel parçalarda kullanılabildiği belirtilmektedir.

Akman'ın bildirisinde (III-8), normal koşullarda üretilen çimentolarla YDB larda sağlanabilecek basınç dayanımının bir üst sınırı olacağı öne sürülerek, bu alandaki araştırmaların ışığında, daha yüksek dayanımlara polimer emdirilmiş betonlarla varılabileceği sonucuna varılmıştır. PEB'lerin üretimlerinin ise klasik yöntemlerden çok farklı olduğuna ve aynı kolaylıkla her yapıda kullanılmayacağına, halen daha çok prefabrikasyon, onarım ve zararlı ortam şartlarında bunlardan yararlanıldığına dikkat çekilmiştir.

6.2. Liflerle Donatılı YDB'lar

Tokay, Ramyar ve Turanlı'nın ortak bildirilerinde (III-7) YDB ların gevrek davranış gösterme kusurlarını liflerle donatarak gidermek düşüncesi ile yaptıkları bir araştırmanın sonuçlarını sunmuşlardır. s/ç = 0.25,

cökme =2.3 cm, $f'_c = 60 \text{ N/mm}^2$ olan beton içine 1 kg/m^3 miktarında 20 mm boyda polipropilen lifleri, ve yine aynı beton içine %1,5 kadar 0,4 mm çap ve 30 mm boyda düz çelik lifleri katılarak hazırlanan prizmatik numunelerde basınç ve yarıлма dayanımları ile gerilme-şekil değiştirme diyagramları ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre polipropilen lifleri betonun basınç dayanımı %0,4-0,5 azaltmış, çekme mukavemetini %12-14 arttırmış, çelik lifler ise basınç dayanımını %1, ve çekme mukavemetini ise %35 arttırmıştır. Basıncıdaki gerilme-şekil değiştirme diyagramlarında da, alçalan kollarda, çelik lifler hali için çok daha sünek davranışlar gözlenmiş ve çelik liflerin YDB'larıdaki süneklik eksikliğini giderecek bir yöntem olabileceği kanısına varılmıştır.

7. YDB'LARIN GELİŞMESİ; UYGULAMA ALANLARI VE GELECEĞİ

Özkul ve Karagüler'in bildirisinde (III-3) YDB'ların kullanımındaki gelişme yıllara göre ve 28 günlük basınç dayanımı cinsinden

Yıl	$f'_{c28}, \text{N/mm}^2$
1960-70	40-50
1970-80	50-70
1980-90	70-110
1990-	110 -

şeklinde belirtilmektedir.

Larrard ve Malier (I-5) bu yeni malzemenin günümüzde yapılarda üç önemli alanda : a) çok yüksek yapılar, b) açık deniz platformları, c) köprüler, kabloları aderanslı ön gerilmeli profiller, Bow-string köprü kemerleri gibi mühendislik yapılarında kullanılmakta olduğunu, ve malzeme bilimindeki yeni gelişmeler yardımı ile YDB'da daha yüksek mukavemetlere, süneklik eksikliğine karşı daha iyi önlemlere ulaşılabileceğini, bunun sonucunda açıklıklar, konsol boyları v.b. gibi yapı karakteristiklerinin artacağını ve yapıda kullanılacak toplam malzeme miktar ve fiyatının ise azalacağını öngörmüşlerdir. Ancak yapıların tasarımı bu yeni malzemenin özelliklerinin, yerine getirilmesi istenen mekanik fonksiyonlar ve günümüzdeki inşa teknikleri yönlerinden yeni başta gözönüne alınması ile, çok daha büyük ekonomilere ulaşılabileceğini de vurgulamaktadırlar.

Atımtay'ın bildirisinde (II-2) NB'dan farklı yeni bir yapı malzemesi olan YDB'un bilinçli olarak kullanılabilmesinin yalnız yüksek dayanımına bakılarak mümkün olamayacağı, gerilme-şekil değiştirme diyagramı,

E-modülü, çekme dayanımı, yorulma, birim ağırlık, ısı iletkenliği, hidrasyon ısı, zamanla mukavemet artışı, donmaya dayanımı, rötire ve sünmesi gibi önemli mühendislik özelliklerinin tümü yönünden araştırılıp bilinmesine gerek olduğuna dikkat çekilmektedir.

Özümeri ve Özden (II-9) YDB üzerindeki araştırmaların başlangıçta malzeme özellikleri ile ilgili iken, sonraları bu betondan üretilmiş elemanların davranışlarının da ele alınmaya başlandığını ve en az 13 olarak sıraladıkları konularda yeni araştırmalar gerektiğine işaret etmişlerdir.

Balta ise bildirisinin (III-1) son bölümünü yeni gelişmekte olan düşük porozite çimentosu, polimer katkıları, sıcak presleme v.b. gibi teknolojilerin pratiğe adaptasyonu ile gelecekte çok çok daha yüksek kaliteli betonlar (ÇÇYDB) üretilebileceğini, ancak bunun sağlanabilmesi için de, karmaşık iç yapıları betonda mikro yapı ile özellikler arasındaki ilişkiler üzerinde daha fazla araştırmalara ve teknolojik gelişmelerin pratiğe yansıtılması için de, yaygın eğitime gerek olduğunu vurgulayarak bitirmektedir.