

# SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAVRAMI ANLAYIŞINDA BETON ENDÜSTRİSİNİN İRDELENMESİ

**Nihal ARIOĞLU**

Doç. Dr. Mim., İTÜ Mimarlık Fakültesi Yapı Malzemesi Birimi

**Dilek Dilhan HATİPOĞLU**

Yüksek Mimar, Doktorant

**M. Övül ARIOĞLU SALMONA**

Yük. Müh., Araş. Gör., Marmara Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü

**Ergin ARIOĞLU**

Prof. Dr. Müh., Yapı Merkezi Holding A.Ş. AR-GE Bölümü

İstanbul

## Özet

2000 yılı itibariyle çimento üretimi 1.48 milyar ton olup, bu üretime karşı gelen CO<sub>2</sub> emisyonu 1.48 milyar ton mertebesinde kestirilebilir. Aynı yıl için rapor edilen global CO<sub>2</sub> emisyonu ise 23.42 milyar ton/yıl'dır. (DEKTMK, 2002). Daha değişik anlatımla, çimento sektörünün global ölçekteki CO<sub>2</sub> salınımına katkısı %6.3 olmaktadır. Mehta 2002 çalışmasında, 2000 yılında 6 milyar kişi olan dünya nüfusunu ve 10.8 milyar ton olan beton tüketimini 2050 yılında sırasıyla 10.4 milyar kişi'ye ve 16 milyar ton/yıl'a tırmanacağını projekte etmektedir. Yaygın kullanılan beton sınıflarının bileşimi (%12 çimento, %80 ince + kaba agrega, % 8 karışım suyu -ağırlıkça-) dikkate alındığında, 2050 yılına karşı gelen beton bileşenlerinin tüketim değerleri anı sırada 1.92, 12.8 ve 1.28 milyar ton/yıl olarak hesaplanabilir. Dünya'da fert başına CO<sub>2</sub> salınımının 3.9 ton/yıl -2000- (OECD-IEA 2002) düzeyinde olduğu göz önünde tutulursa -global bazda etkin önlemler alınmadığı durumda- 2050 yılına CO<sub>2</sub> salınımı 40.56 milyar ton/yıl (%70 artış) olacak demektir. Kuşkusuz ki beton sektöründeki büyük boyutlu malzeme tüketimleri ve genelde artan CO<sub>2</sub> salınımları varolan ekosistemleri ve global iklim sistemi için çok ciddi bir tehdit oluşturacaktır.

Sürdürülebilir kalkınma yaklaşımının ana belgelerinden biri, "1992 Rio Çevre ve Kalkınma Zirvesi-İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi"dir. Bugüne değin anılan sözleşmeye imza atan 186 ülke, insan kaynaklı sera gazı (CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, katı partikül) emisyonlarını iklim sistemi üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmayı ve emisyonları belli bir düzeyde tutmayı taahhüt etmişlerdir. Bir başka deyişle, Rio Sözleşmesi, uzun vadeli ekonomik kalkınmanın tek seçeneğinin ancak çevrenin korunması ve geliştirilmesiyle mümkün olabileceğini belirtmektedir. Bu ise ancak ülkelerin; hükümetlerini, halklarını ve toplumun anahtar sektörlerini içine alarak, yeni ve eşitlik üzerinde temellendirilen küresel bir ortaklık ile yaşama geçirilebilecektir (Keatin, 1993).

Dünyanın en eski beton enstitülerinden biri olan ACI -Amerika Beton Enstitüsü- 1990'lı yılların başında global ölçekte tartışmaya açılan sürdürülebilir kalkınma paradigmasıyla beton teknolojisi arasındaki ilişkinin bütüncül bir yaklaşımla kurulması, ve ekosistemlere saygılı, sürdürülebilir malzemeler (uçucu kül, yüksek fırın curufu, silikafüme, pirinç kabuğu, geri kazanılmış agrega vb.) ile 21. yüzyılın dayanıklı-yeşil betonunun üretim ve uygulamalarını arttırmak amacıyla 2000 yılında bir çalışma komitesi oluşturulmuştur (Mathatra, 2002). Gerek ACI gerekse diğer araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen laboratuvar ve saha çalışmalarında şu sonuç açıkça ön plana çıkmıştır: 20. yüzyılda çok yaygın şekilde uygulanan "dayanım yolu ile dayanıklılık" anlayışına göre tasarlanan betonlar, özellikle

şiddetli çevre koşulları ve yükleme çevrimlerine maruz kalan yapılarda, ciddi hasarlara (yoğun çatlama problemleri, karbonatlaşma, korozyon vb) yol açmıştır. Bu nedenle, 21. yüzyılın beton sektöründe “dayanıklılık ile dayanım” ilkesi temel ölçüt olacaktır. Bu paradigmatik değişim sürdürülebilir kalkınma yaklaşımının ana prensipleriyle tamamen örtüşmektedir.

Bu bildiriye; ilkin, sürdürülebilir kalkınma paradigması ana hatlarıyla incelenmekte, daha sonra bir ayırım yapmaksızın genelde beton sektörünün ele alınan paradigma çerçevesinde gerçekleştirilmesi gereken “radikal değişiklikler”in altı çizilmektedir. Ayrıca, çalışma kapsamında geliştirilen birim m<sup>3</sup> beton üretiminde tüketilen enerji kWh, CO<sub>2</sub> emisyonu kg ve birim basınç dayanımı başına çimento tüketimi kg gibi kavramlar yardımıyla “çevre dostu beton” üretiminde elde edilebilecek potansiyel kazanımlar pratik örneklerle sunulmaktadır.

## Giriş

Beton, yirminci yüzyılın başından itibaren inşaat sektörünün vazgeçilmez ve en çok kullanılan malzemelerinden biridir. Beton endüstrisi bilimsel, mühendislik ve sosyal sıkıntılar açısından ele alındığında çevre, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik bağlamında sorunların devam ettiği izlenmektedir. Aslında genel olarak, malzeme ve enerji kaynaklarının küresel ısınmaya neden olacak şekilde savurgan tüketimi söz konusudur.

Günümüzde beton endüstrisinin çevre üzerindeki etkileri birçok gösterge (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, katı atık, v.b.) açısından gittikçe artmaktadır. Özellikle CO<sub>2</sub> emisyonlarının %8’inin beton üretiminden kaynaklandığı düşünüldüğünde, betonun çok dikkatli bir şekilde kullanımı ayrı bir önem kazanmaktadır. Gelecek kuşakların gereksinimlerini karşılayabilmelerini teminat altına alarak bugünün istek ve ihtiyaçlarını karşılamak şeklinde tanımlanabilen “sürdürülebilir kalkınma” çerçevesinde CO<sub>2</sub> salımının belirli bir düzeyde tutulması için pek çok ülke taahhütte bulunmuştur. Zira uzun vadeli ekonomik kalkınmanın tek seçeneği, ancak çevrenin korunması ve geliştirilmesidir. Bunun için de, Keatin’in dediği gibi ülkelerin, hükümetlerinin halklarını ve toplumun anahtar sektörlerini içine alarak yeni ve eşitlik üzerine temellendirilen küresel bir ortaklık ile yaşama geçirilebilecektir.

Diğer taraftan, doğal kaynakları oldukça fazla kullanan beton endüstrisi, sürdürülebilir kalkınmayı gerçekleştirmek durumundadır. Çünkü malzeme kullanım eğilimine bakıldığında, beton endüstrisinin desteklendiği izlenmektedir. Betonun yaşam döngüsündeki her aşamanın bir evrim geçirerek gelişmesi çabaları çoktan başlatılmıştır. Bunun için değişik ülkelerde komisyonlar kurulmuştur ve mühendislikte sürdürülebilirlik çalışmaları devam etmektedir. Bu bağlamda çimento azaltıcı malzemelerin kullanımı, uygun beton karışım oranlarının araştırılması ve geri dönüştürülmüş malzemeler ile betonun hem “sürdürülebilir” hem de “dayanıklı” olması için çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada, sürdürülebilirlik kavramının gelişimi incelenmiş ve beton endüstrisi bu kavram çerçevesinde irdelenmiştir. Sürdürülebilir beton eldesi için çözüm yolları;

- Kullanılan çimento miktarının azaltılması,
- Arıtılmış atık suyun karışım suyu olarak kullanılması,
- Geri kazanılmış agrega kullanımı

başlıkları altında incelenmiştir.

## 1. Sürdürülebilirlik Kavramı

*Sürdürülebilir kalkınma (sustainable development), sürekli ve dengeli kalkınma* olarak adlandırılır ve “Çevre değerlerinin ve doğal kaynakların savurganlığa yol açmayacak biçimde akılcı yöntemlerle, bugünkü ve gelecek kuşakların hak ve yararları da göz önünde bulundurularak kullanılması ilkesinden özveride bulunmaksızın ekonomik kalkınmanın sağlanmasını amaçlayan çevreci dünya görüşü” biçiminde tanımlanmaktadır. *Sürdürülebilir kalkınma* kavramının anlamına bakıldığı zaman, *sürdürülebilirlik (sustainability)* ve *kalkınma (development)* kavramlarının üzerinde durulması gerekir. Sürdürülebilirlik, bir şeyin sürekli olmasını; kalkınma ise, büyümeden farklı olarak, niceliksel bir değişimin, ilerlemenin ve iyileşmenin aynı zamanda niteliksel olmasını anlatır. Sürdürülebilir kalkınma anlayışının merkezinde, insan ile bugünkü ve gelecek kuşaklar arasındaki dayanışma ve adalet yer almaktadır.<sup>1</sup>

Sürdürülebilir kalkınma, 1980’li yıllardan başlayarak tüm dünyada çevre politikalarının belirleyicisi olmuştur. Etki alanı yalnızca çevre ile sınırlı kalmamış, ekonomik ve sosyal gelişme anlayışlarıyla da bütünleştirilmiştir. Bu kavramın tarihsel gelişimindeki başlıca dönüm noktaları aşağıda sıralanmıştır:<sup>1</sup>

- Birleşmiş Milletler Genel Kurulu’nun 28 Ekim 1982 tarihinde kabul ettiği *Dünya Doğa Şartı*’nda, sürdürülebilir kalkınma kavramı yer almamakla birlikte, insanların yararlandığı ekosistemlerin, organizmaların ve çeşitli doğal kaynakların sürdürülebilirliğini başarmak gereğinden söz edilmektedir.
- Sürdürülebilir kalkınma kavramı, asıl 1987 yılında Birleşmiş Milletler Çevre ve Gelişme Komisyonu’nun yayınladığı *Brundtland Raporu* olarak da bilinen *Ortak Geleceğimiz* adlı raporla tanınmaya ve yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır ve *sürdürülebilir kalkınma, gelecek kuşakların gereksinmelerini karşılama haklarını ellerinden almadan bugünkü kuşakların gereksinmelerini karşılamak* olarak tanımlanmıştır. “Teknik ilerleme, kurumsal yapılarda, yatırımlarda ve doğal kaynakların kullanımında bugünkü ve gelecekteki gereksinmelerin uzlaştırıldığı bir süreç” olan sürdürülebilir kalkınma kavramındaki *sürdürülebilirlik*, sosyal, kültürel ve siyasal kurumsal süreçler içeren, çeşitli göstergeleri olan çok boyutlu bir kavramdır. Bu raporda, sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması için nüfus artışının hemen durdurulması, üretim ve tüketimin temel gereksinmelere göre belirlenmesi, gıda maddelerinin sağlanması ve sürekli duruma getirilmesi, enerji kullanımında yenilenemez enerji kaynaklarının yoğun bir biçimde kullanımından kaçınılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmesi, doğal kaynaklara ve çevreye zarar vermeyen teknolojiler geliştirilmesi, bunun için araştırma ve geliştirme etkinliklerine önem verilmesi ve ekosistemin ve türlerin çeşitliliğinin yok edilmesi sürecinin durdurulması istenmektedir.
- 1992’de yapılan, ana konusu sürdürülebilir kalkınma olan *Rio Zirvesi*’nin sonunda kabul edilen küresel, ulusal, bölgesel ve yerel düzeydeki uygulamalara yön veren *Rio Bildirgesi, Gündem 21, İklim Değişikliği Sözleşmesi, Biyolojik Çeşitliliğin Korunması Sözleşmesi* ve *Orman Varlığının Korunması İlkeleri*’ne sürdürülebilir kalkınma anlayışı yansımıştır.
- 1994’te Kahire’deki *Birleşmiş Milletler Nüfus ve Gelişme Konferansı*’nda ve 1995’te Pekin’deki *Birleşmiş Milletler IV. Kadın Konferansı*’nda kalkınma ve büyüme konularına yer verilmiştir.
- 1996’da İstanbul’da yapılan *Birleşmiş Milletler İnsan Yerleşimleri Konferansı Habitat II*, Costa Rika’nın San Jose kentinde yapılan *Rio+5 Zirvesi* ve 2002’de yapılan *Rio+10 Konferansı* olarak da bilinen *Johannesburg Zirvesi* de, sürdürülebilir kalkınma politikalarının dönüm noktalarındandır.

Sürdürülebilir kalkınma, yalnızca gelişmekte olan ülkeler için önerilen bir model değil; zengini ve yoksulu ile tüm dünya devletlerinin uygulaması gereken bir anlayıştır. Ancak gelişmekte olan ülkelerde sürdürülebilir kalkınma politikalarının yaşama geçirilmesi, bunun için gerekli tüzel düzenlemelerin yapılması, kurumsal yapının oluşturulması ve kaynak sağlanmasında sorunlar ortaya çıkmaktadır. Sürdürülebilir kalkınmanın sosyal dayanışma, ekonomik yapabilirlik ve ekolojik sorumluluk hedeflerine ulaşmak için kullanılacak, sürdürülebilir kalkınmanın gerçekleşip gerçekleşmediğini izleme olanağı verecek ekonomik, sosyal ve ekolojik göstergeler vardır. Bunlar

arasında, araştırma-geliştirme ve teknoloji, üretim, tüketim, zararlı maddeler, *katı atıklar (katı atıkların geri dönüştürülme oranı)*, toprak, su, hava, iklim, alan kullanımı ve enerji de bulunmaktadır.<sup>1</sup>

Dünyanın pek çok ülkesinde ortaya çıkan çevre sorunlarının temelinde *ekonomi ve çevre arasındaki dengesizlik* yatmaktadır. İnsanlık, hızla gelişen bilim, teknoloji ve sanayi ile ekonomik açıdan yaşam kalitesini yükseltirken doğaya zarar vermektedir. Sürdürülebilir kalkınma, ekonomik kalkınmanın çevreye zarar vermeden sağlanmasını gerektirir. Doğal kaynaklar verimli kullanılarak, atıklar azaltılarak, kaynakların tekrar kullanımı sağlanarak gelecek nesillerin ihtiyaçlarına cevap verilmesi ve çevrenin sürekli şekilde korunması sağlanmış olacaktır.<sup>2</sup> Sürdürülebilir kalkınmanın ana prensibi, insanlığın ekonomik ve diğer işlevlerini doğanın kaynaklarına ve dayanma gücüne uydurmaktır. Sürdürülebilir kalkınmanın esası, tek bir cümlede özetlenebilir: *Tüm ürünlerin üretim yöntemleri, hiç atık malzeme üretilmeyecek şekilde kapalı ve geri dönüştürülebilir olmalıdır.* Atık ürünler yok edilmeli; üretim yöntemleri, üretimde ve ürünlerin kullanımında enerji tasarruflu olmalı ve zararlı yan ürünler meydana getirmemelidir. Bir toplumun sürdürülebilir kalkınma ilkelerine adaptasyonu, farklı ürünlerin kalitesinde ve yaşam süresinde bir artış ihtiyacını doğurur. Bunun nedeni, üretim ve yenileme masraflarının bakım masraflarına kıyasla fazla olmasıdır. Sürdürülebilir kalkınma ilkesinin uygulanması, ürünün işlevsel gereksinimleri yerine getirmedeki becerilerini vurgular, aksi takdirde servis ömrü gereksiz yere kısılır.<sup>3</sup>

Doğal kaynakların başlıca kullanıcısı olan beton endüstrisi, daha “sürdürülebilir” bir kalkınmayı gerçekleştirmek için önemli bir potansiyele sahiptir. Beton endüstrisi, değişimler geçirmektedir ve geleceğini etkileyen sorunlarla karşı karşıya kalmaktadır. Beton endüstrisi yok olmayacaktır; ancak betonun tasarımı, özellikleri, üretimi, dağıtımı, dökümü, bitirmeleri, geri kazanımı yakın bir zamanda değişecektir. Bu değişim, devrimsel olarak değil, evrimsel olarak gelişecektir. Malhotra ve Mehta'nın beton endüstrisinin sürdürülebilirliği ile ilgili ilk yayınları, sürdürülebilirlik meselelerine daha bilinçli ve katılımcı bir şekilde yaklaşmak konusunda endüstriyi uyarmıştır ve Amerikan Beton Enstitüsü'nde (ACI) sürdürülebilirlik hakkında bir komisyon kurulmuştur.<sup>4</sup> Ayrıca, İngiltere'de İnşaat Mühendisleri Enstitüsü'nün de son yıllarda “mühendislikte sürdürülebilirlik” üzerine çalışmaları ve yayınları mevcuttur. Danimarka'da yürütülen “yeşil beton” üretimi konusundaki çalışmalar da, minimal klinker içeriği, inorganik atıklar ve “yeşil” tipte çimento ve bağlayıcılar kategorilerinde, çevresel etkisi azaltılmış beton üretimini hedeflemektedir.<sup>5</sup>

## **2. Beton Endüstrisi Açısından Sürdürülebilirlik Kavramının İrdelenmesi**

### **2.1. Beton Malzemesinin Sürdürülebilirlik Açısından Taşıdığı Temel Özellikler**

Dünyadaki birincil yapı malzemesi olan beton, inşaat endüstrisinin çevre üzerindeki iyi veya kötü etkilerini belirleyici bir role sahiptir. Beton endüstrisinde çok yönlü bir hedef olan “sürdürülebilirlik”, çeşitli yaklaşımlar gerektirmektedir. İnşaat endüstrisi, toprağın ve hammaddelerin başlıca tüketicisi konumundadır.<sup>6,7</sup> Çıkarılan minerallerin çoğu, inşaat endüstrisinin ihtiyaçları için kullanılmaktadır. Bu işlem, çok miktarda arazi kaybına yol açmaktadır ve nüfusun yoğun olduğu merkezlere yakın olan veya peyzaj açısından değerli yerlerde yapılmaktadır. Toz, gürültü çıkmakta, ağır nakliyatlar gerekirken ve çok miktarda atık çıkmaktadır. Yapım ve yıkım malzemelerinin ve toprağın büyük bir kısmı, atık olarak son bulmakta ve kullanılmadan alanlara boşaltılmaktadır.<sup>6</sup>

Çok yüksek sıcaklıklar gerektiren işlemler ile ana ürün olan çimento üretilmektedir ve bu nedenle beton endüstrisi, çok önemli bir enerji tüketicisi ve sera gazları, diğer gaz ve partikül atıkların yayıcısı durumundadır.<sup>6</sup> Beton, bugünün dünyasında iyi inşa edilmiş çevre ve altyapı için temel oluşturmaktadır; ancak beton endüstrisi, çevre üzerindeki etkilerini çeşitli göstergeler (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, boşaltılan atıklar, çıkarılan mineraller, vs.) açısından 1994-2001 yılları arasında ton başına %17

arttırmıştır.<sup>8</sup> Beton, inşaat endüstrisinin, yapım ve yıkım atıklarında en fazla paya sahip bileşenidir. Agregaların ve üretilen çimentonun büyük bir oranı betonun içine girmektedir. Çimento, doğası gereği enerji yoğun ve CO<sub>2</sub> üreten bir malzemedir. Agregada çıkarma ise, toprağı yemektir ve çok ağır nakliyatlar içermektedir. Dünya genelinde CO<sub>2</sub> emisyonlarının %8'inin beton üretiminden meydana geldiğine inanılmaktadır.<sup>6,9</sup> Açıkça görülmektedir ki, beton üretiminin ve kullanımının dikkate değer bir çevresel etkisi mevcuttur. Beton, en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Aslında beton, aşağı yukarı her kullanıma göre değiştirilebilen bir malzemeler bütünüdür. Yerel olarak sağlanabilen geniş bir hammadde çeşitliliği kullanılarak dünyanın her tarafında yapılabilmektedir. Çevresel etkileri ve miktarının azaltılmasının önemi bilindiği halde, insanlık bugün ve öngörülebilir gelecekte betona muhtaçtır. Üstelik, betonun dikkatli ve akıllı bir şekilde kullanımı, çevreye yarar sağlayacaktır.<sup>6</sup> Çimento azaltıcı malzemeler, uygun karışım oranları ve geri dönüştürülmüş veya atık malzemeler ile betonun hem "sürdürülebilir" hem de "dayanıklı" olması sağlanabilmektedir.<sup>10</sup>

Arıoğlu ve Yılmaz'ın 2002 çalışmasında rapor edildiği üzere, fert başına düşen CO<sub>2</sub> emisyonları 32 ülke için araştırıldığında, bu ülkelerin yer aldığı regresyon analizinde şöyle bir eşitlik bulunmuştur: <sup>11</sup>

$$CO_2 = 3.325 X^{0.711}, r = 0.793$$

Burada;

CO<sub>2</sub> : fert başına CO<sub>2</sub> emisyonu (t/fert)

X : birincil enerji üretimi (t<sub>pe</sub>/fert)-petrol eşdeğeri-

Formülden görüldüğü gibi fert başına toplam enerji miktarı arttıkça, ülkelerin kullandıkları CO<sub>2</sub> emisyonu üstel olarak artmaktadır. Az gelişmiş ve gelişmekte olan güney ülkelerinin 21. yüzyılda büyümelerine artan şekilde devam edecekleri göz önünde tutulduğunda, enerji kullanımından kaynaklanacak hava kirliliğinin boyutunun ekolojik dengeyi zorlayacak düzeyde olabileceği kestirilebilmektedir.

Dünya ölçeğinde en çok kullanılan taşıyıcı yapı malzemesi olan beton, yaygın olarak kullanılan bir diğer taşıyıcı yapı malzemesi olan çelik ile kıyaslandığında; betonun daha ekonomik, daha az enerji tüketen, daha açık bir deyişle çok daha çevre dostu bir malzeme olduğu anlaşılmaktadır (Çizelge 1).

**Çizelge 1:** Beton ve çeliğin dayanımı, üretim maliyeti, enerji tüketimi, SO<sub>2</sub> ve üretim emisyonları.<sup>3</sup>

Özellik	Dayanım	Maliyet (indeks)		Enerji		SO <sub>2</sub>		Emisyon	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CH	Toz
		Maliyet/m <sup>3</sup>	Maliyet/f	GJ/m <sup>3</sup>	Enerji/f	kg/m <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> /f							
Betonarme	13.5	2.0	0.15	6.3	0.47	1.0	0.07	Beton	147	-	0.2	0.6	-	0.1
Çelik	240	100	0.42	236	0.98	14	0.06	Metal	3000	-	3.0	5.0	-	0.5

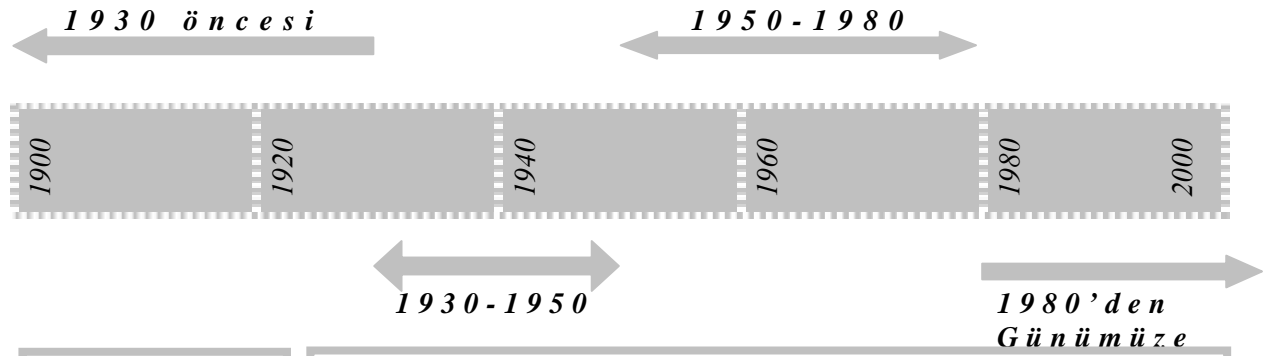
## 2.2. Beton Teknolojisindeki Tarihsel Değişime Kısa Bakış

Beton teknolojisinde 20. yüzyıl başından itibaren kat edilen gelişmelerin dönemsel olarak ana hatları ile kısa bir değerlendirmesi, topluca Çizelge 2'de görülmektedir. Bu çizelgenin hazırlanmasında [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20] numaralı kaynaklardan yararlanılmıştır.

**Çizelge 2:** Beton teknolojisindeki tarihsel değişim.

"Hazır beton" ilk defa, 1903 yılında Almanya'da, izleyen yıllarda ise, 1926'da Danimarka'da kullanılmıştır. 1930 öncesi portland çimentolu beton, düşük hızda mukavemet kazanmıştır; çünkü, iri öğütülmüştür (~1100 cm<sup>2</sup>/g) ve nispeten daha az miktarda C<sub>3</sub>S (trikalsiyum silikat) içermektedir. Çimento üreticileri, incelik ve C<sub>3</sub>S içeriğini arttırmak için

Hazır betonun hızla gelişmesi, betonun pompalama ile yerleştirilmesi, daldırma vibratörler ile sıkıştırma, 1970'te su azaltıcı katkıların gelişinden önce, taze betonun su içeriği artırılarak elde edilen yüksek kıvamlı beton karışımlarına ihtiyaç duyulmasına neden olmuştur. Hızlı inşaat programlarını sürdürmek amacıyla, erken dönemde yeterince yüksek dayanım elde etmek için genel amaçlı portland çimentosunda "incelik" ve C<sub>3</sub>S içeriğinde daha fazla artışa gidilmiştir. 1980'de ASTM Tip I portland çimentosu ile 31 MPa'lık dayanım, daha düşük çimento içeriği ve ağırlıkça 0.72'lik daha yüksek su/çimento oranıyla elde edilmiştir. Daha fazla geçiren olan bu beton, korozyona karşı daha dayanıksız çıkmıştır. "Çimento inceliği", C<sub>3</sub>S ve erken dayanım ile ilgili sınırlamalar olmadığı için betonun bozulması artmıştır. 1931'den 1973'e kadar beton, düşük elastisite modülüne ve erken dönemde yüksek sünmeye sahip, ısı ve kuruma rötesi gerilmelerinden çatlamaya daha az eğilimlidir. 1970'lerin ortasından itibaren betonun çatlaması ve bozulmasının bir nedeni de, artan donatı korozyonuna karşı betonun geçirenliğini azaltmak için 1974'te AASHTO Standardı'nda yapılan bir değişikliktir. 1931'den 1973'e kadar, köprü tabliyeleri için minimum 28 günlük basınç dayanımı 20.7 MPa iken, 1974'te standartta minimum 28 günlük dayanım 30 MPa, ağırlıkça maksimum su/çimento oranı 0.445, minimum çimento içeriği 362 kg/m<sup>3</sup> olarak değiştirilmiştir. 1974'ten sonraki beton, yüksek ısı ve kuruma rötesi, düşük sünme ve erken dönemde yüksek elastisite modülü



1930'ların başlarında Norveç, İsveç, Fransa ve İsviçre'de "hazır beton" kullanılmaya başlanmıştır. Betonun bozulması; (donma-çözülmeden dolayı) ufalanma, sızıntı derzlerinden süzülme veya kötü sıkıştırılmadan dolayı meydana gelmiştir. 1944'te ABD'de betonun hızlı bozulmasının nedenlerini incelemek amacıyla 3-30 yıllık beton köprüler üzerinde yapılan bir araştırmanın sonucuna göre; 1930 sonrasında inşa edilen beton köprüler, daha erken inşa edilenler kadar dayanıklı çıkmamıştır. İnşaat teknolojisi aynı kaldığı halde, çimento inceliğinin artması problemin muhtemel nedenidir. Daha ince öğütülmüş çimentolar üretilmiştir. Ancak modern çimento, 25 yıl öncesinde üretilmiş iri öğütülmüş çimento kadar dayanıklı beton vermemiştir. 1945 çimentosu ve 0,47 su/çimento oranıyla betonun 28 günlük dayanımı 31 MPa olmuştur.

Bugün ASTM Tip I ve II çimentoları, %60'tan fazla  $C_3S$  içeriğine ve  $400 \text{ m}^2/\text{kg}$ 'dan fazla inceliğe sahiptir. 1994'te yapılan bir araştırmada, ASTM Tip I ve Tip II çimentolar arasında Tip II çimentosundaki daha düşük  $C_3A$  içeriğinden başka aslında bileşim ve fiziksel özellikler açısından hiçbir fark olmadığı görülmüştür. Bugün, ticari olarak bulunabilen portland çimentoları 28 günlük minimum ASTM gereksinimini 3 ila 7 gün içinde karşılamaktadır. İnşaat endüstrisinin hızlı programlarına uyan bugünün portland çimentoları, yavaş sertleşen ve daha dayanıklı eski portland çimentolarını pazardan çıkarmıştır. Su/çimento oranı, yüksek oranda su azaltıcı katkıları ile 0.3 düzeylerine kadar azaltılmıştır. Çok düşük su/çimento oranıyla inşa edilmiş birçok yapıda şiddetli çatlamlar olduğu bildirilmiştir. 1980'lerin başından itibaren, yüksek oranda su azaltıcı katkıları ve silis dumanı gibi son derece reaktif puzzolanların kullanımının artması, çok düşük su/çimento malzeme oranında yüksek işlenebilirliğe sahip beton karışımlar hazırlanmasına olanak sağlamıştır. Yüksek performanslı betonun laboratuvar numuneleri, 50 ila 80 MPa arasında 28 günlük basınç dayanımına ve çok düşük geçirgenliğe sahiptir. Erken dönemlerde yüksek dayanım ve yüksek elastisite modülü nedeniyle bu ürün, hızlı ilerleyen projelerde, yüksek yapılarda, köprülerde ve petrol üretim platformlarında taşıyıcı elemanlar gibi oldukça geniş kullanım alanları bulmuştur. Geçirimsizlik ve dayanıklılık aranan yerlerde yüksek performanslı beton kullanımı, önemli tartışmalara yol açmıştır. 1988'de, inşaat sürecinde kaliteyi artırarak dayanıklı beton yapılar kazanmak ve işçilik hatalarını tamamen ortadan kaldırmak amacıyla Japonya'da ilk defa "kendiliğinden yerleşen beton" geliştirilmiştir. Süperakışkanlaştırıcılar ve silis dumanı kullanıldığında, 1 günlük nemli basınç dayanımları 27.6 ila 55 MPa olarak elde edilmiştir. Bu betonlar, 1974'ten önce nominal bir betonun 20.7 MPa olan değerinin 3 ila 7 katına eşit 28.8 ila 35.8 GPa'lık 1 günlük elastisite modülüne sahiptir. Yüksek dayanımlı bu betonlar, önemli ölçüde azaltılmış sünme potansiyeline de sahiptir. Kırılgenlik, azaltılmış sünme potansiyeline ve gözlenen erken çatlaklar veya olağanüstü çatlamlar ile ilgilidir. Yüksek dayanımlı betonda, yüksek termal büzülmeden; yüksek çimento içeriği (su/çim.~0.3 ağırlıkça) ve hızlı hidrate olan Tip II çimento nedeniyle olan otojen rötreten dolayı erken çatlamlar meydana gelmektedir. Otojen rötreyi artırdığı bilinen silis dumanı eklendiğinde, bu beton karışımının çatlama eğilimi artmaktadır. Geleneksel betonda 50 milyonda birden az otojen rötre göz ardı edilebilirken, bu değer, yüksek dayanımlı betonda birkaç yüz milyonda bir olabilmektedir ve kuruma rötresi kadar yüksektir. Agregaya ile harç fazı arasında mineral (silica fume) katkısıyla, betonda stabil ve sağlam yapı oluşturulmuştur. Karışıma koyulan mineral katkıları (uçucu kül, silica fume) nedeniyle bozulan reolojik özellikler, geliştirilen "süper akışkanlaştırıcı" katkı maddeleriyle düzeltilmiş ve istenen "çökme" değerleri elde edilmiştir. Özellikle betonun kolaylıkla taşınması ve yerleştirilmesi bu tür katkı maddeleri yardımıyla olmaktadır. beton pompa ve kren tesisleri ile kayar kalıp tekniğindeki sürekli yenilikler olmaktadır. Bu gelişmeler ile beton, gerek dayanım, gerekse uzun vadede sağladığı performans ile yüksek binalarda ideal malzeme konumuna gelmiştir. ASTM Tip I çimentosunun 7 günlük basınç dayanımı, son 70 yılda (17'den 31 MPa'a) iki katına çıkmıştır. 1953'e kadar ASTM Tip II çimentolarının en azından %50'si 21 MPa'dan daha düşük dayanım gösterirken, 1994'te hiçbiri bu kadar düşük dayanım göstermemiş ve yaklaşık %50'si 31 ila 38 MPa oranında 7 günlük dayanım göstermiştir. 1996'da ABD ve Kanada'da 200,000 yeni inşa edilmiş köprüünün incelendiği bir araştırmada görülmüştür ki; 100,000'den fazla köprü tabiyasının hemen inşaatın sonra çapraz çatlaklar geliştirmiştir. Bu da esasen ısı büzülmeyle bağlantılıdır. Genel olarak çatlaklar, tam derinlikte ve köprüünün uzunluğu boyunca 1 ila 3 m aralıkla yerleşmiştir. Elverişsiz çevre şartları altında çatlak gelişmesi betonun geçirimsizliğini azaltmış ve donatı çeliğinin korozyon oranını ve betonun bozulmasını artırmıştır.

20. yüzyıl beton inşaat uygulamasından alınan dersler şunlar olabilir (Çizelge 2): 20. yüzyıldaki yerinde yapılan incelemelerin gösterdiği gibi, 1930'dan beri çimento ve beton dayanımları her yükseltildiğinde, bunu genellikle bozulma problemlerinde (karbonatlaşma, korozyon, iç yapıda ve dış yapıda çatlaklar) karşı bir artış izlemiştir. C<sub>3</sub>S içeriğindeki kademe kademe artış ve genel amaçlı portland çimentolarındaki incelik, bu çimentoların erken dönemlerde çok yüksek dayanımlar geliştirmelerini sağlamıştır. Eski beton karışımlarıyla kıyaslandığında çağdaş beton, daha düşük sünme ve daha yüksek ısıl rötre, kuruma rötresi ve elastisite modülü nedeniyle daha kolay çatlamaya eğilim göstermektedir. Betonda yüksek dayanım ve erken dönem çatlama arasında ters bir bağıntı söz konusudur. Şiddetli ajanların (su, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>,...) etkisine maruz kalmış beton yapıların çatlaması ve bozulması arasında sıkı bir bağlantı vardır. Beton yapıların erken bozulması, mevcut inşaat pratiği izlendiğinde bile gözlenmektedir. Bu da, yönetmeliklerde betonun dayanıklılık gereksinimleriyle ilgili bir yanlışlık olduğunu göstermektedir. Gerçek yapıların servis ömrü göz önünde tutulduğunda, betonun dayanıklılığı konusunda laboratuvar deneylerinin sonuçları ihtiyatla kullanılmalıdır, çünkü betonun çatlama davranışı büyük ölçüde numune boyutuna, kütleme geçmişine ve çevresel şartlara bağlıdır. Laboratuvar numuneleri küçüktür ve hacim değişimlerine karşı kontrollü değildir. Hızlı hidratlaşan çimento içeren zengin karışımların laboratuvar deneyleri, düşük geçirimsizlik değerleri verebilmektedir. Aynı beton karışım, gerçek bir yapıda kullanıldığında sık sık tekrarlanan ıslanma-kuruma, ısınma-soğuma ve donma-çözülme döngülerine maruz kalırsa dayanıklı çıkmayabilmektedir. Benzer koşullar altında, yüksek miktarda F ve C tipi uçucu küller veya ince öğütülmüş yüksek fırın cürüfları içeren, yetersiz bir şekilde kürlenmiş beton da yerindeki uygulamada çatlayacak ve bozulacaktır, oysa iyi kürlenmiş numuneler geçirimsizlik ile ilgili bir laboratuvar deneyinde mükemmel performans sergileyebilmektedirler.<sup>16</sup>

## 2.3. Sürdürülebilir Beton Eldesinde Çözüm Yolları

### 2.3.1. Kullanılan Çimento Miktarının Azaltılması

Çeşitli nedenlerden dolayı, beton endüstrisi “sürdürülebilir” değildir. Birincisi, beton endüstrisi büyük boyutlarda işlenmemiş malzemeler tüketmektedir. İkincisi, esas bağlayıcısı, üretimi küresel ısınma ve iklim değişimine karışan sera gazı emisyonlarına başlıca katkıda bulunan portland çimentosudur. Üçüncüsü, birçok beton yapı, endüstrinin kaynak verimliliği üzerinde olumsuz bir etkisi olan “dayanıklılık” eksikliğinin sıkıntısını çekmektedir. Yüksek miktarda uçucu küllü, yüksek fırın cürüflü beton sisteminin bu üç sürdürülebilirlik sorununa doğrudan hitap etmesinden ötürü, benimsenmesi beton endüstrisinin daha “sürdürülebilir” olmasına olanak sağlayacaktır.<sup>21,22</sup>

Beton endüstrisini daha “sürdürülebilir” kılmak amacıyla harcanan çabalar biri olan ve Dünya Sürdürülebilir Kalkınma Zirvesi ile bağlantılı bir üretim ortaklığı olan “Sürdürülebilir Çimento Girişimi”, Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi önderliğinde ve Portekiz Hükümeti, Japonya'daki BM Üniversitesi, önde gelen 12 çimento şirketi, WWF International, 15 ülkeden 25 sponsorun katılımı ile 1999'da kurulmuştur. Bu ortaklık, çimento fabrikalarının sürdürülebilir uygulamalar yapma çabalarını tanıtmakta ve kolaylaştırmaktadır. Ulusal hükümetlerin, şirketlerin ve sivil toplum kuruluşlarının yardımlarıyla iklim değişimi yönetimi, hammadde kullanımı, işçi sağlığı ve dahili çalışma süreçleri gibi konularda çimento şirketleriyle diyalog kurmaktadır. Dünya çimento kapasitesinin üçte birini oluşturacak sayıda şirket, bu girişimin üyesidir ve üç şirket bir CO<sub>2</sub> protokolünü uygulamaya başlamıştır.<sup>23</sup>

Geleneksel portland çimentolu beton ile kıyaslandığında, puzzolanik etki sağlayan katkılar, örneğin yüksek miktarda uçucu kül içeren betonun sağlayacağı yararlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:  
12,13,21,24, 25, 26

- Daha kolay akabilirlik, pompalanabilirlik, sıkıştırılabilirlik; daha iyi işlenebilirlik.

- Pozzolanic etki nedeniyle hamur-agrega ara yüzeylerinde daha stabil, daha az porlu bir yapı oluşması, böylelikle ileriki kür sürelerinde betonun dayanımının ve kimyasal dayanıklılığının artması.
- Çok ince malzeme katkısı ile betonun koheziv yapısının olumlu yönde değişmesi.
- Açığa çıkan hidratasyon ısısının düşük olması ile büyük hacimli beton dökümlerinde üstünlük.
- Üst bitirme gerekmediği zamanlarda daha iyi yüzey bitirme ve daha hızlı bitirme zamanı.
- Döşeme plakları için derzler ve daha düşük üst bitirme süreleri üzerinde uygun bir etkisi olan daha uzun priz süresi.
- Kalıbın erken alınması veya erken strüktürel yükleme istendiği zaman, karışım dizaynında uygun değişikliklerle hızlandırılabilen 7. güne kadar erken dayanım.
- 28. ve 90. günler veya daha sonrası arasında çok daha geç dayanım kazanımı. (Yüksek miktarda uçucu kül içeren beton karışımları ile, 7. ve 90. günler arasındaki dayanım artışı, çoğu kez %100'ü geçer, bu nedenle belirli bir dayanım ile ilgili daha yüksek tasarım yapmak gereksizdir.)
- Üstün boyut stabilitesi ve ısıl rötre, otojen rötre ve kuruma rötresinden olan çatlamalara karşı dayanım. Korunmamış betonda plastik rötre çatlağına daha fazla eğilim.
- İki veya altı aylık kürlenmeden sonra, daha yüksek elektriksel özdirenç ve klorür iyonlarının nüfuzuna karşı dayanım (ASTM C1202 Yöntemi'ne göre).
- Donatı korozyonuna, alkali-silika reaksiyonuna ve sülfat atağına karşı yüksek dayanıklılık.
- Daha düşük malzeme maliyeti nedeniyle daha ekonomik kazanımlar sağlaması ve son derece uygun yaşam dönemi maliyeti.
- Büyük miktarlarda uçucu külün ekolojik kullanımı, azaltılmış CO<sub>2</sub> emisyonları ve beton inşaat endüstrisinin kaynak verimliliği kazancı nedeniyle üstün çevre dostluğu.

Bir imalat endüstrisinin endüstriyel ekoloji uygulaması, kendi atık ürünlerini ve kendi üretim yöntemleriyle atıklarını geri dönüştüremeyen başka endüstrilerin atık ürünlerini kullanılabilir hale getirmek ve yeniden kullanmaktır. Depolanan endüstriyel atık ürünler geri dönüşümlü malzeme olarak kullanıldığında, betonun daha ekonomik üretilmesi olanağı da sağlanabilmektedir. Raporlara göre, her yıl 1 milyar tonun üzerinde yapım ve yıkım atığı meydana getirilmektedir. Atıkların çoğunu taze beton karışımlarında iri agreganın bir kısmının yerine kullanarak geri dönüştüren ekonomik teknolojiler mevcuttur. Kömür yakıtlı elektrik santrallerinden elde edilen uçucu kül ve demir endüstrisinden elde edilen yüksek fırın cürufu içeren harmanlanmış portland çimentosu, endüstriyel ekolojinin iyi bir örneğidir; çünkü birkaç endüstrinin çevresel etkisini azaltmak için uygun bir çözüm sunmaktadır. İnşaat endüstrisi, ağırlıkça %15-20 uçucu kül veya %30-40 yüksek fırın cürufu gibi, çimentonun yerine geçen malzemeler içeren beton karışımlarını şimdiden kullanmaktadır. Geleneksel malzemeler ve teknoloji ile, harmanlanmış çimentolu malzemenin ağırlıkça %50-60'ı kadar uçucu kül içeren yüksek performanslı beton karışımlar üretmek şimdi mümkündür.<sup>21</sup>

Uçucu küllerin betonda kullanılmasıyla ilgili, betondaki çimento azalımı ve buna bağlı olarak, birim MPa başına kullanılan çimento miktarına ilişkin bir sayısal değerlendirme aşağıda sunulmuştur. Çalışmada kullanılan karışım oranları ve dayanımlar ile ilgili ham veriler [27] numaralı kaynaktan alınmıştır. Burada, dökülen dörtgen kolonlar ile aynı karışım özelliğindeki silindir (150x300 mm) laboratuvar numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları verilmiştir. Kolon 1'de 365 kg/m<sup>3</sup> portland çimentosu (Su/(Çimento+Uçucu Kül) oranı; S/(Ç+UK)=0.45 -ağırlıkça-, kaba agrega=1200 kg/m<sup>3</sup>, ince agrega=600 kg/m<sup>3</sup>, hava sürükleyici=190 ml/m<sup>3</sup>), Kolon 2'de 125 kg/m<sup>3</sup> portland çimentosu (F tipi uçucu kül=155 kg/m<sup>3</sup>, S/(Ç+UK)=0.46 -ağırlıkça-, kaba agrega=1200 kg/m<sup>3</sup>, ince agrega=780 kg/m<sup>3</sup>, süper akışkanlaştırıcı=3 L/m<sup>3</sup>, hava sürükleyici=600 ml/m<sup>3</sup>), Kolon 3'te 170 kg/m<sup>3</sup> portland çimentosu (F tipi uçucu kül=220 kg/m<sup>3</sup>, S/(Ç+UK)=0.29 -ağırlıkça-, kaba agrega=1200 kg/m<sup>3</sup>, ince agrega=670 kg/m<sup>3</sup>, süper akışkanlaştırıcı=4 L/m<sup>3</sup>, hava sürükleyici=1400 ml/m<sup>3</sup>), Kolon 4'te 125 kg/m<sup>3</sup> portland çimentosu (F tipi uçucu kül=155 kg/m<sup>3</sup>, S/(Ç+UK)=0.41 -ağırlıkça-, kaba



agrega=1200 kg/m<sup>3</sup>, ince agrega=780 kg/m<sup>3</sup>, geciktirici özellikte süper akışkanlaştırıcı=3 L/m<sup>3</sup>, hava sürükleyici=350 ml/m<sup>3</sup>) kullanılmıştır.

İncelenen örnekte, uçucu küllü beton karışımlarının uçucu külsüz betonlara kıyasla sağlayacağı “üstünlüğü” analitik olarak gösterebilmek bakımından Çimento Miktarı/Basınç Dayanımı ve Çimento Kazanımı/Basınç Dayanımı Değişimi oranları tanımlanmıştır. İncelenen karışımlara ait söz konusu oranların kür süresine göre hesaplanan değerleri, topluca Çizelge 3’te belirtilmiştir. Şekil 1’de, karışımların basınç dayanımlarının kür süresine bağlı değişimleri; Şekil 2 (a)’da ve (b)’de ise, kür süresine göre Çimento Miktarı/Basınç Dayanımı ve Çimento Kazanımı/Basınç Dayanımı Değişimi oranları görülmektedir.

Şekil 1 ve 2 incelendiğinde şu sonuçlar elde edilmektedir:

- Sadece portland çimentosu içeren betonda 7 güne kadar basınç dayanımları, diğer incelemeye konu olan betonlara kıyasla daha büyük çıkmıştır. 91 gün kür süresinden sonra, uçucu küllü betonların basınç dayanımları, uçucu külsüz betona kıyasla daha yüksek dayanımlara ulaşmıştır.
- Birim MPa başına çimento miktarına bakıldığında, bütün bileşimler için artan kür süresiyle azalmaktadır. Çimento Miktarı/Basınç Dayanımı açısından bakıldığında, artan kür süresiyle sözü edilen büyüklük, tüm karışımlar için azalmaktadır. “Sürdürülebilirlik” (enerji tüketiminin azalması, emisyonların azalması, termal çatlakların azalması, dayanıklılığın artması) açısından bu faktörün elverdiği ölçüde düşük olması gerekmektedir. Sonuçlar bu açıdan irdelendiğinde, ileri kürlerde, en düşük çimento miktarı/basınç dayanımı oranı, 125 kg/m<sup>3</sup> çimento ve 155 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül içeren, S/(Ç+UK) değeri -ağırlıkça- 0.41 olan, 1200 kg/m<sup>3</sup> kaba agrega, 780 kg/m<sup>3</sup> ince agrega, 3 L/m<sup>3</sup> geciktirici özellikte süper akışkanlaştırıcı, 350 ml/m<sup>3</sup> hava sürükleyici içeren dördüncü karışımda gerçekleşmektedir.
- Çimento Kazanımı/Basınç Dayanımı Değişimi açısından incelendiğinde, söz konusu karışımlar kür sürelerine göre çok değişik performanslar sergilemiştir. Bu oranın ise, “sürdürülebilirlik” kavramı açısından elverdiği ölçüde en yüksek değeri alması gerekmektedir. Bu koşulları sağlayan beton da, 125 kg/m<sup>3</sup> portland çimentosu ve 155 kg/m<sup>3</sup> F tipi uçucu kül içeren, S/(Ç+UK) değeri -ağırlıkça- 0.46 olan, 1200 kg/m<sup>3</sup> kaba agrega, 780 kg/m<sup>3</sup> ince agrega, 3 L/m<sup>3</sup> süper akışkanlaştırıcı, 600 ml/m<sup>3</sup> hava sürükleyici içeren, ikinci karışımdır. Dördüncü karışım, Çimento Kazanımı/Basınç Dayanımı Değişimi oranında ileri kürlerde negatif değerlere düştüğü için bu çalışmada elde edilen sonuçlar açısından en uygun karışım, ikinci karışımdır.

**Çizelge 3:** Uçucu kül içeren ve içermeyen beton karışımlarının basınç dayanımları, birim basınç dayanımı başına kullanılan çimento miktarı ve birim basınç dayanımı değişimi başına kazanılan çimento miktarı.

Süre	Basınç Dayanımı, MPa				Kolon 1	Kolon 2		Kolon 3		Kolon 4	
	Kolon 1 Tip I Çimento	Kolon 2 Tip I Çimento + Uçucu Kül	Kolon 3 Tip I Çimento + Uçucu Kül	Kolon 4 Tip I Çimento + Uçucu Kül	Çimento Miktarı/ Basınç Dayanımı kg/MPa	<sup>(1)</sup> Çimento Miktarı/ Basınç Dayanımı kg/MPa	<sup>(2)</sup> Çimento Kazanımı/ Bas. Day. Değişimi kg/MPa	Çimento Miktarı/ Basınç Dayanımı kg/MPa	Çimento Kazanımı/ Bas. Day. Değişimi kg/MPa	Çimento Miktarı/ Basınç Dayanımı kg/MPa	Çimento Kazanımı/ Bas. Day. Değişimi kg/MPa
24 saat	10.3	1.6	8.4	2.5	35.44	<sup>(1)</sup> 78.13	<sup>(2)</sup> 27.59	20.24	102.63	50	30.77
48 saat	15.7	3.6	11.6	5.3	23.25	34.72	19.83	14.66	47.56	23.58	23.08
3 gün	-	5.1	15.6	8.4	-	24.51	-	10.90	-	14.88	-
4 gün	20.5	-	-	-	17.80	-	-	-	-	-	-
7 gün	22.3	8.4	18.9	13.1	16.37	14.88	17.27	8.99	57.35	9.54	26.09
28 gün	26.1	12.8	31.0	21.0	13.98	9.77	18.05	5.48	-39.79	5.95	47.06
91 gün	27.2	20.5	36.6	29.7	13.42	6.10	35.82	4.64	-20.74	4.21	-96.0
182 gün	31.3	22.7	40.9	34.0	11.66	5.51	27.91	4.16	-20.31	3.68	-88.89
1 yıl	31.1	27.5	41.4	36.6	11.74	4.54	66.67	4.11	-18.93	3.42	-43.64
2 yıl	38.1	28.6	45.7	-	9.58	4.37	25.26	3.72	-25.66	-	-

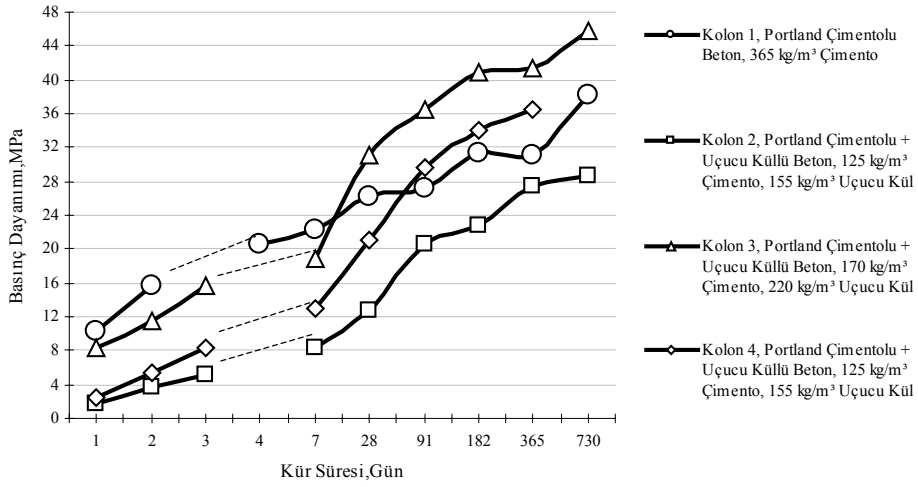
Not: Basınç dayanımları, üç deney sonucunun ortalamasıdır ve numuneler 150 x 300 mm boyutlarında silindirlidir.

(1) Kolon 2’de kullanılan çimento miktarı / belirtilen kür süresindeki basınç dayanımı (kg/MPa),

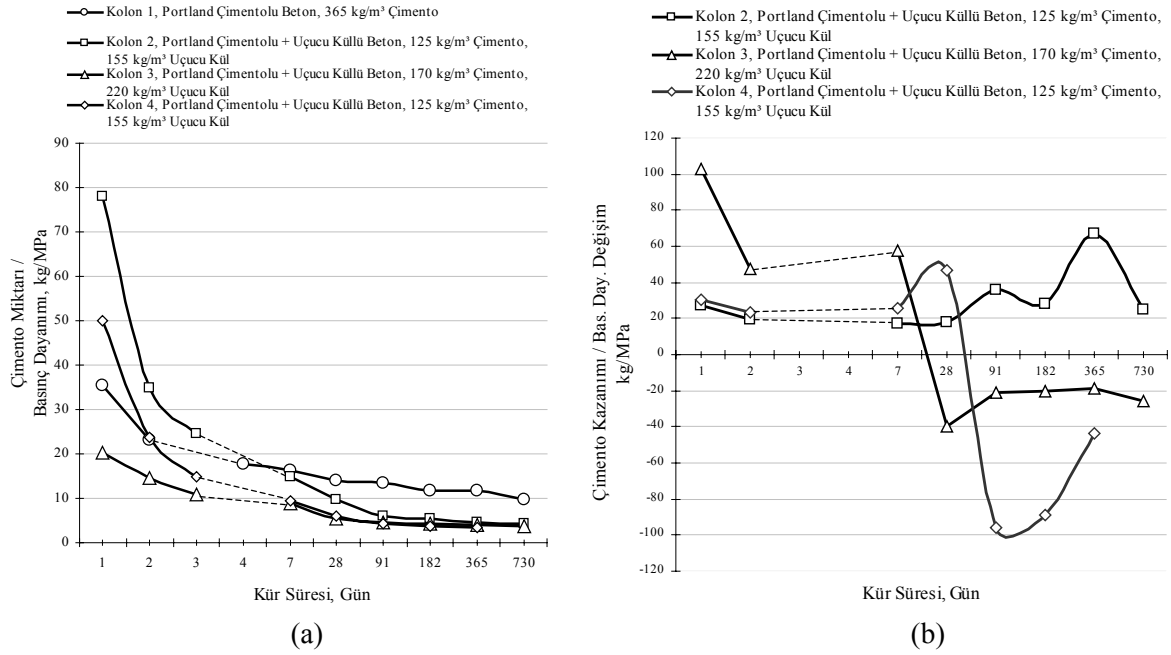
(2) Uçucu külsüz karışıma kıyasla çimento kazanımı / belirtilen kür süresinde uçucu külsüz karışımın basınç dayanımının uçucu küllü karışımın basınç dayanımına kıyasla değişimi (kg/MPa),

(3) Kullanılan çimento miktarı / 1 günlük basınç dayanımı (kg/MPa); 125 + 1.6 = 78.13 kg/MPa

(4) Uçucu külsüz karışıma kıyasla çimento kazanımı / 1. günde uçucu külsüz karışımın basınç dayanımının uçucu küllü karışımın basınç dayanımına kıyasla değişimi (kg/MPa);  
 $(365 - 125) = (10.3 - 1.6) = 27.59$  kg/MPa



**Şekil 1:** Uçucu kül içeren ve içermeyen beton karışımlarının basınç dayanımlarının kür süresine bağlı değişimleri.



**Şekil 2:** (a) Çimento Kazanımı / Basınç Dayanımındaki Değişim oranının kür süresiyle değişimleri, (b) Çimento Miktarı / Basınç Dayanımı oranının kür süresiyle değişimleri.

21. yüzyıl gelişim trendleri konusunda ipuçları taşıyan çok güncel literatüre bakıldığında, ıslak kalıplanmış beton bloklar ve kaldırım taşları gibi prekast dökümlü beton ürünlerin yapımında yüksek miktarlarda uçucu kül, taban külü ve kullanılmış dökümhane kumu kullanımını belirlemek amacıyla endüstriyel yan ürünler kullanan prekast beton ürünler ile ilgili bir araştırmanın yapıldığı görülmektedir. Burada, F Sınıfı uçucu kül, %0 (referans), 25 ve 35 oranlarında kısmi olarak portland çimentosunun yerine kullanılmıştır; taban külü, kullanılmış dökümhane kumu ile birleştirilerek %0 (referans), 50 ve 70 oranlarında doğal kumun yerine geçmiştir. Ticari bir imalat fabrikasında üretilen ıslak kalıplanmış beton duvar öğeleri üzerinde basınç dayanımı, donma-çözülme direnci, kuruma rötresi ve aşınma direnci için deneyler yürütülmüştür. Bütün ıslak kalıplanmış briketlerin, donma-

çözülme direncinin endişe edilmediği bölgelerde hem dış hem de iç duvarlarda, donma-çözülme direncinin endişe edildiği bölgelerde ise iç duvarlarda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Islak kalıplanmış kaldırım taşı karışımlarının hiçbiri, referans karışımı da dahil, ASTM gereksinimlerini tamamiyle karşılayamamıştır.<sup>28</sup>

### 2.3.2. Karışım Suyu Olarak Arıtılmış Atık Su Kullanılması

Endüstriyel atık sular ve içilemeyen sular, test yoluyla zararlı olduğu kanıtlanmadıkça, beton karıştırmak için şebeke suyunun yerine kullanılabilir.<sup>21,29</sup>

Evsel atık suyun ve biyolojik işleme bileşiminde yapılan arıtmanın karakteristikleri ile ilgili incelemeler, beton teknolojisinde kullanımı için uygunluğunu göstermektedir. Betonda karışım suyu olarak evsel atık suların kullanıldığı bir çalışmada; priz süresi, hava miktarı, özgül ağırlık ve mukavemet deneyleri çimento hamuru, harç ve beton numuneler üzerinde yapılmıştır. Sonuçlar, damıtılmış su ile yapılmış referans numunelerinin sonuçları ile kıyaslandığında, işlemden geçirilmemiş evsel atık suların erken priz süresini arttırdığını, hava sürüklediğini ve harcın ve betonun mukavemetini azalttığını göstermiştir ve bu nedenle, beton teknolojisinde kullanım için önerilmemektedir. Bununla birlikte, ortalama biyolojik işlemden geçmiş evsel atık sular, karışım suyu olarak damıtılmış sudan ayırt edilememektedir (Çizelge 5).<sup>30</sup>

Çok sınırlı sayıdaki araştırma sonuçlarına dayanarak 21. yüzyılın en önemli kaynak sorunlarının başında yer alan su hususunda, arıtılmış suların beton sektöründe kullanılması önemli bir kazanım getirecektir.

**Çizelge 4:** Evsel atık sular ile hazırlanan beton numunelerin deney sonuçları.<sup>30</sup>

Numune	Deney	Damıtılmış su	İşlemden geçmiş atık su	İşlenmemiş atık su	
Hamur	Erken priz	2 saat, 30 dakika	2 saat, 35 dakika	2 saat, 40 dakika	
Harç	Hava miktarı, %	11	11	14	
	SSD				
	Özgül ağırlık	2,16 (0,2)*	2,17 (0,2)	2,10 (0,3)	
	Basınç dayanımı, MPa				
	3 gün	23,7 (6,5)	23,0 (3,6)	21,4 (3,6)	
	28 gün	36,1 (4,2)	36,1 (6,0)	31,5 (3,8)	
Eğilme dayanımı, MPa	Eğilme dayanımı, MPa				
	3 gün	4,7 (5,5)	4,7 (2,8)	4,3 (5,4)	
	28 gün	6,1 (5,7)	6,1 (2,0)	5,6 (4,0)	
	Basınç dayanımı, MPa				
Beton	7 gün	43,7 (0,4)	43,4 (0,8)	—	
	28 gün	49,5 (0,6)	50,0 (0,8)	46,6 (0,3)	

\* Parantez içindeki sayılar, yüzde olarak değişim oranlarıdır.

### 2.3.3. Geri Kazanımlı Agregaya Kullanılması

Geri dönüştürülmüş yıkım betonunun yeni betonda agregaya kullanılması, İkinci Dünya Savaşı'nın sonunda başlamıştır. Geri kazanılmış beton agregalarının özelliklerine ve içinde kullanıldıkları betonun özelliklerine bakmak amacıyla pek çok araştırma yapılmıştır. Çalışmaların çoğunun sonuçları, üç durum raporunda (Nixon-1978, Hansen-1986,1992) kapsamlı olarak özetlenmiş ve tekrar gözden geçirilmiştir. Çalışmaların çoğunluğu, betonun mekanik veya mühendislik özellikleri üzerinde yoğunlaşmıştır ve geri kazanılmış agregayı doğal agreganın iri kısmının yerine kullanarak iyi kalitede beton üretilebileceği kanıtlanmıştır. Geri kazanılmış agregalı betonun durabilitesine ilişkin az sayıda çalışma yayınlanmıştır. Bildirilerin çoğu, betonun donma karşı dayanımı üzerinde yoğunlaşmıştır. Dayanımla olduğu gibi, betonun durabilitesi geri kazanılmış iri agregaya kullanımı ile biraz zayıflamış

gibi görünmektedir, ancak hem iri hem de ince geri kazanılmış agrega kullanıldığı zaman, dayanıklılıkta önemli bir azalma olmaktadır.<sup>31</sup>

1995 itibarı ile 17 ülkenin yıllık toplam agrega ve çimento üretim miktarlarına bakıldığında, çimento üretiminin artması ile agrega üretiminin doğrusal olarak arttığı anlaşılmaktadır.<sup>32</sup>

Türkiye’de ise, özellikle İstanbul ve büyük şehirlerde agrega temininde, rezervlerin hızla tükenmesi ve çarpık şehirleşmeden oluşan çevre problemleri nedeniyle problemler yaşanacaktır. Konut inşaat sektörünün büyüklüğü ve kalite denetiminin yetersiz olması, bu yapıların rehabilitasyonu ve yıkılması sırasında çıkacak betonların değerlendirilmesi için geri kazanılmış agrega sektörünün Türkiye’de de kurulmasını gerektirmektedir. “Dünyadaki Geri Kazanılmış Agrega Üretim Politikalarının Gözden Geçirilmesi ve Ülkemiz Açısından İrdelenmesi” başlıklı çalışmada, diğer ülkelerdeki geri kazanma oranları ve bu ülkelerde sektörü destekleyen politikalar irdelenmiş, agrega yönetimi, yıkım ve geri kazanma prosedürleri özetlenerek, Türkiye’de yapılacak çalışmalar için bir altyapı oluşturulmaya çalışılmıştır.<sup>33</sup>

Agrega geri kazanımı için muhtemel kaynaklar; yıkıntı betonu (yıkılan eski binalar, doğal afet yıkıntıları, yangın yıkıntıları), bozuk beton üretimi, beton santrallerinden elde edilen kalite kontrol numuneleri, prefabrikasyonda üretim artıkları ve uygun olmayan ürünler olabilir. Geri kazanılmış agregaların kullanım alanları ise şunlar olabilmektedir:<sup>33</sup>

- *80-200 mm beton agregaları* : Dolgu malzemesi olarak hidrolik işlerinde,
- *0-80 mm beton agregaları* : Standartları yerine getirmek şartı ile beton imalatında, yol inşaatlarında zemin malzemesi olarak, toprak dolgu malzemesi olarak ve sertleşmemiş zemin oluşturmak için park sahalarında,
- *Geri kazanılmış kum* : Çok az kullanılmakla beraber çoğunlukla yol kaplamalarının altında ya da yol alt temel yapısı olarak,
- *0-56 mm geri kazanılmış kargir* : Zemin dolgusu olarak ve sertleşmemiş zemin oluşturmak için park sahalarında,
- *Asfalt agregaları* : Yollar ve park alanları kaplamalarında.

### 3. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma çerçevesinde ele alınan konulardan üretilen belli başlı sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- 1980’li yıllarda, çevre değerlerinin ve doğal kaynakların akılcı yöntemlerle, bugünkü ve gelecek kuşakların hak ve yararları da gözetilerek kullanılması ilkesine bağlı olarak ekonomik kalkınmanın sağlanması amacıyla yönelik olarak başlatılan; merkezinde insan ile bugünkü ve gelecek kuşaklar arasındaki dayanışmanın yer aldığı; zengini ve yoksulu ile tüm dünya devletlerinin uygulaması gereken bir anlayış olan “sürdürülebilirlik” kavramı, giderek önem kazanmaktadır. Beton endüstrisi de, bu gelişmenin dışında kalmayarak sürdürülebilirlik kavramının isteklerine yanıt verecek şekilde, örneğin A.B.D.’deki Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) gibi komisyonlar ile 1990’lı yılların ortalarından itibaren bakış açılarını oluşturmak üzere çalışmalarını başlatmıştır.
- Beton endüstrisi, 100 yıllık dönemde kendi içinde birçok yeni teknolojiler üreterek uygarlığa katkı koymuştur (Çizelge 2). Beton endüstrisi, sürdürülebilirlik kavramı açısından yakından irdelendiğinde, bazı konularda yanıt vermemektedir. Bunun en temel göstergesi, inşaat sektörünün hızlı üretim ihtiyaçları nedeniyle yüksek dayanımlı çimento talebinin, beraberinde betonun uzun vadede dayanıklılığı (karbonatlaşma, korozyon, donma-çözünme, vs. direnci) açısından ciddi bir zaafiyet getirmesidir. Uzun ömürlü olan beton yapılar, uygulamada da görüldüğü gibi, proje ömürlerini doldurmadan ciddi onarım ve güçlendirme gerektirmişlerdir.

- Diğer sektörlerin atıkları olan uçucu küller, ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu, silika fümenin betonda büyük miktarlarda kullanılması, hem ekolojik olarak emisyonların azalması bakımından çimento miktarını azaltacak, daha değişik anlatım ile, sera gazları emisyonlarını global ölçekte azaltma imkanını sağlayacak; hem de betonun iç mikro yapısına dayanıklılık açısından çok büyük kazanımlar getirecektir. Bu mineral katkıların kullanılması ile daha ekonomik çözümler üretilmiş ve yapının topyekûn maliyeti azaltılmış olacaktır (Çizelge 3 ve Şekil 1). Kısaca, beton endüstrisinin 20. yüzyılda edindiği bilgi birikimi ve atıkların kullanılması, 21. yüzyılda betonu tartışılmaz olarak tüm yapı malzemeleri arasında en çevre dostu malzeme kılacaktır. Geri kazanımlı agregalar da, 21. yüzyıldaki bu gelişime yardımcı olacak diğer bir unsur olarak dikkat çekmektedir.
- 21. yüzyılın jeopolitik gündeminde su, tartışılmaz olarak önemli bir hammadde olacaktır. Küresel iklim değişikliklerinin getirdiği kuraklık olgusu, dikkate alındığında, suyun temini daha da önemli bir boyut kazanacaktır. Dünyada yıllık beton üretiminin yaklaşık 5 milyar ton<sup>22</sup> olduğu düşünüldüğünde, beton endüstrisinin global ölçekte yaklaşık 400 milyon ton su kullandığı söylenebilir. Beton karışım suyu süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri ile çok sınırlı ölçüde aşağı çekilebilmektedir. Çok büyük ölçüde su kazanımı için, şehirlerdeki arıtma sularının mutlaka beton endüstrisine geri kazandırılması gerekmektedir (Çizelge 4). 21. yüzyılın en değerli kaynağının su olacağı bir gerçektir. Belirtilen bu gerçek karşısında beton endüstrisi, atık suların geri kazandırılması konusundaki çalışmalarına başlamalıdır.

## Kaynakça

- [1] **Mengi, A.; Algan, N.**, Küreselleşme ve Yerelleşme Çağında Bölgesel Sürdürülebilir Gelişme – AB ve Türkiye Örneği, Siyasal Kitabevi, 2003, Ankara.
- [2] **Nemli, E.**, <http://www.kalder.org/genel/Esra%20Nemli%20Oturum%205E%20Windows%20XP.pdf>
- [3] **Penttala, V.**, “Concrete and Sustainable Development”, ACI Materials Journal V.94 No.5, September-October 1997, American Concrete Institute.
- [4] **Holland, T. C.**, “Sustainability of the Concrete Industry-What Should Be ACI’s Role?”, Concrete International, August 2003.
- [5] **Glavind, M., Munch-Petersen, C.**, “Green Concrete in Denmark”, Structural Concrete V.1 No.1, March 2000, p. 19-25.
- [6] **Nixon, P. J.**, “More Sustainable Construction: The Role of Concrete”, Proceedings of the International Conference on Sustainable Concrete Construction, University of Dundee, 9-11 September 2002, Scotland, UK.
- [7] **Griffiths, P. I. J., Smith, R. A., Kersey, J.**, “Resource Flow Analysis: Measuring Sustainability in Construction”, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Engineering Sustainability I56, Issue ES3, September 2003, p. 147-155.
- [8] **Collins, D.**, “Sustainable Development Progress-Cement and Concrete”, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Engineering Sustainability I56, Issue ES2, June 2003, p. 75-77.
- [9] **Nehdi, M., Rehan, R., Simonovic, S.P.**, “System Dynamics Model for Sustainable Cement and Concrete: Novel Tool for Policy Analysis”, ACI Materials Journal V.101 No.3, May-June 2004, American Concrete Institute.

- [10] **Dhir, R. K., McCarthy, M. J., Newlands, M. D.**, “Challenges in Designing Concrete Durability: A Sustainable Approach”, Beton 2004 Kongresi Bildirileri, 10-12 Haziran 2004, İstanbul.
- [11] **Arioğlu, E., Yılmaz, A. O.**, Zonguldak Kömür Havzası Gerçeği, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Zonguldak Şubesi, Mayıs 2002.
- [12] **Arioğlu, E., Manzak, O.**, “Çimento ve Beton Sektöründe Uçucu Kül Kullanımı”, Toprak İşveren Dergisi, Sayı 13, Mart 1992, İstanbul, s. 4-9.
- [13] **Arioğlu, E., Manzak, O.**, “İnşaat Sektöründe Uçucu Kül Kullanımının Ekonomik Analizi”, Prefabrik Birliği Dergisi, Sayı 22, Nisan 1992, Ankara, s. 25-33.
- [14] **Arioğlu, N.**, “Yüksek Binalarda Malzeme Kullanım Eğilimleri”, Yapı Dergisi, Ekim 1994, Yapı Endüstri Merkezi, p. 56-58.
- [15] **Arioğlu, Erdem, Arioğlu, N., Arioğlu, Ergin**, “Evaluation of the Engineering Properties of the Very High Strength Concrete (C170) Produced at the Yapı Merkezi Inc., Turkey”, 5th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Sandefjord, June 1999, Norway, p. 981-990.
- [16] **Mehta, P. K., Burrows, R. W.**, “Building Durable Structures in the 21st Century”, Concrete International, March 2001, p. 57-63.
- [17] **Goodier, C. I.**, “Development of Self-Compacting Concrete”, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures&Buildings I56, Issue SB4, November 2001, p. 405-414.
- [18] **Swamy, R.N.**, “Holistic Design: Key to Sustainability in Concrete Construction”, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures&Buildings I46, Issue 4, November 2001, p. 371-379.
- [19] **Arioğlu, E., Girgin C.**, “Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO) Üyesi ve Belli Başlı Ülkelerdeki, Hazır Beton Üretimlerinin İstatistiksel Değerlendirmesi”, Hazır Beton, Mayıs-Haziran 2003.
- [20] **Arioğlu, N., Girgin C., Arioğlu, E.**, Discussion of “New Strength Model Based on Water-Cement Ratio and Capillary Porosity – by K.S. Pann, Tsong Yen, Chao-Wei Tang, T. D. Lin”, May-June 2004, ACI Materials Journal.
- [21] **Mehta, P. K.**, “High Performance, High Volume Fly Ash Concrete for Sustainable Development”, Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, 21-24 May 2004, Beijing, China.
- [22] **Nehdi, M.**, “Sürdürülebilir Gelişme İçin Çok Bileşenli Çimentolar”, Çimento ve Beton Dünyası, Sayı 47, 2004.
- [23] **Starke, L.**, Dünyanın Durumu 2004, Sürdürülebilir Toplum İçin Worldwatch Enstitüsü Raporu, Çeviri: Ayşe Başçı Sander, TEMA Vakfı Yayını No:44,2004, İstanbul.
- [24] **Thomas, M. D. A., Matthews, J. D.**, “Performance of Fly Ash Concrete in U.K. Structures”, ACI Materials Journal V.90 No.6, November-December 1993, American Concrete Institute.
- [25] **Bilodeau, A., Malhotra, V. M.**, “High-Volume Fly Ash System: Concrete Solution for Sustainable Development”, ACI Materials Journal V.97 No.1, January-February 2000, American Concrete Institute.
- [26] **Obla, K. H., Hill, R., Martin, R.**, “HVFA Concrete – An Industry Perspective”, Concrete International, August 2003.

- [27] **Bisailon , A., Rivest, M., Malhotra, V. M.**, “Performance of High-Volume Fly Ash Concrete in Large Experimental Monoliths”, ACI Materials Journal V.91 No.2, March-April 1994, American Concrete Institute, p. 178-187.
- [28] **Naik, T.R., Chun, Y., Kraus, R.N., Ramme, B.W., Siddique, R.**, “Precast Concrete Products Using Industrial By-Products”, ACI Materials Journal V.101 No.3, May-June 2004, American Concrete Institute.
- [29] **Mehta, P. K.**, “Reducing the Environmental Impact of Concrete”, Concrete International, October 2001.
- [30] **Cebeci, O. Z., Saatci, A. M.**, “Domestic Sewage as Mixing Water in Concrete”, ACI Materials Journal V.86 No.5, September-October 1989, American Concrete Institute.
- [31] **Wainwright, P.J., Trevorrow, A., Yu, Y., Wang, Y.**, “Modifying the Performance of Concrete Made With Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates”, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, E & FN SPON, 1994, London.
- [32] **Arioğlu, N., Arioğlu, M. Ö., Arioğlu, E.**, “Crushed Prefabricated Concrete Elements As Recycled Aggregates For High Strength Concrete”, Proceedings of the International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones, 15-18 September 2003, İstanbul, İstanbul, Turkey.
- [33] **Arioğlu, E., Köylüođlu, Ö.S., Arioğlu, N.**, “Dünyadaki Geri Kazanılmış Agrega Üretim Politikalarının Gözden Geçirilmesi ve Ülkemiz Açısından İrdelenmesi”, I. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, 1996, İstanbul.