

Susuz Beton ve Türkiye Gerçeği

Gökhan TUNÇ¹, Duygu DEMİRTÜRK²

Öz

Susuz beton, modifiye edilmiş kükürtlü çimento ve agrega ana bileşenlerinden oluşan ve karışımında su bulunmayan özel bir beton türüdür. Bu çalışmada susuz betonun Portland çimento kullanılarak üretilen geleneksel betona göre sağladığı avantaj ve dezavantajlardan bahsedilmiştir. Makalede, susuz betonun tarihçesi, karışımında kullanılan malzemeler, üretim teknikleri, kullanım alanları ve Türkiye'deki kükürtün mevcut durumu gibi başlıklar altında genel bilgilere de yer verilmiştir. Ayrıca çalışmada geleneksel beton ile susuz betona ait maliyet karşılaştırması ürünün Türkiye'de üretileceği varsayımına dayalı olarak yapılmıştır. Makalede, Türkiye'de susuz beton üretiminin kükürt üretim miktarıyla doğrudan bağlantılı olduğu vurgulanmıştır. Çalışma sonucunda susuz betonun Türkiye'deki mevcut kükürt miktarının yetersiz olmasına bağlı olarak henüz üretilemediği üzerinde durulmuş, yapı sektöründe kullanımı için atılması gereken adımlardan bahsedilmiştir.

1. Giriş

Yapı malzemesi olarak kullanılan betonun tarihçesi çok eskiye dayanmaktadır. İlk uygulamalarını MÖ.300 ile MS.1453 yılları arasında gördüğümüz beton, yapı malzemesi olarak 1848 yılında İngiltere'de kurulan Portland çimento fabrikasından sonra çok daha yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır [1,2]. Betonun yapı malzemesi olarak kullanımın-

da malzeme biliminde yaşanan gelişmelerin büyük etkisi olmuştur. Gelişen malzeme bilimi, beton teknolojisinde de ilerlemeler kaydedilmesini sağlamıştır. Bu gelişmeler, günümüz inşaat sektöründe betonun vazgeçilmez yapı malzemesi olma özelliğini devam ettirmiş, taşıyıcı yapı malzemesi olarak betondan beklentilerin artmasına neden olmuştur. Temel

olarak betonda aranılan en önemli özellik yüksek mukavemetli olmasıdır. Bununla birlikte betonun; ekonomik ve estetik olması, kimyasal ortam koşullarına ve yangına karşı dayanıklılık göstermesi gibi aranılan özellikleri de bünyesinde barındırması beklenmektedir. Bu tür özellikler ise betonu Portland çimento kullanılarak üretilen geleneksel beton türünden farklı kılan özelliklerdir.

İlerleyen beton teknolojisi ile birlikte, betonda aranılan ilave özellikler başarılı bir şekilde elde edilmeye başlanmıştır. Elde edilen başarı beraberinde farklı amaçlara hizmet etmek üzere özel betonlar adı altında yeni beton türlerinin kullanımını da yaygınlaştırmıştır. Bu amaç doğrultusunda beton karışım hesabı ve üretiminde yapılan dış müdahalelerle özel beton üretiminin yapımına başlanmıştır. Özel beton üretimi ile ilgili yapılan çalışmalar, betonun yapı sektöründe vazgeçilmez bir malzeme olarak kullanılması özelliğini sağlamıştır. Beton üretim tekniklerinde ya da karışım hesabında yapılan birtakım müdahalelerle betona günümüzde de yeni özellikler kazandırılmakta ve içerdiği zayıf yönlerinin iyileştirilmesine dönük çalışmalar

Waterless Concrete and its Status in Turkey

Waterless concrete is a special type of concrete that does not contain any water but only consists of modified sulfur cement and aggregate. This article assesses the following key components: the history of waterless concrete, the components required for a waterless mix, manufacturing techniques, areas of use, and the current status of sulfur in Turkey.

In this study, a cost comparison between the production of waterless concrete and conventional concrete is also presented assuming that waterless concrete will be produced in Turkey. This article emphasizes the direct correlation between the quantity of sulfur produced in Turkey and the amount of waterless or sulfur concrete manufactured. The article concludes that waterless concrete is not yet feasible in Turkey because of inadequate sulfur resources. Changes are recommended in the construction sector to enable the use, practicality, and viability of waterless concrete.

kullanılması özelliğini sağlamıştır. Beton üretim tekniklerinde ya da karışım hesabında yapılan birtakım müdahalelerle betona günümüzde de yeni özellikler kazandırılmakta ve içerdiği zayıf yönlerinin iyileştirilmesine dönük çalışmalar

¹ Atılım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, gokhan.tunc@atilim.edu.tr (sorumlu yazar)

² Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, duygu.demirturk@gmail.com

Anahtar Kelimeler: Susuz beton, Modifiye edilmiş kükürtlü beton, Kükürtlü beton

devam etmektedir [3]. Bu makalede özel beton olarak da adlandırabileceğimiz susuz beton (kükürtlü beton) hakkında detaylı bilgi verilecek ve susuz betonun dünyadaki ve Türkiye'deki gelişim süreci ile birlikte mevzuat ve yönetmelikleri birlikte incelenecektir. Ayrıca makalede, susuz beton üretiminin Türkiye'deki mevcut durumu irdelenecek ve bu ürünün ülke ekonomisine sağlayacağı olumlu katkısı araştırılacaktır.

2. Susuz Betonun Tanımı

İnşaat sektöründe kullanılan en yaygın beton türü geleneksel betondur. Geleneksel beton; çimento, su ve agrega ana bileşenlerinden oluşan betondur. Susuz beton ise adından da anlaşılacağı üzere bağlayıcılık özelliği açısından etken role sahip olan suyun bulunmadığı beton türüdür [4]. Susuz beton, dış görünüm itibarıyla geleneksel betona benziyor olsa da üretim ve yerleştirme tekniği, karışım hesabı ve kullanım alanları gibi özellikleri sebebiyle nispeten yeni bir malzemedir [3].

Bu beton türünde çimento ile suyun birleşiminden ortaya çıkan bağlayıcılık özelliği kükürt elementiyle sağlanmaktadır [5]. Kükürt ise ya doğal ham madde kaynağı ya da taşıdığı uçuculuk özelliği sebebiyle yan sanayi ürünü olarak elde edilmektedir [3]. Kükürt üretiminde başı çeken Çin ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) gibi ülkelerde yıllık toplam üretimin büyük bir kısmı doğal rezerv kaynaklarından sağlanmaktadır [6]. Doğal ham madde kaynağı olarak zengin maden yataklarından çıkartılan kükürt, 2013 yılı verilerine göre yıllık 10,5 milyon ton üretim miktarı ile en çok Çin'de üretilmektedir. Çin'i 9,2 milyon ton ile ABD takip etmektedir [6]. Bunun yanında dünyada kükürt üretiminde söz sahibi olan fakat kükürt üretiminin neredeyse tamamına yakını yan sanayi ürünü olarak sağlayan Katar gibi petrol üreten ülkelerde bulunmaktadır [7]. Katar'ın 2012 yılı itibarıyla yan sanayi ürünü olarak toplam 4 milyon ton kükürt üretimi yaptığı resmi kayıtlarda yer almaktadır [7].

Susuz beton, içerdiği kükürt nedeni ile kükürtlü beton olarak da adlandırılmaktadır [3-5]. Bu makale içerisinde bahsedildiği yere uygun olarak susuz betona ait farklı adlandırmalar kullanılacaktır. Fakat adlandırmalardaki farklılık ürünün içerik veya fiziki yapısında herhangi bir değişiklik yaratmayacak olup aynı ürünü tarifleyecektir.

3. Susuz Betonun Tarihçesi ve Gelişimi

Susuz beton ya da diğer adıyla kükürtlü beton üretme fikri kısmen yeni bir fikir olmakla birlikte tarih öncesi zamanlarda eriyik haldeki kükürtün bağlayıcılık özelliğinin kullanılarak metalin taşa ankraj edilebildiği literatürde yer almaktadır

[8,9]. Susuz beton üretim teknolojisindeki ilk kayda değer gelişmelere 1970'li yıllarda yapılan çalışmalarda rastlanmaktadır [3]. Susuz beton teknolojisinin tarihçesi incelenirken göz önüne alınması gereken ana parametre betonu oluşturan ve su ihtiyacını ortadan kaldıran kükürt malzemesidir. Bu malzemenin beton teknolojisinde kullanımını sağlayan tarihi süreç kronolojik sıra ile aşağıda yer almaktadır. Susuz betonun tarihi gelişimi incelenirken öncelikle bu betonun ana ham maddesi olan kükürt irdelenmiş ve ardından susuz betonun üretiminde kullanılan beton teknolojisinde sağlanan gelişmeler aktarılmıştır.

ABD Maden İşleri Dairesi ve Kükürt Enstitüsü, 1971 yılında kükürtün kullanımı ile ilgili araştırma ve geliştirme kapsamında ortak bir çalışma başlatmıştır. Yapılan detaylı çalışmaya göre kükürtün yapı malzemesi olarak kullanılması kararlaştırılmıştır. ABD Maden İşleri Dairesi, kükürtün ticari amaç doğrultusunda 1976 yılından önce kullanılmaya başlanmasını hedeflemiştir. 1972 yılında ise Kanada Mineral ve Enerji Teknolojisi Merkezi ile Kanada Ulusal Araştırma Konseyi, araştırma programlarına kükürtün yapı malzemesi olarak kullanılmasını almışlar ve bunu Kanada'daki diğer üniversiteler takip etmiştir. Beton ile ilgili ilk ciddi test çalışmalarına ise 1977 yılında ABD Maden İşleri Dairesi ile Kükürt Enstitüsü'nün ortaklaşa üstlendiği program kapsamında başlanmıştır. Bu program kapsamında, öncelikli olarak ön dökümlü yapı elemanları olarak tanımlanan fayans, döşeme, depolar ve pompa istasyonlarının temelleri test edilmiştir. 1978 yılına gelindiğinde ise saha testlerine ağırlık verilmiş fakat saha testlerinden, yüklenici firma çalışanlarının teknik yetersizlik ve deneyim eksikliklerinden kaynaklanan nedenler dolayısı ile olumsuz sonuçlar elde edilmiştir. 1979 yılı kışında ise her biri 1.730 kg ağırlığında olan toplam 750 adet kanalizasyon borusu Kanada'nın Alberta eyaletinin kuzey bölgesinde yer alan sahada başarı ile dökülmüştür [3].

1980 yılında toplam 110 adet 107 cm çapa sahip polimer katkı kükürt betondan üretilen doğal gaz borusu suyun hidrostatik kaldırma etkisinden maksimum düzeyde yararlanmak amacı ile üretilmiştir. 1982 yılında ABD'nin Illinois merkezli SULCON firması özellikle Kükürt Enstitüsü tarafından geliştirilen kükürt beton teknolojisini bir sanayi tesisinin temelini iyileştirme çalışması kapsamında kullanmıştır. 1983 ile 1986 yılları arasında ise Brown and Root adlı ABD'nin Houston, Texas merkezli firma, bir sanayi tesisine ait iki adet betonarme döşemeyi kükürtlü beton kullanarak üretmiştir. 1991 yılında Arizona'da yer alan bir sanayi tesisinin gelişme projesinde tamamı ile polimer katkı kükürt kullanımına karar verilmiştir. 1992 yılında ise Gü-

ney Afrika Cumhuriyeti'nde yer alan bir projede bulunan atık drenaj boruları kükürtlü betondan oluşan yeni drenaj boruları kullanılarak değiştirilmiştir. Kükürtlü beton kullanımına ait bir diğer proje ise 1996 yılında Güney Amerika Kıtası'nda yer alan Şili'de gerçekleştirilmiştir. Aynı yıl içerisinde Kanada'nın British Columbia eyaletindeki Trail şehrinde yer alan bir çinko madeni üretim tesisinde kükürtlü beton uygulanmıştır. 2000'li yıllarda ise kükürtlü beton kullanımı dünyanın belli başlı ülkelerinde yaygınlaşmaya başlamıştır. Nippon Petrol Şirketi tarafından geliştirilen yeni teknoloji ile üretilen kükürtlü beton hem Japonya hem de Birleşik Arap Emirlikleri'ndeki birçok projede özellikle 2000'li yılların sonuna doğru yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır [3].

Susuz beton üretme fikri ayrıca NASA'nın 2020 yılı hedefleri arasında gösterilen Ay'a insanlı yolculukların yeniden başlatılması ve Ay ortamında kalıcı bir Ay üssü yapılması fikri ile de gündeme gelmiştir [10]. Bu tür üs yapımı için kullanılacak yapı malzemeleri hakkında literatürde pek çok araştırma yer almaktadır [4,5,10]. Betonun diğer malzemelere kıyasla Ay ortamındaki ışımaya, radyasyon ve toz parçacıklarından kaynaklı aşınma problemleri gibi olumsuz çevre koşullarına karşı daha dayanıklı ve uyumlu olacağı uzmanlar tarafından öngörülmüştür [4,5,10]. Bunun üzerine bilim insanları öncelikli olarak beton üretimi için gerekli ana malzemelerin Ay'da var olup olmadığı konusu üzerine odaklanmıştır. Yapılan araştırmalar, çimento ve agrega temini için Ay toprağı olarak bilinen Regolit tabakasının yeterli olacağı fikrini öne sürmüştür [10]. Ay'da suyun varlığı hakkında kesin bir bilgiye henüz ulaşılmamakla birlikte literatür çalışmaları incelendiğinde birtakım yöntemlerle suyun elde edilebileceği (ayrıştırma yöntemi, kutup bölgelerinin karanlık noktalarında bulunan buzullardan suyun temini gibi) fikri gündeme gelmiştir [11,12]. Fakat bu yöntemlerle elde edilen suyun üs inşasında kullanılması yerine astronotların ya da Ay'a giden araştırmacılar için kullanılması fikri doğal olarak daha ağır basmıştır. Suyun, Ay başta olmak üzere diğer gök cisimlerinde elde edilmesinin bu denli zor olduğunun farkında olan bilim insanları ise su kullanmadan beton üretiminin yapılıp yapılamayacağı üzerine araştırmalar yapmaya başlamışlardır. Bu noktada, araştırmalar suya nispeten Ay'da daha çok bulunan ve bağlayıcılık vazifesi görecek malzemeler üzerine yoğunlaşmıştır [13]. Sonuç olarak, yürütülen bilimsel çalışmalar su yerine alternatif olarak kükürt kullanabileceğini göstermiştir [13]. Konuya ilişkin olarak, H. A. Toutanji, 2005 yılında kükürtlü betonun alternatif bir yapı malzemesi olarak Ay'daki uygulamalarda kullanılabilirliğini yaptığı deneysel çalışmalarla göstermiştir [5].

4. Susuz Beton Karışım Hesabı

Bu bölümde susuz beton karışım hesabı için modifiye edilmiş çimento ve agregalar olmak üzere iki ana malzemeden bahsedilecektir. Kükürtü çimentolar, ısı değişimleri sırasında yaşanan genleşme ve büzülme azaltmak bunun yanında dayanıklılığı ve stabiliteyi arttırmak amacıyla modifiye edilirler [3,14]. Modifiye edilmiş kükürtlü çimento elde etmek için pratikte birçok yöntem kullanılmakla birlikte bu çalışmada Kuzey Amerika'da hâlihazırda kullanılan iki yöntemden bahsedilmiştir [14]. Bu iki yönteme ait çimento özelliklerini içerik tablo aşağıda yer almaktadır (Bakınız Tablo 1).

Tablo 1. İki farklı yöntemle modifiye edilmiş çimento özellikleri [14]

İçerik	Yöntem-1	Yöntem-2
Kükürt (Ağırlık olarak)	% 95 ± 1.0	% 80
Karbon (Ağırlık olarak)	% 5 ± 5.0	% 18
Hidrojen (Ağırlık olarak)	% 0,5 ± 0.05	% 2

Modifiye edilmiş kükürt kullanılarak yukarıdaki her iki yöntem ile elde edilen çimento tiplerinin öngörülen raf ömrü oldukça uzundur. Ancak aynı durum modifiye edilmiş kükürtün eriyik hali için geçerli değildir. Bu yüzden tedarikçilerin konuya ait önerileri ve talepleri göz önünde bulundurularak ürünün üretimine dönük gerekli iyileştirmeler yapılmalıdır [14].

Susuz beton karışımında karışımı oluşturan agregaların fiziksel ve kimyasal özellikleri çok önemlidir. Karışımında yer alan agregalar, ASTM C33 şartnamesindeki koşulları yerine getirmeli ve kimyasal etkilere (asidik ve tuzlu ortamlar gibi) karşı dirençli olmalıdır [15]. Örneğin; kuvarz tipi agregalar asidik ve tuzlu ortam koşullarına karşı uygun agrega türleri iken kireçtaşları ise tuzlu ortam koşullarına karşı iyi ancak asidik çevre koşullarına karşı ise dirençli değildir. Susuz beton üretiminde kırmataş, sahip olduğu dayanım sebebiyle yuvarlak yüzeyli agregalara göre daha çok tercih edilir. Karışımında gözenekli agregalar, geçirimsizliği yüksek ve donma-çözünmeye karşı dirençsiz olması sebebiyle tercih edilmemelidir. Gözenekli agregalar yerine geçirimsizliği düşük ve donma-çözünmeye karşı dirençli agregalar kullanılmalıdır. ASTM C127 ve C128'e göre kaba agregalar için nem emme oranı %1'den, ince agregalar için ise %2'den az olmalıdır [16,17]. Bir tam gün boyunca (24 saat) asidik ortamda bulunan agregalar, ancak %2'den daha az ağırlık kaybetmesi koşuluyla susuz beton karışımında kullanılmalıdır (60 ± 3°C). 24 saat süre

içerisinde tuzlu ortama maruz kalan agregaların herhangi bir reaksiyona girmediği takdirde beton karışım hesabında kullanılmasına izin verilmelidir ($60 \pm 3^\circ\text{C}$) [14].

Susuz beton karışım hesabında agrega granülometrisi de önemli bir parametredir. Boşluk oranı düşük, iyi gradasyonlu agregalar karışımında tercih edilen türden agregalardır. Sıkı derecelendirmeye sahip agrega kullanımı karışımdaki bağlayıcı miktarını düşüreceğinden beton karışımında avantaj sağlayacaktır. Karışımdaki agrega granülometrisi için üç

farklı agrega kullanımı önerilmektedir: (a) kaba agregalar, (b) ince agregalar, (c) mineral bazlı dolgu malzemeler (200 No'lu elekten geçen yani $75\mu\text{m}$ büyüklüğünde olan dolgu malzemeler).

Aşağıda, karışımda minimum boşluk elde etmek için örnek bir granülometri tablosu yer almaktadır. Tablolardan ilkinde sıkı derecelendirilmiş agrega granülometrisi ikincisinde ise sıkı derecelendirilmiş agregalarla elde edilen karışım oranları bulunmaktadır (Bakınız Tablo 2 ve Tablo 3).

Tablo 2. Sıkı derecelendirilmiş agrega granülometrisi [14]

Elek Boyutu	1 in. (25 mm) Agrega Geçen yüzde	3/4 in. (19 mm) Agrega Geçen yüzde	1/2 in. (12,5 mm) Agrega Geçen yüzde	3/8 in. (9,5 mm) Agrega Geçen yüzde
37,5 mm	100			
25 mm	90-100	100		
19 mm		90-100	100	
12,5 mm	56-80		90-100	100
9,5 mm		56-80		90-100
4,75 mm	29-59	35-65	44-74	55-85
2,38 mm	19-45	23-49	28-58	32-67
300 μm	5-17	5-19	5-21	7-23
75 μm	1-7	2-8	2-10	2-10

Tablo 3. Karışım oranları (9 mm'den küçük sıkı derecelendirilmiş agregalar kullanılmıştır) [14]

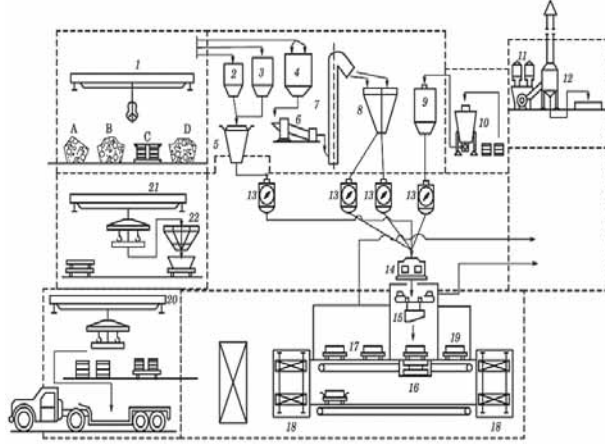
% Ağırlıkça Agrega Miktarı	% Ağırlıkça Çimento Miktarı	Özgül Ağırlık (ton/m ³)	Hacimce Boşluk Oranı	Basınç Dayanımı (MPa)	% Ağırlıkça Emme Oranı	İşlenebilirlik
90,0	10,0	2,209	13,7	20,4	1,06	Kısmen kuru
87,5	12,5	2,297	9,7	42,1	0,54	Kısmen kuru
85,0	15,0	2,370	6,2	50,8	0,07	Katı
82,5	17,5	2,372	5,5	51,4	0,02	Akıcı
80,0	20,0	2,366	5,1	45,0	0,01	Kısmen akıcı

5. Susuz Betonun Üretim Aşamaları

Susuz beton, üretim tekniği itibarıyla geleneksel betondan farklı olarak ısıtılma işlemi sonucunda elde edilir [18]. Isıtılma işlemi, asfalt üretiminde de kullanılan bir yöntem olup bu yöntemde agregaların kurutulması ve ısıtılması için gerekli olan döner fırın, susuz beton üretim sürecinde modifiye edilerek kullanılır [3]. Karışımdaki agregalar; öncelikle kuruma, sonrasında ise kükürtün erime noktasından (119°C) daha yüksek bir sıcaklığa kadar ısıtılma işleminden geçirilir. Karışımdaki kükürtlü çimento miktarı ise agreganın cinsine, maksimum

agrega boyutuna ve granülometrisine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Susuz beton ya da kükürtlü beton için 177°C ile 204°C aralığında ısıtılan sıkı derecelendirilmiş agregalar ile modifiye edilmiş kükürtlü çimento ve ince mineral dolgu malzemeleri kullanılır. Isıtılmış agregalar karışımdaki hem kükürtlü çimentoyu hem de dolgu malzemelerini ısıtır. Kükürt için belli bir çalışma aralığı olduğundan, kükürtlü betona ait karışımın sahip olduğu maksimum ve minimum sıcaklık değerleri mutlaka kontrol altında tutulmalıdır. Kükürtlü beton üretim süreci kükürtün sıcaklık değişiklikleri sonucunda viskozitesinde meydana gelen değişime bağlı olarak değişkenlik

gösterir. Kükürtlü çimento, 119°C'de erir ve 149°C'nin üzerinde ise viskozitesini hızlı bir şekilde kaybeder. Bu sebeple pek çok literatürde; karışımın taşıma, yerleştirme ve uygun bitiş verilebilmesi için uygun çalışma aralığı 132°C ile 141°C olarak tanımlanmıştır [14]. Şekil 1'de kükürtlü beton üretim tesisine ait çalışma prensibi yer almaktadır.



Şekil 1. Kükürtlü beton üretim tesisi [18]

(A) Çakıl, (B) Kum, (C) Katkılar, (D) Kükürt; (1) Malzeme Deposu; (2,3,4) Silolar; (5) Kükürt Modifikasyon Reaktörü; (6) Döner Kurutucu; (7) Dağıtıcı; (8) Kum ve Çakıl Siloları; (9) Katkı (Dolgu) Silosu; (10) Katkı (Dolgu) Dağıtıcısı; (11) Hava Filtresi (Cyclone); (12) Filtre; (13) Dağıtıcı; (14) Isıtıcı Karıştırıcı (Mikser); (15) Kalıplama Cihazı; (16) Vibrasyon İstasyonu; (17,18) Mobil Kalıplar; (19) Kalıpları Isıtma Cihazı; (20) Ürün Deposu; (21, 22) Geri Dönüşüm İstasyonu

6. Susuz Betonun Özellikleri

Susuz beton üretme fikrine olan ilgi kükürtün hem doğal ham madde olması hem de yan sanayi ürünü olarak elde edilebiliyor olması sebebiyle gün geçtikçe artmaktadır. Susuz beton üretiminde kullanılan malzeme önceden de tartışıldığı üzere; karışım oranları, üretim süreci ve yerleştirme bakımından geleneksel betondan farklılık göstermektedir. Geleneksel betonun düşük asidik ve tuzlu ortam direnci, uzun kalıp alma süresi, yüksek geçirimsizlik gibi olumsuz özellikleri karşısında susuz beton oldukça iyi davranış sergiler. Ayrıca susuz beton, kısa sürede yüksek dayanıma ulaşması, kimyasal etkilere karşı dirençli olması, düşük geçirimsizliğe sahip, geri dönüşüm malzemesi olarak değerlendirilebiliyor olması gibi öne çıkan avantajları sayesinde bazı özel uygulamalarda geleneksel beton kullanımına alternatif bir yapı malzemesidir [3].

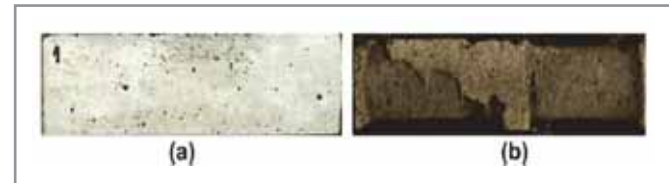
Yukarıda susuz betona ait olumlu özellikler arasında sayılan asidik ortam direncini ölçmeye yönelik literatürde de birçok

çalışma yapılmıştır [19,20]. Örneğin; yıllık ortalama hidrojen sülfür içeriği 200 mg/lt'ye ulaşan bir korozyon ortamına (kanalizasyon suyuna maruz kalan ortam) bırakılan numuneler iki yıl boyunca gözlemlenmiştir [19]. Deney sonucunda susuz betonun ya da kükürtlü betonun geleneksel betona göre kütle kaybı yaşamadığı görülmüştür (Bakınız Şekil 2).

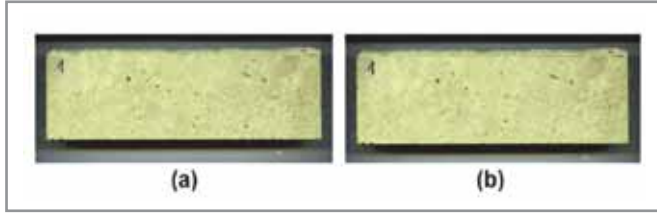
	Başlangıç	6 ay sonra	12 ay sonra	24 ay sonra
Geleneksel Beton				
	Ağırlık Oranı 100	Ağırlık Oranı 100	Ağırlık Oranı 83	Ağırlık Oranı 45
Kükürtlü Beton				
	Ağırlık Oranı 100	Ağırlık Oranı 100	Ağırlık Oranı 100	Ağırlık Oranı 100

Şekil 2. Kükürtlü ve geleneksel betonun asidik ortam davranışı (hidrojen kükürt > 200 mg/lt) [19]

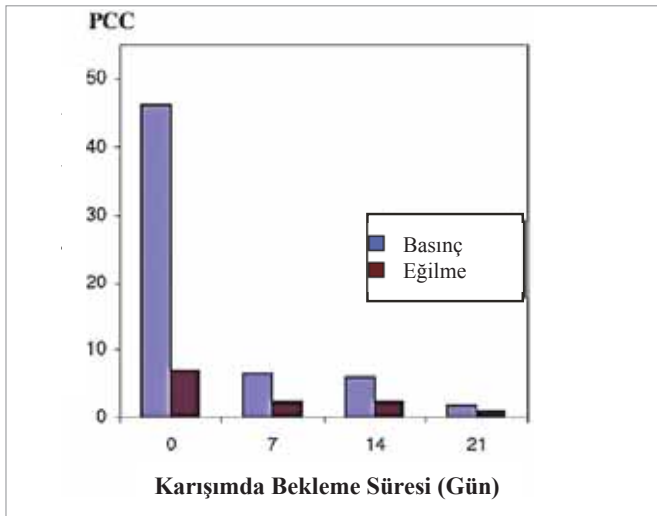
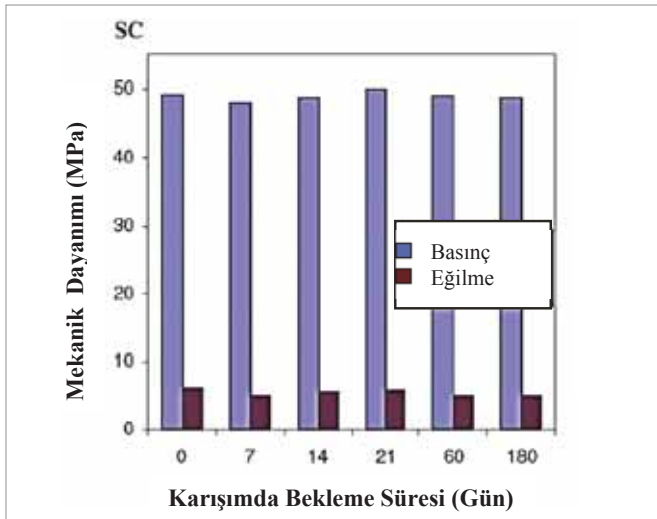
Aynı konuya ilişkin 2012 yılında yapılan bir çalışmada ise 4 x 4 x 16 cm ebatlarında geleneksel beton ve susuz beton kullanılarak dökülen numuneler %10 HCL (hidroklorik asidik ortam) içeren karışımda farklı süreler boyunca (7, 14, 21, 60 ve 180 gün) bekletilerek mekanik ve fiziksel özellikleri mukayese edilmiştir [20]. Mekanik özellikleri mukayese edilirken mukavemet değeri, fiziksel özellikleri mukayese edilirken ise kütle kaybı oranları incelenmiştir. Fiziksel özellikleri bakımından mukayese edilen numunelerden susuz betona ait olanlarda 180 gün sonunda herhangi bir kütle kaybı gözlemlenmezken geleneksel beton kullanılarak üretilenlerde 60 gün sonunda bile ciddi kütle kayıplarının meydana geldiği görülmüştür (Bakınız Şekil 3 ve 4). Mukavemet değerleri bakımından kıyaslandığında geleneksel betonda %96 oranında bir kayıp 60 gün sonunda elde edilirken susuz betonda ise 180 günün sonundaki kayıp sadece %1 mertebelerinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3. Geleneksel beton numuneleri: (a) asidik ortamda bekletilmeden önce, (b) 60 gün asidik ortamda bekletildikten sonra [20]



Şekil 4. Susuz beton numuneleri: (a) asidik ortamda bekletilmeden önce, (b) 180 gün asidik ortamda bekletildikten sonra [20] Yukarıda fiziksel özelliklerinin karşılaştırıldığı görsellere ilave olarak kükürtlü beton ile geleneksel betonun asidik ortam koşullarındaki basınç ve eğilme dayanımları da incelenmiştir. Şekil 5'teki verilerden de görüleceği üzere geleneksel betonun asidik ortamda daha kısa süre (21 gün) kalmasına rağmen basınç ve eğilme dayanımının susuz betona göre gözle görülür ölçüde bir düşüş sergilediği gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Geleneksel beton (PCC) ile kükürtlü beton (SC) numunelerin asidik ortam sonrası dayanım karşılaştırılması [20]

Bu örnekler ile asidik ortam direncinin oldukça yüksek olduğu kanıtlanan susuz betonun ilave olarak öne çıkan diğer önemli özellikleri ise genel başlıklar halinde aşağıya sıralanmıştır [3,4,5,10]:

- Düşük geçirimsizlik ve boşluk oranı,
- Yüksek çekme, basınç ve eğilme dayanımı,
- Radyoaktif ışımaya karşı koruyucu özellik,
- Asidik ve tuzlu ortam koşullarına karşı dirençli olması,
- Geri dönüşümle yeniden kullanılabilme özelliği,
- Suya gereksinim duyulmama özelliği,
- Donma-Çözünme döngüsüne karşı dirençli olması,
- Üretim sürecinde düşük karbon salınımına sahip olması,
- Yüksek yorulma direnci

Susuz betonun geleneksel betona göre avantajlarının ve özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için karşılaştırılmalı sayısal değerler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Geleneksel beton ile susuz betonun (kükürtlü beton) karşılaştırılması ⁽¹⁾

Özellikler	Birim	Susuz Beton	Geleneksel Beton
Yoğunluk	kg/m ³	2400	2200 ⁽²⁾
Basınç Dayanımı ⁽³⁾	MPa	60-115	15-60
Eğilme Dayanımı ⁽³⁾	MPa	10-16	6-7
Elastisite Modülü ⁽³⁾	GPa	35-50	25-28
Büzülme	mm/m	0,5-1,0	0,6
Isıl Genleşme Lineer Katsayısı	10 ⁻⁶ /K	8-12	8-10
Gözeneklilik	%	1-4	9-15
Emme Kapasitesi	%	0-1	5
Donma Direnci	Döngü ⁽⁴⁾	500	50
Minimum Kalıp Alma Süresi	Saat	0,1-0,4	48
Minimum Dayanım Alma Süresi	Saat/Gün	2-24 saat	28 gün
Zorlu Çevre Koşullarına Karşı Aşınma Direnci	-	İyi	Kısmen İyi
Bağlayıcı İçeriği	%	10-15	20-30
Su İhtiyacı	-	Yok	Var
Portland Çimento İhtiyacı	-	Yok	Var

⁽¹⁾ Tablodaki değerlerin büyük bir kısmı [18] no'lu referanstaki çalışmadan alınmıştır.

⁽²⁾ Geleneksel betonun birim hacim ağırlığı 2.155 kg/m³ ile 2.560 kg/m³ arasında değişmektedir [21].

⁽³⁾ Basınç dayanımı, 2 ile 24 saat arasında soğumaya bırakılan beton numuneler üzerinde ölçülmüştür [18].

⁽⁴⁾ Yapılan çalışmalara göre farklılık göstermektedir. Ay'da oluşabilecek ani sıcaklık değişimlerine karşı susuz beton davranışını incelemek için döngü aralığı +20°C ile -191°C olarak seçilmiştir [4].

Susuz betonun geleneksel betona göre kullanımını cazip kılan yukarıda da verilen avantajlarının yanında taşıdığı bazı olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Bunların en başında, susuz beton üretimi için ihtiyaç duyulan ısı miktarı gelmektedir. Susuz betonun üretiminde kükürtün termoplastik özelliğinden dolayı yüksek ısı kullanımına ihtiyaç vardır [14]. Makalenin ilk bölümlerinde bahsedildiği üzere kükürt 119°C'de eriyip 149°C'nin üzerinde ise viskozitesini hızlı bir şekilde kaybeden bir malzemedir. Bu durum üretim sürecinde hem fazla enerji tüketimine hem de çalışmanın belli sıcaklık değerleri arasında kısıtlanmasına sebep olur [14]. Susuz beton üretimine ait diğer olumsuz özellik modifiye edilmiş çimento maliyetinin geleneksel betonda kullanılan Portland çimento maliyetine göre yüksek olmasıdır [3].

7. Susuz Betonun Kullanım Alanları

Susuz beton üretiminde kullanılan kükürtün tarihçesi aslında tarih öncesi çağlara kadar uzanmakla birlikte malzemenin beton uygulamalarında kullanımına 1970'li yıllarda başlanmıştır. Geçmişteki kısıtlı uygulamaların aksine, geleneksel betona göre sağladığı avantajlar dolayısı ile susuz beton şimdilerde yoğun bir şekilde çok özellikli alanlarda kullanılmaktadır [3]. Günümüzde ABD ve Rusya başta olmak üzere Kanada ve Polonya gibi ülkeler tarafından da özellikli projelerde kullanıldığı bilgisi literatürde yer almaktadır [22]. Susuz betonun kullanım alanlarına ait açıklamalar ve görseller Tablo 5'de verilmiştir.

KULLANIM ALANI	İLGİLİ RESİM
Asidik ve tuzlu ortam koşulları [23]	
Drenaj kanalları [18]	
Atık su, kanalizasyon kanalları ve boruları [3]	
Kimyasal madde üretimi yapan fabrikaların döşeme ve siloları [24]	
Telekomünikasyon kanalları, iskele ve liman takviye elemanları [25]	
Ay ortamında inşa edilmek istenen dış yapıları [10]	
Enflüan, sesli ve lümen yapılarında meydana gelebilecek zararlı ortam koşulları [26]	
Radyasyona karşı koruyucu katmanlar [23]	
Yenileme ve restorasyon işleri [26]	

Tablo 5. Susuz Betonun Kullanım Alanları

8. Susuz Betonun Taşıyıcı Sistem Elemanlarında Kullanımı

Susuz betonun yapısal elemanlarda kullanımına dönük olarak ABD'de kullanılan ve yürürlükte olan ACI 548.2R-93 no'lu yönetmelik, tasarıma ve üretime dönük gerekli teknik bilgileri içermektedir [14]. Bu yönetmelik, özellikle betonun sahada döküm işlemleri için hazırlanıp, kalıplara yerleştirilmesi ve kürlenme sürecini detaylı olarak inceleyen bir yönetmeliktir.

Susuz beton dökümünde kalıp malzemesi olarak hem ahşap hem de çelik tercih edilmektedir. Özellikle döşemeler ve perde duvarlar gibi büyük alanlara ait beton döküm işlemlerinde kalıbın yeniden kullanılmasına müsaade eden çelik tür kalıplar ısıtılarak tekrar kullanılabilir. Kalıpların ısıtılmasındaki ana neden ısıtılmış agregalarla birleşen kükürtlü çimentonun soğuk kalıp yüzeylerle etkileşiminden oluşabilecek ve arzu edilmeyen temas yüzeylerinin ortadan kaldırılması olarak açıklanabilir. Kükürtün donatı çeliği ile kimyasal tepkimeye girmemesi geleneksel betonarme elemanlarda yer alan donatı düzen ve detaylarının susuz beton uygulamaları için de geçerliliğini koruyacağını göstermektedir. Fakat geleneksel betonda bırakılan net beton örtüsü miktarlarının susuz beton uygulamalarında meydana gelebilecek hızlı priz alma nedeni ile artırılması pratikte tercih edilen bir yöntemdir. Şayet net beton örtüsünün artırılmaması isteniyorsa, kalıpların beton dökümünden önce, donatıların ise yerleştirildikten sonra ısıtılması yoluna gidilmelidir [14].

Betonun saha içerisinde nakli için geleneksel beton dökümünde kullanılan iki tekerlekli beton taşıyıcılar susuz beton dökümünde de rahatlıkla tercih edilebilir. Fakat susuz beton dökümü sırasında oluşabilecek ısı kayıplarına karşı beton taşıyıcıların yalıtılmış olması gerekmektedir. Susuz betonun dökümü sırasında uyulması gereken kurallar dolayısı ile tecrübeli bir saha ekibinin bulunması gerekmektedir. Örneğin; beton dökümü üstlenen saha ekibinin susuz betonun hızlı kürlenmesi nedeniyle döküm işlerini seri ve dikkatli bir şekilde yerine getirmesi doğru döküm tekniği ve kullanılabilirlik açısından önem arz etmektedir. Aşağıdaki alt başlıklarda susuz betonun yapısal elemanlarda kullanımına dönük olarak yerinde döküm işlemleri sırasında dikkat edilmesi gereken hususlara yer verilmiştir [14].

Döşeme Beton Döküm İşlemi: Geleneksel beton döküm işlemlerinde kullanılan ekipman ve teçhizatlar susuz beton için de herhangi bir zorluk çıkarmadan kullanılabilir. Yerinde yapılacak maksimum beton döküm hacmi, saha eki-

binin sayı ve tecrübesi ile proje ve şartlarına göre değişkenlik göstermektedir. Karışım hesabının yönetmeliklere uygun olarak yapılması şartı ile susuz betonun yerleşiminde vibratör kullanımına gerek kalmayacaktır. Kürünü geleneksel betona göre çok daha hızlı alan susuz betonun yüzey bitişi için saha ekibinin kür süreleri ile doğru orantılı olarak hızlı davranması gerekmektedir. Örneğin; 10 ila 20 cm arasında kalınlığa sahip betonarme döşemede bu süre 5 ila 20 dakika arasında değişmektedir.

Perde Duvar Beton Döküm İşlemi: Susuz betonun taşıdığı karakteristik özelliklerden dolayı perde duvar dökümünde çok daha itinalı davranılması gerekmektedir. Döşeme beton döküm sürecinde açıklandığı üzere, kalıp ve donatılar önceden ısıtılmalıdır. Betonun kalıplara yapışmaması için kalıp ayırıcı maddelerin (bağlayıcıların) kullanılması tavsiye edilmektedir. Kalıp içerisinde oluşabilecek segregasyonun önlenmesi için ise vibratörlerin en az seviyede kullanılmasına özen gösterilmesi gerekmektedir. Vibratör kullanımına ihtiyaç duyulduğu takdirde kalıp dış yüzeyinde kullanılması tavsiye edilmektedir.

Susuz Beton Yüzeylerdeki Hasarların Tamir ve Onarım İşlemi: Hatalı dökülen veya hasara uğrayan susuz beton yüzeylerin tamirinde yüzeyin yeniden ısıtılarak yüzey bitiş işlemlerinin tekrarlanması gerekmektedir. Isıtılan beton yüzeyin erimesi, tamirin istenilen düzeyde ve zamanda yapılmasına imkân sağlamaktadır. Isıtma işlemlerinde kullanılacak ısıtıcılar daha geniş alanlara ısı yayan türden olmalıdır. Noktasal olarak uygulanacak ısı artışı ise betonarme döşemede gerilme artışına ve çatlak oluşumuna neden olacağı için tercih edilmemelidir.

Yapısal Analizlerde Kullanılacak Parametreler: Yapı analizinde kullanılacak parametreler için konunun 1970'li yıllardan bu yana detaylı olarak incelendiği Amerikan yönetmelik ve standartları esas alınacaktır. Bu konuda özellikle American Society for Testing and Materials (ASTM) ile American Concrete Institute (ACI) tarafından yayınlanan yönetmelik ve standartlara atıfta bulunulacaktır. Bu bilgilere dayalı olarak susuz beton tasarımında kullanılacak basınç ve eğilme mukavemetlerin tayininde ASTM C39, C109 ve C78 kullanılmalıdır [27-29]. Yarmada çekme mukavemeti ise ASTM C496'ya göre hesaplanmalıdır [30]. Tasarımda kullanılacak betonun elastisite modülünün tayininde ASTM C469 uyarınca çapı 76 mm, yüksekliği ise 152 mm olan silindir numuneler test edilmelidir [31]. Sıcaklık değişiminde kullanılacak ısıl genleşme katsayısı değeri deneysel çalışmalara bağlı olarak ACI 548.2R-93 uyarınca belirlenmelidir [14]. Susuz betonun tasarımında

kullanılacak Poisson Oranı'nın tayininde ASTM C469, kayma modülü değerinin belirlenmesinde ise temel mukavemet bilgileri geçerli olacaktır [31]. Ayrıca çekme mukavemeti için öngörülen değer hesabında ilgili ACI 318 Yönetmeliği'ndeki hesaplara uyulacaktır [21].

Yukarıdaki açıklamalara göre belirlenecek betonarme tasarım parametreleri taşıma gücü sınır durumlar yöntemine uygun olarak ilgili yönetmeliklerde verilen tasarım denklemleri içerisine dâhil edilecektir. Betonarme tasarım yapılırken kullanılabilirlik sınır durum yöntemine uygun olarak şekil değiştirme, yer değiştirme ve sehim değerleri belirlenecek ve hesap sonuçlarının kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalıp kalmadığı teyit edilecektir.

İmalat Süreci: Susuz betonun imalat sürecinde karışım sıcaklık değerinin korunması amacı ile gerekli tedbirlerin alındığı yeni nesil mikser araçlar kullanılması önerilmektedir (Bakınız Şekil 6).



Şekil 6. Sıcaklık kontrollü beton mikser aracı [32]

Bu araçlarla yapılacak beton döküm işi 10 saatlik bir sürede 19 m³ ila 54 m³ olarak gerçekleştirilmektedir [3]. Bu rakam, aynı süre içerisinde geleneksel beton ile yapılacak döküm değerlerine göre mukayese edildiğinde %70-80 oranında daha az seviyelerde kalmaktadır [33]. Fakat döküm işlemine ait mukayese sadece beton miktarı açısından değil kürlenme süresi açısından da değerlendirilmelidir. Geleneksel beton döküm işlemine göre susuz betonda harcanan süre ve döküm miktarları detaylı olarak Tablo 6'da yer almaktadır. Tablodaki değerlerden de görüleceği üzere 15 cm kalınlıklı ve 900 m² alana sahip bir döşemede geleneksel beton dökümü için ihtiyaç duyulan süre yaklaşık 41 gün olarak gerçekleştirilmektedir. Bu süre susuz beton göz önüne alındığında ise 14 gün olarak gerçekleştirilmektedir. Geleneksel beton dökümünde ihtiyaç duyulan sürenin susuz beton dökümünde ihtiyaç duyulan süreye göre çok daha fazla olmasındaki asıl neden ise geleneksel betonun kürlenmesi için gereken 28 günlük ilave süreden kaynaklanmaktadır.

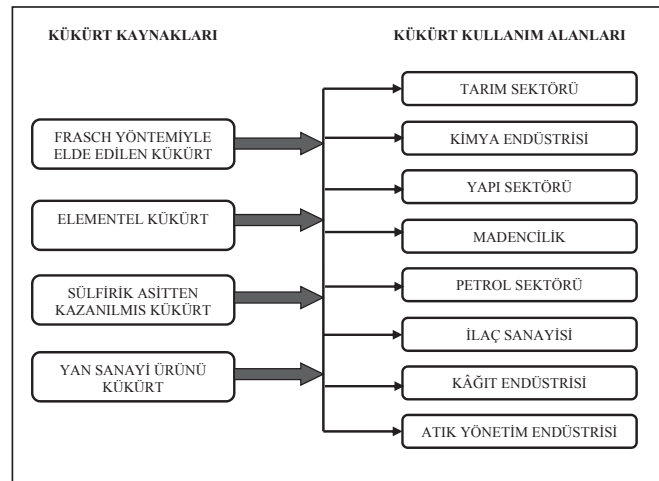
Tablo 6. 15 cm kalınlıklı 900 m² koruyucu astarlı Portland çimentolu beton ile susuz ya da kükürtlü betonun inşaat sürecinin karşılaştırması [3]

No	Aktivite	Süre	Hafta						
			1	2	3	4	5	6	7
1		Gün							
2	Portland Çimentolu Beton	41	■						
3	Temel Yüzey Hazırlığı	3	■						
4	Kalıp ve Donatı	6		■					
5	Döküm ve Yüzey Bitişi	1			■				
6	Kür	28			■				
7	Astarlama	3						■	
8									
9	Susuz ya da Kükürtlü Beton	14	■						
10	Temel Yüzey Hazırlığı	3	■						
11	Kalıp ve Donatı (125 m ² /gün)	9		■					
12	Döküm ve Yüzey Bitişi (19 m ³ /gün)	8		■					
13	Birleşim Bölgelerinin Sızdırmazlığı	1			■				

Geçmiş kaynaklarda yer alan bilgilere göre susuz betonda kullanılacak donatıya ilişkin ihtiyaç duyulan kullanım bir tercih meselesidir. Susuz betonun eğilmeye karşı oldukça yüksek mukavemet değeri taşıması donatıya olan ihtiyacı da bir bakıma ortadan kaldırmaktadır [3]. Fakat ön-dökümlü ve yerinde dökme beton uygulamalarının pek çoğunda çatlak oluşmasını engellemek ve yapı elemanının taşıma kapasitesini artırmak amacı ile donatı kullanılması gerekliliği Soderberg'in 1983 yılındaki çalışmasında önerilmiştir [34]. Özetle, yapılan akademik çalışmaların ışığı altında susuz beton uygulamalarında donatı kullanımının zorunlu olmayıp bir tercih nedeni olduğu söylenilebilir [3].

9. Susuz Beton ve Türkiye Gerçeği

Çalışmanın genelinde de bahsedildiği üzere susuz beton diğer adıyla kükürtlü beton üretiminde ana malzeme olarak kükürt kullanılmaktadır. Türkiye'de kükürt başta gübre sanayi için gerekli sülfürik asit üretiminde olmak üzere kimya, lastik, boya, kâğıt, demir-çelik, petrol sanayileri ile tarım ilaçları, barut, kibrit üretimi gibi pek çok alanda değerlendirilmektedir (Bakınız Şekil 7).

**Şekil 7.** Kükürt kaynakları ve kullanım alanlarını gösteren şema [3]

Yapı malzemesi olarak Türkiye'de kısıtlı alanlarda kullanılmakta olan kükürt, beton malzemesi olarak maalesef henüz kullanılmamaktadır. Türkiye inşaat sektöründe kullanılmayan kükürt veya susuz betonun; Amerika, Kanada, Polonya ve Rusya gibi dünyanın belli başlı ülkelerinde özellikle 1970'li yıllardan bu yana özellikle pek çok projede kullandığı bilgisine

makalenin önceki bölümlerinde yer verilmişti [3]. Kükürtün Türkiye inşaat sektörüne adapte edilememesindeki asıl nedenin ise malzemenin bulunabilirliği ile doğrudan ilgili olduğu yazarlar tarafından düşünülmektedir. Bu öngörünün daha iyi anlaşılabilir olması amacı ile kükürtün Türkiye'deki mevcut rezerv miktarları aşağıda incelenecektir.

Türkiye'de kükürt iki ana kaynak kullanılarak üretilmektedir. Bunlardan ilki doğal maden rezervlerinden tuvanen formda üretilen diğeri ise petrol, doğalgaz ve baca gazlarından yan ürün olarak elde edilendir [35]. Konu ile ilgili olarak Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nün (MTA) 2013 yılında güncellenmiş olduğu verilere göre Türkiye'de 626.000 ton (%32 kükürt içeriği ile) kükürt rezervi olduğu bilinmektedir [36]. Ayrıca yan sanayi ürünü olarak ülkenin petrol rafinerileri bir çatı altında toplayan kurumu olan Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş.'nin (TÜPRAŞ) 2013 yılı faaliyet raporuna göre 86.000 ton kükürtün yan sanayi ürünü olarak üretiminin yapıldığı görülmektedir [37]. TÜPRAŞ'ta üretilen bu miktarın yapılacak yeni yatırımlarla birlikte yaklaşık 86.000 ton civarında bir artışla iki katına çıkarılması 2014 yılına ait yatırım hedefleri arasında gösterilmiştir [37]. Diğer bir deyişle, Türkiye'de üretilen yıllık kükürt miktarının 2014 yılından sonra 172.000 tona çıkacağı

öngörülmüştür. Türkiye, kükürt üretim miktarı açısından Çin, ABD ve Katar gibi ülkelerin oldukça gerisindedir. Kükürt üretimini sadece yan sanayi ürünü olarak tek bir kaynaktan karşılayan Türkiye'nin kamu politikaları ve yatırım imkânlarını daha sağlıklı değerlendirmesi gerekmektedir. Zira Türkiye, kükürt ve sülfürik asit üretimini ülke içi ihtiyaçlara göre karşılayamakta bu yüzden malzemeyi ithal etme yoluna gitmektedir.

Türkiye'deki toplam kükürt üretim miktarını daha detaylı görmek amacı ile mevcut doğal rezerv kaynakları da ayrıca makede incelenecektir. Aşağıdaki tabloda Türkiye'deki mevcut kükürt rezerv miktarlarına ait bilgilendirme yer almaktadır (Bakınız Tablo 7). Tablodaki değerlerden de anlaşılacağı üzere Türkiye'deki rezervlerin büyük bir kısmı ekonomik olmadığı için toplam üretimde bir paya sahip olmayan atıl işletme veya değerlendirilmeyen rezervlerden oluşmaktadır. İşletme açısından en ekonomik görülen tek doğal kaynak ise Isparta/Keçiborlu'da yer alan tesistir. Osmanlı İmparatorluğunun son dönemlerinden 1995 yılına kadar işletilen Isparta/Keçiborlu tesisi ise işletmesinin ekonomik olmadığı düşünülerek 1995 yılında tamamı ile kapatılmıştır [38]. Dolayısı ile Türkiye'de 1995 yılından bu yana doğal rezerv kaynaklarından kükürt üretimi yapılmamaktadır.

Tablo 7. Türkiye'nin önemli kükürt zuhurları ve rezervleri [38]

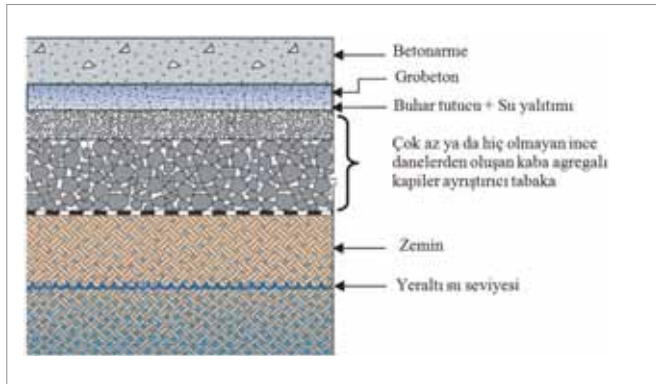
İL	İLÇE	KÖY	MEVKİ	REZERV (BİN TON)	TENÖR (%)	KÖKENİ	DİĞER
ADANA	Osmaniye	Issızca	Karaboya	2.125	15-38	Hidrotermal	Ekonomik değil markasit yatağı
ADANA	Gebeli	Gebeli		4.800	15	Hidrotermal	
AĞRI	Diyadin		Tendürek		0,8-69	Volkanik	Ekonomik olabilir
AYDIN	Karacasu	Dandalas		500	3-5	Sedimenter	Ekonomik değildir
DENİZLİ	Sarayköy		Tekkehamam	40	10	Hidrotermal	Eskiden işletilmiştir
ISPARTA	Keçiborlu		Kükürtdere	645	15-94	Sub-volkanik	Ekonomik işletilmiştir
KÜTAHYA	Simav	Pulluca	Sarı T.	50		Sedimanter	Ekonomik değildir
MANİSA	Demirci	İrişler		250	1,6-47	Hidrotermal	
MANİSA	Salihli	Allahdiyen			14,5	Hidrotermal	Ekonomik değildir
MUĞLA	Milas	Karacahisar		7.000	15-20	Sedimanter	Ekonomik değildir
ORDU	Fatsa	Akkaya		51	31-28	Volkanik	36-112m derinde
VAN	Başkale		Bordere		16-5	Hidroteralvolkan	Ekonomik değildir
VAN	Başkale	Belliyurt				Hidroteralvolkan	
VAN	Başkale	Poyrazalan				Hidroteralvolkan	Sondajlara bağlıdır
VAN	Başkale	Kırbalı					Araştırılması gerekir

1995 yılından sonra ise kükürt, Türkiye’de sadece yan sanayi ürününden elde edilmiştir. Türkiye’deki toplam kükürt üretiminin sadece yan sanayi ürünü olarak elde edilmesi ve bu miktarın inşaat sektöründe kullanımına uygun olmaması kükürtlü ya da susuz betonun inşaat sektöründe kullanılmamasındaki nedenlerden biri olarak öngörülmektedir.

Dolayısı ile Türkiye’de susuz beton ya da kükürtlü beton üretimi için kükürt üretiminin artırılması, mevcut ya da ilave rezervlerin yeniden gözden geçirilmesi gerekmektedir. Bu konuya ait kararlar, ürünün ülke ekonomisine yapacağı olumlu katkılar dolayısı ile bir devlet politikası olarak ele alınmalıdır. Gerekli adımların hızlı bir şekilde atılması için kararlılık gösterilmeli ve kalkınma planları kapsamında konu, ilgili kurum ve merciler tarafından etraflıca değerlendirilmelidir.

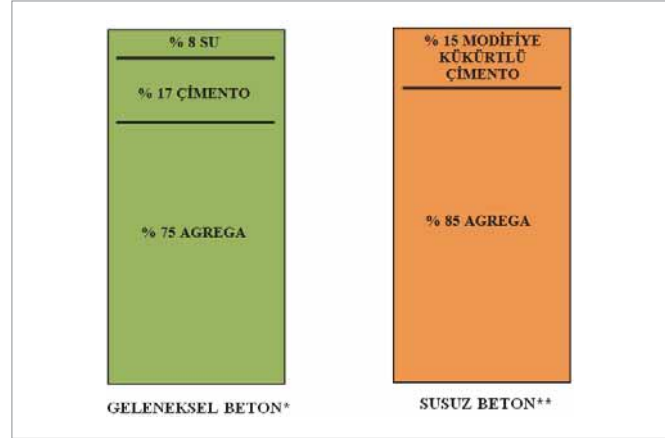
10. Susuz Betona Ait Maliyet Çalışması

Susuz betonu geleneksel betona göre çok daha avantajlı kılan en önemli özellikleri arasında kimyasal dış ortam koşullarına karşı olan direnci gösterilebilir. Bu yüzden maliyet çalışması yapılırken deniz suyu içerisinde veya tuzlu su ortamında yapılacak beton imalatı ilave bir parametre olarak ele alınacaktır. Aşağıdaki şekil, tuzlu su ortamında kullanılacak geleneksel bir betonda ihtiyaç duyulan yalıtım malzemelerine ait tip detayları içermektedir (Bakınız Şekil 8).



Şekil 8. Tuzlu ortam hasarlarına karşı betonarmede uygulanacak tip yalıtım detayı [39]

Geleneksel beton ile susuz ya da kükürtlü betona ait karışımda yer alan malzemelere ait detaylı bilgi Şekil 9’da verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere geleneksel betonda kullanılan su ve çimento yerine susuz betonda modifiye edilmiş kükürtlü çimento kullanılmıştır.



* Geleneksel beton için önerilen karışım oranlarında [40] no’lu referanstaki değerler dikkate alınmıştır.

** Susuz beton için önerilen karışım oranlarında [14] no’lu referanstaki değerler dikkate alınmıştır.

Şekil 9. Susuz ve geleneksel beton maliyet hesabında dikkate alınan karışım oranları [14,40].

İki beton türünde kullanılan toplam agrega miktarları arasında az bir fark olduğu Şekil 9’dan görülmektedir. Bu fark ise maliyet mukayesesinde büyük bir değişiklik yaratmamaktadır (Bakınız Tablo 8). Geleneksel ve susuz beton arasındaki maliyet farkı ise geleneksel betonda kullanılan su ve çimento yerine susuz betonda kullanılan modifiye edilmiş kükürtlü çimento miktarlarından kaynaklanmaktadır. Modifiye edilmiş kükürtlü çimento ise henüz Türkiye’de üretilmemektedir. İki beton türü arasında karşılaştırma yapabilmek adına kükürtlü çimentonun ABD’den ithal edileceği düşünülerek yaklaşık oluşacak vergileri ile beraber toplam maliyeti hesaplanmıştır. Ayrıca susuz betonun üretiminde ihtiyaç duyulan ısıtma işleminden dolayı gereken ilave bedel eklenerek toplam maliyet bulunmuştur. Aşağıdaki tablo, geleneksel ve susuz betonlar için birim m³ beton üretimine ait maliyet çalışmalarını içermektedir (Bakınız Tablo 8).

Tablo 8. Geleneksel beton ile susuz beton arasındaki maliyet karşılaştırması

Malzeme	1 m ³ Betonun Maliyeti ^(1,2) (TL)	
	Portland Çimentolu Beton (Geleneksel Beton)	Modifiye Edilmiş Kükürtlü Beton
Agrega	28 ⁽³⁾	33 ⁽³⁾
Portland Çimento	90 ⁽⁴⁾	---
Modifiye Edilmiş Kükürtlü Çimento	---	89 ⁽⁵⁾
Isıl İşlem Maliyeti	---	21 ⁽⁶⁾
Toplam Maliyet	118	143

- (1) Tabloda verilen maliyetlere KDV dâhil edilmemiştir.
- (2) Geleneksel betonda kullanılan su bedeli toplam içerisinde çok az yer kapsadığı için ihmal edilmiştir.
- (3) Agreganın KDV hariç birim fiyatı 17 TL/ton kabul edilmiştir.
- (4) Portland Çimentonun KDV hariç birim fiyatı 0,23 TL/kg kabul edilmiştir.
- (5) ABD'den ithal edileceği düşünülerek tahmini gümrük vergi bedeli ile diğer bedeller maliyete dâhil edilmiştir. Bu hesaplamada ürünün ABD'deki maliyeti %50 artırılmıştır. Modifiye edilmiş kükürtlü çimentonun ABD'deki KDV hariç birim fiyatı 0,25 TL/kg alınmıştır. Ayrıca modifiye edilmiş kükürtlü çimento elde edilmesi için ihtiyaç duyulan modifiye malzemenin toplam kükürt miktarının %5'i kadar olduğu kabul edilmiştir [3, 41].
- (6) Isıl işlem maliyeti modifiye edilerek günümüz rayiç bedeli hesaplanmıştır [42].

Toplam maliyet karşılaştırıldığında susuz ya da kükürtlü beton geleneksel ya da Portland çimentolu betona göre her birim m³ miktarda yaklaşık olarak %20 kadar daha pahalı üretilmektedir. Karşılaştırmada susuz betonun geleneksel betona göre asidik veya tuzlu ortam koşullarına karşı sağladığı avantaj ise tamamen göz ardı edilmiş olup bu avantajın da maliyet karşılaştırmasına dâhil edilmesi gerekmektedir. Şekil 8'de geleneksel betonun yalıtımı açısından ihtiyaç duyulan su ve buhar tutuculara ait tip, detay çizimleri verilmiştir. Su ve buhar tutucuların Türkiye'deki maliyetleri üretici firmalara göre değişiklik göstermektedir. Değişken fiyatlar arasında ortalama bir değer esas alındığında 1 m² alanda ihtiyaç duyulan yalıtım maliyetleri, katma değer vergisi hariç olmak üzere, su tutucular için 35 TL ve buhar tutucular için ise 2 TL olarak gerçekleşmektedir. Dolayısı ile 1 m³ geleneksel beton üretimi için Tablo 8'de hesaplanan 118 TL'lik toplam maliyete su ve buhar yalıtımlarından yaklaşık 37 TL ek maliyet gelecektir. Böylelikle yalıtımlı geleneksel betonun 1 m³ miktarı için toplam maliyeti 155 TL olacaktır. Yalıtım bedeli de toplam maliyete dâhil edildiğinde susuz betonun birim m³'de geleneksel betona göre üretim maliyeti yaklaşık %8 kadar daha ucuz gerçekleşecektir. Üretim maliyetinde meydana gelen bu azalmanın susuz betonun üretim ve kullanımını daha cazip hale getireceğine inanılmaktadır.

11. Susuz Beton Ar-Ge Çalışmaları ve Türkiye'deki Üretimi

Susuz beton maliyetini artıran asıl neden karışımda kullanılan modifiye malzemenin (kimyasal dönüştürücü) birim maliyetidir. Yapılan son araştırmalarda bu tür dönüştürücüler için ABD'deki birim maliyet 6,8 TL/kg olarak gerçekleştiği bilgisine yer verilmektedir [41]. Portland çimento birim maliyeti ise Tablo 8'de Türkiye için 0,23 TL/kg olarak verilmişti. Bu değer ABD için de geçerlidir. Dolayısı ile kimyasal dönüştürücülerin maliyetinin Portland çimento maliyetine göre 30 kat kadar daha fazla gerçekleştiği görülmektedir. Ar-Ge çalışmalarının ana temasını da kimyasal dönüştürücülerin maliyetlerinin azaltılmasına dönük çalışmalar oluşturmaktadır. Teknolojik anlam-

da maliyetin en aza indirgenmesi amacı ile modifiye edilmiş kükürtlü çimento üretiminde Ar-Ge çalışmaları özellikle petrol üretim tesislerinin ilgili birimlerince yürütülmektedir. Teknolojik ilerlemelerle üretim maliyetinin daha da aşağı çekilerek ürünün yakın zamanda yaygın kullanımının gerçekleşeceği düşünülmektedir.

Rusya'nın en önemli petrol ve doğalgaz üretim firması Gazprom'un modifiye edilmiş kükürtü Rus standartlarına uygun olarak özellikle asfalt yollarda, kare kesitli öngermesiz donatılı kazıklarda ve doğalgaz boru hatlarında kullanımına dönük Ar-Ge çalışmaları yer almaktadır [43]. Rusya'dakine benzer türden çalışmalara Kazakistan'da da rastlanmaktadır. Agip-GCO konsorsiyumu kapsamında Kazakistan'ın Hazar Denizi yakınındaki Kaşagan bölgesinde üretimine 2017 yılı içerisinde başlanılacak petrol arama çalışmaları ile şu an üretim halinde bulunan ve ülkenin kuzey batısındaki Tengiz bölgesinden elde edilen kükürtlerin değerlendirilerek beton üretiminde de kullanılmak üzere modifiye edilmesine dönük Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir. Bu kapsamda, 2004 yılı verilerine göre Tengiz bölgesinde depolanan kükürt miktarının 8 milyon tonu aşmış olduğu ve uzay istasyonundan bile görülebilecek kadar büyük olduğu bilgisi literatürde yer almaktadır [44].

Dünyanın en büyük petrokimya şirketlerinden biri olan Royal Dutch Shell'in 2007 yılına ait yaptığı bir çalışmada kükürtün özellikle inşaat sektöründe kullanımına imkan sağlayacak Ar-Ge çalışmalarından bahsedilmiştir. Bu çalışmada modifiye edilmiş kükürt maliyetinin nasıl azaltılabileceğine dönük atılması gereken adımlar hakkında bilgilere yer verilmiştir [41]. Aynı firmanın modifiye edilmiş kükürtlü çimento üretimine ait 2010 yılı tarihinde başlayan detaylı Ar-Ge çalışmaları da bulunmaktadır. Bu çalışmalarla, modifiye edilmiş kükürtün hem üretim teknolojisini iyileştirmek hem de üretim maliyetini en aza indirmek şirketin amaçladığı ana hedeflerdendir [45]. Yine aynı firmaya ait bir başka çalışmada ise Shell Malaysia Trading ile Cap-op Energy Inc. ve Viresco Solutions'ın ortaklığı ile oluşturulan konsorsiyum modifiye edilmiş kükürtün prekast beton elemanlarda kullanımına dönük yeni bir metot geliştirilmesi için 2015 yılında Ar-Ge çalışmasına başlamıştır [46].

Yukarıdaki açıklamaların ışığı altında Ar-Ge çalışmalarının yoğun bir şekilde devam ettiği ürünün özellikli alanlarda sağladığı avantajlar dolayısı ile Türkiye'de de kullanılması inşaat sektörü açısından önem arz etmektedir. Ürün şu aşamada sadece yurtdışından ithal edilerek kullanılacak durumdadır. Fakat diğer ülkelerde gerçekleşen Ar-Ge çalışmaları kapsamında ürünün Türkiye'de de yapılmasına dönük çalışmalara şimdiden başlanılmalıdır. Bu kapsamda özellikle ABD ve Kanada'daki uygulamalara benzer biçimde oluşumlara girilebilir. Üretim konusunda özellikle TÜPRAŞ'ın üstleneceği görev önemli olup gerekli teşviklerin kamu sektörü tarafından özel sektöre sağlanması gerektiği düşünülmektedir. Karbon salınımı düşük olan yan sanayi ürünü kükürtün modifiye edilerek in-

şaat sektörüne kazandırılması sadece sağlayacağı avantajlar açısından değil ülke ekonomisi açısından da faydalı olacaktır.

Bu kapsamda, yukarıdaki Tablo 8'de verilen maliyet analizinin oluşturulması amacı ile modifiye edilmiş kükürtlü çimentonun literatürde yer alan maliyet araştırması yapılmıştır. Literatürde yer alan bu araştırmaların pek çoğunda araştırmacı ve yazarların kükürtlü çimentonun yüksek üretim maliyetinden bahsettikleri görülmüştür. Fakat maliyet hakkında yeterli ve sağlıklı bilgiye yapılan yazışma ve telefon görüşmelerine rağmen maalesef ulaşılamamıştır. Bu konuda üretim yaptığı söylenen işletmelerin bile rakam vermekten kaçındıkları gözlemlenmiştir.

1970'li yıllardan bu yana yoğun olarak üzerinde araştırmalar yapılan malzemenin maliyeti hakkında yazılı olarak sadece üç kaynak bulunabilmiştir. Bu kaynaklardan ilki 1989 yılında yapılan bir çalışma olup, bu çalışmada kullanılan modifiye edilmiş kükürtlü çimento ABD'den Danimarka'ya ithal edilmiştir [47]. Çimentonun ithal bedeli 2016 Şubat ayı verilerine göre yeniden düzenlenerek 2,76 TL/kg olarak gerçekleşmiştir. İkinci makale ise 1990 yılında ABD'nin New York Eyaleti'ndeki Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nda yapılan ve modifiye edilmiş kükürtlü çimentonun radyoaktif atık malzeme içeren tesislerde kullanılabilirliğini inceleyen bir çalışmadır [48]. Bu çalışmada kullanılan modifiye edilmiş kükürtlü çimentonun birim fiyatı 2016 Şubat ayı verilerine göre düzenlenerek 2,05 TL/kg olarak hesaplanmıştır.

Yukarıdaki iki çalışmanın yapıldıkları yıllardan sonra modifiye edilmiş kükürtlü çimento elde edilmesine dönük pek çok Ar-Ge çalışması bağımsız kurum, kuruluş ve kişilerce yürütülmüştür. Fakat yapılan çalışmaların hiçbirinde maliyet analizinden bahsedilmemiştir. Konuya ilişkin literatürde yer alan en son çalışma ise Shell tarafından 2007 yılında yapılan çalışmadır [41]. Bu çalışmada modifiye edilmiş kükürtlü çimento ile Portland çimentolu geleneksel beton fiyatları karşılaştırılmıştır. Modifiye edilmiş kükürtlü çimento maliyeti 2016 Şubat ayı verilerine göre düzenlenerek 0,25 TL/kg olarak hesaplanmıştır. Dolayısı ile 1989 yılından 2016 yılına kadar geçen toplam 27 yıllık süreçte modifiye edilmiş kükürtlü çimentonun birim fiyatının yaklaşık olarak 11 kat azaldığı görülmüştür.

Yukarıda da izah edildiği üzere modifiye edilmiş kükürtlü çimento maliyetinin yapılan yeni Ar-Ge çalışmaları ile daha da azalacağı yazarlar tarafından düşünülse de bu görüşü destekleyecek maliyet bedellerine literatürde rastlanmamıştır. Fakat 2007 yılı verilerine göre elde edilen maliyetlerin Portland çimentolu betonla mukayese edilir düzeyde olduğu görülmüştür. Dolayısı ile modifiye edilmiş kükürtlü çimentonun yakın zamanda özellikle özellikli projelerde yaygın olarak kullanılacağı düşünülmektedir.

12. Sonuç ve Öneriler

Susuz betonun diğer adıyla kükürtlü betonun hem kullanılan

malzeme hem de üretim tekniği itibarıyla geleneksel betondan farklı olduğu yukarıdaki bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır. Susuz beton ile ilgili çalışmaların tarihçesi 1970'li yıllara kadar dayanmakla birlikte dünyada bu beton türüne olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Gelişen beton teknolojisinin de yardımıyla bugün dünyadaki birçok yapıda, susuz beton sahip olduğu olumlu özellikleri (hızlı priz alması, yüksek erken dayanım, asidik ve tuzlu ortam koşullarına karşı dirençli gibi belli başlı özellikler) nedeniyle tercih edilmektedir. Kükürtün beton teknolojisinde tercih edilmesindeki bir diğer sebep ise yan sanayi ürünü olarak elde edilebiliyor olmasıdır. Bu sayede hem ekonomik hem de çevre dostu bir betonun üretilmesine imkân sağlanmaktadır. Kullanım alanlarının dünya ile sınırlı kalmayıp diğer gökçisimlerinde inşa edilecek üslerde dahi değerlendirilecek olması malzemeyi cazip kılan bir diğer neden olarak karşımıza çıkmaktadır.

Dünyada gittikçe popüler olmaya başlayan bu beton türü için Türkiye'de maalesef henüz bir çalışma yapılmamıştır. Türkiye'de kükürt üretimi yapılan maden rezervlerinin bulunmaması ve yan sanayi ürününden elde edilen miktarların da çok az düzeyde olması malzemenin beton üretiminde değerlendirilememesindeki ana nedenler olarak düşünülmektedir. Ayrıca üretilen ve ithal edilen kükürtün çok büyük bir kısmının inşaat sektörü yerine tarım sektöründe kullanılması yapı sektöründe kullanım için yeterli kükürt kaynağının Türkiye'de olmadığını göstermektedir. Türkiye'de kükürtün yapı sektöründe yaygınlaştırılabilmesi için üretimine yatırım yapılması ve atıl durumdaki kükürt rezervlerinin tekrar kullanıma geçmesi için gerekli adımların atılması gerekmektedir.

Konu, önemine binaen mutlaka siyasi kararlılıkla bir devlet politikası olarak ele alınmalı ve ilgili birimler gerekli çalışma ve incelemeleri başlatmalıdır. Bu kapsamda öncelikli olarak susuz betonun ana malzemesi kükürtün yıllık üretimini artıracak tedbirler ele alınmalıdır. Çözüm üretebilmek amacı ile sadece kamu sektörü değil özel sektörde aynı ortak paydaya dahil edilmeli, çevreci ve sürdürülebilir bir beton için gerekli ortak çalışma başlatılmalıdır. Kükürt üretiminin artışına dönük ortak çalışma tesis edildikten sonra, beton üretimi yapacak hazır beton üreticileri ile ilgili sivil toplum örgütlerinin de katılımı mutlaka sağlanmalıdır. Susuz beton üretiminde yer alacak hazır beton üreticileri eğitilmeli ve üretime dönük teknik mevzuatlar oluşturulmalıdır. Bu aşamadan sonra ürünün uygulamasına dönük olarak yüklenici firmalar ve saha teknik ekiplerinin eğitimleri tamamlanmalıdır.

Susuz beton üretimi ve kullanımına dönük çalışmaların yer aldığı bu makalede amaçlanan susuz ya da kükürtlü betonun neden kullanılması gerektiğinin anlaşılması ve dünyanın pek çok ülkesinde yaygın kullanılan bu ürünün Türkiye'de de kullanımını sağlayacak teşvik ve tedbirlerin alınması şeklinde özetlenebilir.

Kaynaklar

- [1] Çimento Tarihi Takvimi, <http://www.tcma.org.tr/images/file/Cimento%20Tarihi%20Takvimi.pdf>, Erişim Tarihi: 22.02.2016.
- [2] Çimento Üretim Tarihi, <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&menuID=50>, Erişim Tarihi: 22.02.2016.
- [3] Mohamed, A.M., Gamal, M.M. *Sulfur Concrete for the Construction Industry*, J. Ross Publishing, 2010.
- [4] Toutanji, H.A., Grugel, R.N. Mechanical Properties and Durability Performance of Waterless Concrete, *Earth and Space*, 2008.
- [5] Toutanji, H.A., Evans, S., Grugel, R. N. Performance of Waterless Concrete, *13th International Congress on Polymers in Concrete*, 2010.
- [6] U.S. Geological Survey. *Sulfur, Mineral Commodity Summaries*, Ocak 2015.
- [7] Al-Ansary, M. *Innovative Solutions for Sulphur in Qatar*, Qatar Shell Research and Technology Centre (QSRTC), Sulphur Utilization, Doha, Katar, 2010,.
- [8] Sheppard, W.L., Jr. Sulfur Mortars: A Historical Survey, *Sulphur Institute Journal*, Cilt 11, No. 3-4, 1975, s. 15-17.
- [9] Rybczynski, W., Ortega, A., Ali, W. Sulfur Concrete and Very Low Cost Housing, *Canadian Sulfur Symposium*, Alberta, Mayıs 1974.
- [10] Tunç, G., Demirtürk, D. Ay'da Yaşam Alanı Yapıları, *Yapı Dergisi*, Sayı: 409, Aralık 2015, s. 134-140.
- [11] Toklu, Y.C., Järvi N. Design and Construction for Self-sufficiency in a Lunar Colony, *The Third International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics*, Seul, Güney Kore, 2004.
- [12] Zorlu, H. *Kalıcı Bir Ay Üssü Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara: Uzun Bilimler Anabilim Dalı, Hava Harp Okulu Komutanlığı, 2009.
- [13] Omar, H.A. *Production of Lunar Concrete Using Molten Sulfur*, Final Research Report for JoVe NASA Grant NAG8-278, Alabama, Amerika.
- [14] ACI Committee 548. *Guide for Mixing and Placing Sulfur Concrete in Construction*, ACI 548.2R-93, American Concrete Institute, 1998.
- [15] ASTM C33 / C33M-13. *Standard Specification for Concrete Aggregates*, ASTM International.
- [16] ASTM C127-15. *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*, ASTM International.
- [17] ASTM C128-15. *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*, ASTM International.
- [18] Ciak, N., Harasymyuk, J. Sulphur Concretes Technology and Its Application to the Building Industry, *Technical Sciences*, 21 Kasım 2013, s. 323-331.
- [19] "Technology Summary" for Innovative Technique Award, Japan Society of Civil Engineers, 2009. http://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter24/index_files/techaward.htm, Erişim Tarihi: 22.02.2016.
- [20] Vlahovic, M.M., Savic, M.M., Martinovic, S.P., Boljanac, T.D., Volkov-Husovic, T. Use of Image Analysis for Durability Testing of Sulfur Concrete and Portland Cement Concrete, *Materials and Design*, 2011, s. 346-354.
- [21] ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-11) an ACI Standard and Commentary*, 2011.
- [22] Khademi, A.G., Sar, H.I.K. Comparison of Sulfur Concrete, Cement Concrete and Cement-sulfur Concrete and Their Properties and Application, *Current World Environment*, Cilt 10, 2015, s.201-207.
- [23] Grugel, R.N. *Sulfur Concrete for Lunar Applications-Environmental Considerations*, Marshall Space Flight Center, Alabama, 2008.
- [24] <http://www.shell.com/content/dam/shell/static/sulphur/downloads/shell-thiocrete-brochure.pdf>, Erişim Tarihi: 24.02.2016.
- [25] Crucq, P.C., Hoppen, H. Sulphur Concrete Offers Excellent Resistance to the Effects of Seawater and Weathering, *Land and Water*, Sayı No:4, Nisan 2013.
- [26] McBee, W.C., Sullivan, T.A., Jong, B.W. *Industrial Evaluation of Sulfur Concrete in Corrosive Environments*, Bureau of Mines Report of Investigations, 1983.
- [27] ASTM C39 / C39M-15a, *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM International.
- [28] ASTM C109 / C109M-16, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, ASTM International.
- [29] ASTM C78 / C78M-15b, *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*, ASTM International.
- [30] ASTM C496 / C496M-11, *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM International.
- [31] ASTM C469 / C469M-14, *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, ASTM International.
- [32] Production and Transport Machines for Sulphur Concrete, <http://www.agt-gmbh.com/mobileschwefelbetongeraete-t-e.html>, Erişim Tarihi: 22.02.2016.
- [33] <http://www.burcmak.com/2012-03-10-17-08-42/2012-03-10-12-26-14/12-7h-beton-mikseri.html>, Erişim Tarihi: 24.02.2016.
- [34] Soderberg, A.F. *A New Construction Material*, Sudicrete, SUDIC, Calgary, Kanada, 1983.
- [35] Bozkurt, R. Kükürt, *Endüstriyel Hammaddeler El Kitabı*, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, 1989.
- [36] MTA Genel Müdürlüğü. http://www.mta.gov.tr/v2.0/default.php?id=maden_rezervleri, Erişim Tarihi: 22.02.2016.
- [37] Tüpraş 2013 Faaliyet Raporu. <http://www.tupras.com.tr/file.debug.php?fileID=3192>. Erişim Tarihi: 22.02.2016.
- [38] Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, *Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu-Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Kimya Sanayii Hammaddeleri Cilt 1. (Fosfat-Kükürt-Alunit) Çalışma Grubu Raporu*, Ankara, 2001.
- [39] Kerkhoff, B. *Effects of Substances on Concrete and Guide to Protective Treatments*, Portland Cement Association, 2007.
- [40] Neville, A.M. *Properties of Concrete*, Trans-Atlantic Publications, Inc., 5th Edition, 2012.
- [41] Mesters C. *Future Supply of Sulphur Opportunities for New Process and Products* presented at Topsøe Catalysis Forum, 2007.
- [42] Loov, R.E., Vroom A.H., Ward, M.A. Sulfur Concrete-A New Construction Material, *PCI Journal*, Ocak-Şubat 1974.
- [43] "Gazprom Entering Construction Material Market, 13 Mart 2014", <http://www.gazprom.com/press/reports/2014/tons-of-sulfuric-concrete/>. Erişim Tarihi: 12.03.2016.
- [44] Kalb, P.D., Vagin, S., Beall, P.W., Levintov, B.L. *Sustainable Development in Kazakhstan: Using Oil & Gas Production by-Product Sulfur for Cost Effective Secondary End-Use Products*, Presented at the REWAS 2004 Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology, Madrid, İspanya, Eylül 2004.
- [45] Shell. *Shell Sulphur Solutions-Shell Thiocrete Technologies for Sulphur-Enhanced Concrete*, Eylül 2010.
- [46] VCS, Verified Carbon Standard. *VM0031-Methodology for Precast Concrete Production using Sulphur Substitute*, 15 Mayıs 2015.
- [47] *The Commission of the European Communities Nuclear Science and Technology. Modified Sulphur Cement: A Low Porosity Encapsulation Material for Low, Medium and Alpha Waste*, EUR 12303, Lüksemburg, Son Rapor, 1989.
- [48] Kalb, P.D., Heiser III J.H., Colombo P. *Comparison of Modified Sulfur Cement and Hydraulic Cement for Encapsulation of Radioactive and Mixed Wastes, Effects of Substances on Concrete and Guide to Protective Treatments*, Department of Nuclear Energy, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, 1990.