

Arıtılmış Atık Suyun Çimento Esaslı Sistemlerde Karma Suyu Olarak Kullanılmasının Araştırılması

Investigation on the Use of Treated Wastewater as Mixing Water in Cementitious Systems

Serhan ULUKAYA¹

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Davutpaşa Kampüsü, 34220, Esenler, İstanbul, Türkiye

Öz

Ülkemizde ve Dünyada hızla artan nüfusun bir sonucu olarak, doğal su kaynaklarına olan ihtiyaç artmaktadır. Artan su talebi doğal su kaynaklarının tükenmesine yol açarken, buna mukabil artan atık su miktarı da kalan doğal kaynakların kirlenmesine ve özellikle tatlı suların kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, tatlı su kaynaklarının kirlenmesini önlemek için mevcut su kaynaklarının akıllıca kullanılması ve atık suların yeniden kullanılması gerekmektedir. Geri dönüştürülen atık sular parkların, spor tesislerinin ve otoyolların sulanmasının yanı sıra yangınla mücadele, inşaat alanlarında partikül emisyon kontrolü ve beton üretimi için de kullanılabilir. Bu çalışma, şehir atık suyunu arıtan membran biyoreaktörün çıkış suyunun beton üretiminde karma suyu olarak kullanımını araştırmaktadır. Bu atık suyun uygunluğunu değerlendirmek için öncelikle üretilen çimento harçlarının kıvam, priz süresi, birim-hacim ağırlık ve dayanım gelişimi gibi taze ve sertleşmiş hal özellikleri araştırılmıştır. Geri kazanılan su ile üretilen numunelerin priz başlangıç ve bitiş süreleri, damıtılmış su ile üretilen numunelerden elde edilenlerden %25'ten daha az sapma göstermiştir. Farklı su/çimento oranları ve kür koşulları etkisi altında geri kazanılan su, damıtık su ve musluk suyu ile üretilen numunelerin farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında dalgalı bir trend oluşurken; TS EN 1008'e göre yapılan değerlendirmede geri kazanılan su ile üretilen numunelerin damıtık su ile üretilen numunelere göre normalize basınç dayanımının hem 7. günde hem de 28. günde asgari %90'lık limit değerinin üzerinde olduğu görülmüştür. Elde edilen bu sonuçların ardından, çalışmada kullanılan suyun çimento esaslı sistemlerin karma suyu olarak potansiyel taşıdığı, ancak bu çıkarımın dayanıklılık ve donatı korozyon testlerini de içeren ek araştırmalarla desteklenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atık su, Karma suyu, Priz süresi, Basınç dayanımı

Abstract

As a result of rapidly growing population, the need for natural water resources is increasing. While increasing water demand leads to depletion of natural water resources, the corresponding increase in amount of wastewater causes pollution of the remaining natural resources and deterioration of the quality of fresh water. Therefore, to prevent pollution of freshwater resources, it is crucial to use existing water resources wisely and reuse wastewater. Recycled wastewater can be used for irrigation of parks, sports facilities and highways, as well as for fire-fighting, particulate emission control in construction sites and concrete production. This study focuses on the use of effluent of a membrane bioreactor treating municipal wastewater as mixing water for concrete production. To evaluate the conformity of this wastewater, the fresh and hardened properties of the cement mortars produced, such as consistency, setting time, density and strength development, were monitored. The initial and final setting times of the samples produced with wastewater deviated less than 25% from those obtained from samples produced with distilled water. A fluctuating trend was observed between the compressive strengths of the specimens produced with different water types, however, in evaluation made according to TS EN 1008 demonstrated that the normalized compressive strength of the specimens produced with wastewater was above 90% at both 7th and 28th days. Following these results, it was concluded that wastewater used in the study has potential as mixing water for cementitious systems, but this conclusion should be supported by additional research including durability and reinforcement corrosion tests.

Keywords: Wastewater, Mixing water, Setting time, Compressive strength

I. GİRİŞ

Beton, Dünyada sudan sonra en fazla tüketilen madde ve en fazla kullanılan yapay malzemedir. 2020 yılı verilerine göre Dünyada yıllık beton üretimi yaklaşık 14 milyar m³'tür (çimento üretimi 4,2 milyar ton) [1]. Dünya nüfusunun

8 milyar olduğu kabul edilirse, kişi başına yıllık yaklaşık 2 m³ beton tüketimi gerçekleştiği görülmektedir. Hem küresel hem de yerel ölçekte sürdürülebilir üretim ve kalkınma hedeflerinin ön planda olduğu günümüzde, beton üretiminin de bu hedefler doğrultusunda şekillenmesi kaçınılmazdır. Yarım yüzyılı aşkındır bu konu üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda beton bileşenlerinin doğal kaynaklardan temini yerine geri kazanım yolu ile elde edilen malzemelerden oluşması ya da alternatif malzemelerin kullanılması gibi seçenekler ön plana çıkmıştır. Doğal agrega yerine hafriyat vb. beton atıklardan elde edilen geri kazanılmış agrega kullanılması, üretiminde yüksek enerji sarfiyatı gereken ve yüksek miktarda karbon emisyonu ortaya çıkan klinker/çimento yerine alternatif bağlayıcılar kullanma veya atık durumundaki yapay puzolanlardan yararlanma gibi yöntemler günümüzde yaygın olarak tercih edilen seçeneklerdir.

Geleneksel betonun temel bileşenlerinden biri de sudur. Beton bileşiminde yer alan karma suyunun iki ana fonksiyonu bulunmaktadır. Bunlar, çimento hidratasyonunu sürdürmek ve tanelerin yüzeyi ıslatarak gerekli işlenebilirliği sağlamaktır [2]. Bu iki fonksiyonu yerine getirecek suyun içilebilir kalitede olması tavsiye edilirken, beton karışım suyu olarak kullanılacak kaynağın kontrolü ve uygunluğu için TS EN 1008'de yer alan analizlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir [3]. Söz konusu standartta öncelikle su kaynakları sınıflandırılırken, bunlardan hangilerinin beton üretiminde kullanılabileceği ve uygunluğunun kontrolü için yapılacak deneysel çalışmalar tarif edilmiştir. Örneğin içilebilir sular herhangi bir deney yapılmaksızın beton üretiminde kullanılabilirken; beton sektöründeki süreçlerden geri kazanılan sular, yer altı kaynaklarından çıkan sular, tabii yüzey suları ve sanayi atık sular belirli bir deneysel işlem sonrası uygunluğu kanıtlandıktan sonra kullanılabilir. Bunların yanı sıra, deniz suyu ve acı göl suları beton için uygun, betonarme sistemler için uygun bulunmazken; kanalizasyon sularının beton üretimi için kullanılması uygun bulunmamaktadır. Yapılan akademik çalışmalar ise daha çok hazır beton sektöründe, özellikle transmikser yıkama suyundan geri kazanılan suların yeniden kullanımı üzerinde yoğunlaşmaktadır [4-10]. Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO) tarafından hazırlanan raporda transmikserlerin yıkanması amacıyla bir metreküp beton için 50 l'lik su sarfiyatı gerektiği bildirilmiştir [11]. Ülkemizde yaygın olarak transmikserlerin yıkanması ile oluşan yıkama suyu ve içerdiği katı maddeler çökeltme havuzlarına aktarılmakta ve ardından çökeltme havuzlarının en sonundakinden alınan su, beton imalatında ya da transmikser temizliğinde kullanılmaktadır. Benzer başka uygulamalarda, bu havuzlara konumlandırılan karıştırıcılar sayesinde ince katı tanelerin su içerisinde askıda kalması sağlanmakta ve elde edilen su beton üretiminde kullanılmaktadır [12]. Literatürde yer alan bu ve benzeri çalışmalardan

çıkan bir diğer sonuca göre yıkama suyu içindeki ince malzeme, çimento veya ince agrega ile yer değiştirmeli olarak kullanılabilir [13].

Yukarıda irdelenen mevcut durum altında sürdürülebilir beton üretimi için sınırlı doğal su kaynaklarının yetmeyeceği ve geri kazanılmış su türlerinin mutlaka beton üretiminde karışım suyu olarak kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada, diğer su kaynaklarından farklı olarak, Atık Su Arıtma Tesisi membran biyoreaktör çıkışından alınan suyun, çimento bağlayıcılı harçların taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerine etkisi ile TS EN 1008'de tanımlı fiziksel ve mekanik özelliklere göre uygunluğu araştırılacaktır. Söz konusu uygunluğun kontrolü için karışımların üretiminde musluk suyu dışında referans olarak damıtık su kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilecek sonuçlar ile araştırmanın derinleştirilmesi ve sonraki araştırmalara yön vermesi amaçlanmaktadır.

II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Atık su arıtma tesisinden geri kazanılan suyun çimento esaslı sistemlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmak amacıyla detayları aşağıda verilen deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda su/çimento oranı 0,40, 0,50 ve 0,55 olan üç farklı seri çimento harcı üretilmiştir. Bu karışımların her birinde şehir şebeke suyu, TS EN 1008'de tanımlı referans su kaynağı olan damıtık su ve arıtılmış atık su olmak üzere üç farklı tip su kullanılmıştır. Üretimde kullanılan malzemeler ve özellikleri aşağıda verilmiştir.

2.1. Kullanılan Malzemeler

2.1.1. Çimento

Üretimlerde Akçansa Çimento'dan temin edilen CEM I 42,5 R sınıfı çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Özellik	Sonuç
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,12
Priz Başlama / Bitiş Süresi (dk)	121 / 186
Hacimce Genleşme (mm)	1
Özgül Yüzey (cm ² /g)	3958
SiO ₂ (kütlece, %)	19,77
Al ₂ O ₃ (kütlece, %)	4,72
Fe ₂ O ₃ (kütlece, %)	3,63
CaO (kütlece, %)	63,42
MgO (kütlece, %)	0,68
SO ₃ (kütlece, %)	3,28
Çözünmez Kalıntı (kütlece, %)	0,71
Kızdırma Kaybı (kütlece, %)	2,95
2 / 28 Günlük Dayanım (MPa)	33,3 / 51,7

2.1.2. İnce agrega

Harçlarda ince agrega olarak özgül ağırlığı $2,68 \text{ g/cm}^3$, maksimum tane boyutu 2 mm olan silis esaslı CEN standart kumu kullanılmıştır [14].

2.1.3. Su

Harç üretimlerinde karışım suyu olarak İstanbul şehir şebeke suyu, piyasadan satın alınan damıtık su ve İSKİ Ataköy İleri Biyolojik Atık Su Arıtma Tesisi Membran Biyoreaktör çıkışından alınan su olmak üzere üç farklı su kaynağı kullanılmıştır. Alınan 10 litrelik atık su örneğinden, ki makalenin bundan sonraki bölümlerinde “geri kazanılan su” olarak ifade edilecektir, hazırlanan üçer numune üzerinde yoğunluk ve tabana çöken katı madde tayini yapılmış, katı madde miktarı TS EN 1008’deki limit değere göre kontrol edilmiştir (Tablo 2). Buna ek olarak laboratuvarında yapılan kimyasal iyon analizi sonuçlarına göre geri kazanılan suyun sülfat, çinko, klorür ve fosfat miktarları sırasıyla 340 mg/l , $0,0138 \text{ mg/l}$, 170 mg/l ve $2,14 \text{ mg/l}$ ’dir.

Tablo 2. Geri kazanılan suda yoğunluk ve tespit edilen katı madde miktarı

Numune No.	Yoğunluk (g/cm^3)	Çöken Katı Madde Miktarı (ml)	Çöken Katı Madde için Limit Değer [3]
1	0,999	0,25	
2	1,002	0,63	< 4 ml
3	1,001	0,82	

2.1.4. Kimyasal katkı

Su/çimento (s/ç) oranı 0,40 olan harç serisinin işlenebilirliğini arttırmak ve aynı zamanda geri kazanılan suyun polimer esaslı bir kimyasal katkı ile uyumunu kontrol etmek amacıyla yüksek oranda su azaltan polikarboksilat esaslı Plastol Ultra 209 hiperakışkanlaştırıcı (H.A.) beton katkısı kullanılmıştır. Katkının özellikleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Kimyasal katkı maddesinin özellikleri

Özellikler	Analiz Sonuçları
Fiziksel Yapısı ve Renk	Sarımtırak, homojen sıvı
pH / Yoğunluk (kg/l)	2-4 / 1,05-1,10

2.2. Harç Üretimi, Kürü ve Kodlanması

Deneysel çalışma kapsamında üretilen çimento bağlayıcı karışımlarda 0,40, 0,50 ve 0,55 olmak üzere üç farklı s/ç oranı kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0,40 olan harç serisinin ön üretimlerinde görülen düşük işlenebilirliğin kalıba yerleşme problemi oluşturacağı düşünüldüğünden; aynı zamanda polimer esaslı kimyasal bir katkının geri kazanılan su ile kullanımının özellikle priz süresine etkisi araştırıldığından bu seride –çimento kütlelerine oranla– %1 oranında hiperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Tüm serilerde

çimento:kum oranı ağırlıkça (1:3) olmak üzere sabittir. Karıştırma işlemleri TS EN 196-1’de standart harç üretimi için tarif edildiği şekilde yapılırken, tüm serilerin yukarıda belirtilen karışım oranlarına uygun şekilde hazırlanan örnek malzeme miktarları Tablo 4’te verilmiştir.

Sertleşmiş harç deneyleri için kalıba yerleştirilen numuneler havada ve suda olmak üzere iki ayrı kür koşuluna tabi tutulmuştur. Havada kür edilen numuneler sıcaklığı $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ve bağıl nemi % 55 ± 5 olan nem kabini muhafaza edilmiştir. Suda kür edilen numuneler ise sıcaklığı $20 \pm 2^\circ\text{C}$ olan kirece doygun şebeke suyu ile dolu havuzlarda muhafaza edilmiştir. Deney yaşı gelen ve su küre maruz bırakılan numuneler, deney öncesi sudan çıkarılmış ve yüzeyi tamamen kuruduktan sonra deneye geçilmiştir.

Üretilen numunelerde kodlama işlemi, üretimde kullanılan su kaynağı ve su/çimento oranları dikkate alınarak yapılmıştır. Şehir şebeke musluk suyu ile üretilen harçlar M harfi ile başlarken, damıtık su ile üretilen harçlar D ve geri kazanılan su ile üretilen harçlar G harfiyle başlamaktadır. İlk harften sonra gelen sayı ise su/çimento oranını göstermektedir. Örneğin M/50 kodu harç üretiminde şebeke musluk suyu kullanıldığını ve s/ç oranının 0,50 olduğunu; G/40 kodu ise harç üretiminde geri kazanılan su kullanıldığını ve s/ç oranının 0,40 olduğunu göstermektedir.

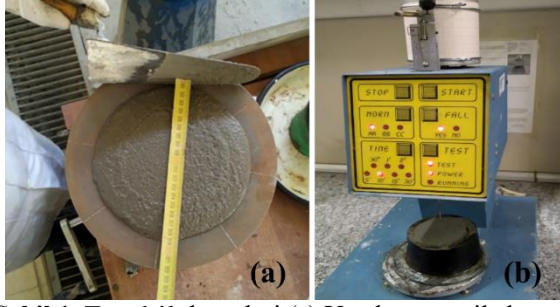
Tablo 4. Karışımların malzeme miktarları

Harç Kodu	Çimento (g)	Su (g)	Kum (g)	Hiper-Akış. (g)
M-D-G/40	450	180	1350	4,5
M-D-G/50	450	225	1350	-
M-D-G/55	450	247,5	1350	-

2.3. Yöntem

2.3.1. Kıvam tayini

Üretilen harçların taze haldeki işlenebilirliğini değerlendirmek için TS EN 1015-3’e uygun şekilde yayılma deneyi ile kıvam tayini yapılmıştır [15]. Buna göre üst çapı 70 mm, alt çapı 100 mm olan 60 mm yüksekliğe sahip kesik koni şekilli kalıp 2 tabaka halinde harç ile doldurulmuş, her bir tabaka tokmak kullanılarak 10 kısa vuruş ile sıkıştırılmıştır. Kalıp üst yüzeyinden taşan harç, mala yardımı ile alındıktan sonra kalıp düşey doğrultuda çekilerek kaldırılmış; ardından, yayılma tablası yaklaşık olarak saniyede bir defa olmak üzere 15 defa düşürülerek harç kütlelerinin yayılma tablası üzerinde yerleşmesi sağlanmıştır. Deney sonunda harç kütlelerinin birbirine iki dik doğrultudaki yayılma çapları (d_1 , d_2) ölçülmüş (Şekil 1.a), ortalama yayılma çapları hesaplanarak elde edilen tüm sonuçlar Bölüm 2.4.1’de yer alan Tablo 5’te verilmiştir.



Şekil 1. Taze hâl deneyleri (a) Yayılma çapı ile kıvam tayini deneyi (b) Priz süresi deneyi

2.3.2. Priz süresi

Üretilen harçların priz başlangıç ve bitiş sürelerini belirlemek için TS EN 196-3'e göre priz deneyi gerçekleştirilmiştir [16]. Buna göre, önce s/ç oranı 0,30 olan standart kıvamda çimento hamurları üretilmiştir. Bunun yanı sıra, geri kazanılan suyun kimyasal katkı ile uyumunu kontrol etmek için s/ç oranı 0,20 olan -çimento ağırlığına göre- %1 katkılı standart kıvamda çimento hamuru üretilmiştir. Otomatik Vicat cihazı üzerindeki standart kalıba yerleştirilen hamurların üzerine 10 dakika aralıklarla Vicat iğnesi batırılmıştır. İğneyle taban plakası arasındaki mesafenin (6 ± 3) mm olduğu ana kadar geçen süre, çimentonun priz başlangıç süresi olarak; iğnenin numuneye ilk defa $\sim 0,5$ mm girdiği ana kadar geçen süre ise priz bitiş süresi olarak dikkate alınmıştır (Şekil 1.b). Elde edilen tüm sonuçlar ve TS EN 1008'deki limit değerler Bölüm 2.4.2'de yer alan Tablo 6'da sunulmuştur.

2.3.3. Birim-hacim ağırlığın belirlenmesi

Sertleşmiş harç numunelerin 28. günde birim-hacim ağırlıkları 5 cm'lik küp numuneler kullanılarak ve TS EN 12390-7 standardında tarif edilen yöntemler kullanılarak belirlenmiştir [17]. Numunelerin kütle ölçümü için standartta ifade edilen "teslim alındığı durumdaki kütle ölçümü" yapılmıştır. Buna göre, nem kabiniinde sabit sıcaklık ve nemde muhafaza edilen numunelerin doğrudan; suda bekletilen numunelerin ise yüzeyi kurulandıktan sonra kütle ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Hacim ölçümü için yine standartta belirtilen "küp şekilli numunelerde belirtilmiş boyutların kontrol edilerek kullanılmasıyla hesaplama" yöntemi kullanılmıştır. Yapılan kütle ve hacim ölçümleri kullanılarak harç serilerinin birim-hacim ağırlıkları hesaplanmıştır. Her bir seri için üçer numune kullanılarak ortalama birim-hacim ağırlıkları hesaplanmış, sonuçlar Bölüm 2.4.3'te sunulan Şekil 2 ve 3'te verilmiştir.

2.3.4. Basınç deneyi

Harçların basınç dayanımlarını belirlemek için üretilen harçlar 5 cm'lik küp kalıplara yerleştirilmiştir. Yukarıda açıklandığı gibi havada ve suda kür edilen bu numuneler erken dayanım takibi için 7. günde, standart dayanım için 28. günde basınç testine tabi tutulmuştur. ASTM C109 standardına [18] uygun şekilde her bir harç serisi için üçer numunede $0,6\pm 0,2$ MPa/sn'lik yükleme hızı ile gerçekleştirilen basınç testi sonucunda

elde edilen kırılma yükü, yüklemenin yapıldığı kesit alanına bölünerek basınç dayanımları hesaplanmış, ortalama sonuçlar Bölüm 2.4.4'te sunulan Şekil 4 ve 5'te verilmiştir.

2.4. Sonuçlar ve Değerlendirme

2.4.1. Kıvam

Kıvam deneyi sonuçlarına göre her bir farklı s/ç oranında üretilen seriler için ortak olmak üzere geri kazanılan su ile üretilen harçların yayılma çapları diğer su kaynakları ile üretilen harçların yayılma çaplarına yakın değerler almıştır (Tablo 5). Geri kazanılan sudaki çöken katı madde miktarının oldukça düşük olmasının, yayılma çaplarında görülen benzerliğin nedeni olduğu düşünülmektedir. Şunu da hatırlatmak gerekir ki M-D-G/40 serilerinde görülen yüksek yayılma çapı değerlerinin nedeni %1 hiper-akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmasıdır. Ön üretimlerde katkısız olarak üretilen bu seriler için yayılma çapı değerleri 150 mm'nin altında çıkmıştır.

Tablo 5. Kıvam deneyi sonuçları

Harç Kodu	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d _{ort} (mm)
M/40	195	200	198
D/40	190	190	190
G/40	200	200	200
M/50	170	165	168
D/50	165	170	168
G/50	165	165	165
M/55	185	190	188
D/55	185	185	185
G/55	190	195	192

2.4.2. Priz başlangıç ve bitiş süreleri

Tablo 6'da sunulan priz süresi sonuçlarına göre aynı s/ç oranı ile üretilen kimyasal katkısız hamurlar dikkate alındığında geri kazanılan su kullanımının priz başlangıç ve bitiş sürelerinde belirgin bir değişime yol açmadığı görülmektedir. Bouaich vd. tarafından arıtılmış atık sular ile üretilen çimento hamurlarının priz sürelerinde de benzer şekilde önemsenmeyecek düzeyde bir değişim gerçekleşmiştir [19]. TS EN 1008'e göre beton karma suyu olarak uygunluğu araştırılan su ile yapılan testlerde priz başlangıç süresi, 60 dakikadan daha erken olmamalı ve damıtık su ile üretilen hamurda gerçekleştirilen referans ölçümlerden belirlenen priz başlangıç süresine kıyasla % 25'in üzerinde değişim göstermemelidir. Öte yandan, priz bitiş süresi 12 saatten daha fazla olmamalı ve damıtık su ile üretilen hamurda gerçekleştirilen referans ölçümlerden belirlenen priz bitiş süresine kıyasla % 25'in üzerinde değişim göstermemelidir. Bu limit değerler ve Tablo 6'da verilen deney sonuçları dikkate alındığında geri kazanılan su ile üretilen hamurların priz başlangıç süresinin 60 dakikalık limit değerinin üzerinde olduğu; priz bitiş süresinin de 210 dakika ile 12 saatlik limit değerinin altında olduğu görülmüştür. Bir diğer uygunluk kriteri olan damıtık su ile üretilen referans hamurdan maksimum %25'lik sapma değeri kontrol edildiğinde, priz başlangıç süresinde herhangi bir değişiklik olmadığı, priz bitiş süresinde ise %5'lik bir

değişim olduğu ve bu değer limit sapma değerinin altında olduğu görülmüştür.

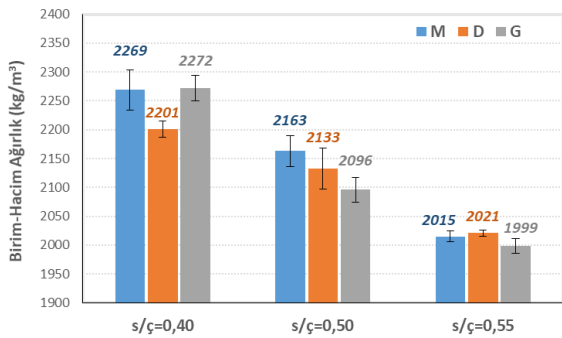
Tablo 6. Priz süresi deneyi sonuçları

Su/çimento Oranı / Su Türü	Priz Başlangıç Süresi (dk.)	Priz Bitiş Süresi (dk.)	TS EN 1008'deki Limit Değerler
0,3 / M	120	200	* $t_{baş} \geq 60$ dk. * $t_{bit} \leq 12$ sa.
0,3 / D	120	200	* Damıtık su ile üretilen hamurun priz başlangıç ve bitiş sürelerine göre maksimum %25 sapma
0,3 / G	120	210	
0,2 / G (+ %1 H.A.)	140	240	

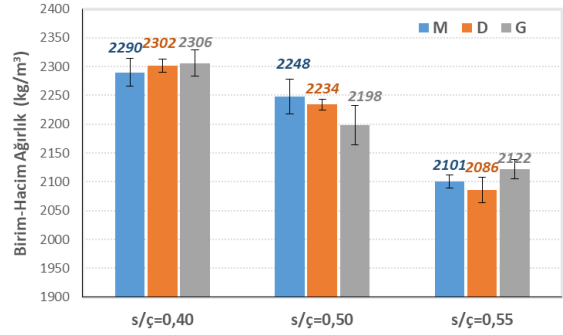
Geri kazanılan su ve %1 hiper-akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ile üretilen hamurların uygunluğu kontrol edildiğinde priz başlangıç ve bitiş sürelerinin $t_{baş} \geq 1$ saat ve $12 \text{ saat} \leq t_{bit}$ olarak verilen limit değerlere uyduğu; ayrıca, priz başlangıç ve bitiş süresi için sırasıyla %17 ve %20'lik sapma değerlerinin de ilgili standartta verilen maksimum %25'lik sınıra altında kaldığı tespit edilmiştir.

2.4.3. Birim-hacim ağırlık

Havada ve suda kür edilen numunelerin birim-hacim ağırlıkları karşılaştırıldığında farklı değişim trendleri olsa da değerler arasında belirgin farklılıklar bulunmamaktadır. Her bir s/ç oranında en düşük birim-hacim ağırlık değeri referans alındığında diğer su kaynakları ile üretilen harçların birim-hacim ağırlıkları %0,7 ila %3,2 arasında değişmektedir. Özellikle geri kazanılan su ile üretilen harçlar ile diğer su kaynakları ile üretilen harçlar karşılaştırıldığında birim-hacim ağırlık değerlerinde göze çarpan açık bir farklılık olmadığı görülmüştür. Yine geri kazanılan su ile üretilen harçların tekil birim-hacim ağırlık değerlerine bakıldığında harç numunelerin üniform bir yapı sergilediği tespit edilmiştir.



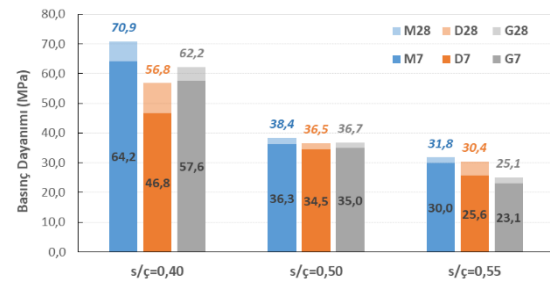
Şekil 2. Havada kür edilen numunelerin birim-hacim ağırlıkları



Şekil 3. Suda kür edilen numunelerin birim-hacim ağırlıkları

2.4.4. Basınç dayanımı

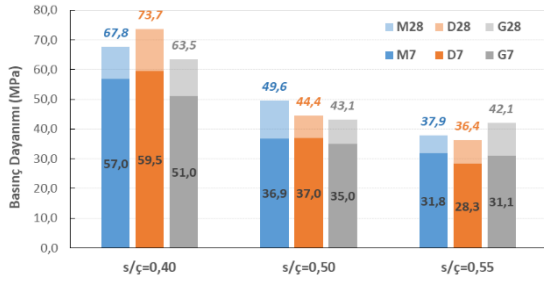
Havada kür edilen harç serileri irdelendiğinde (Şekil 4), s/ç oranı 0,40 olan seride şebeke suyu ve damıtık su ile üretilen harçların 7 ve 28 günlük dayanımlarında belirgin bir fark olduğu görülmüştür. Şebeke suyu ile üretilen harçların 7 ve 28. günlerdeki dayanımı damıtık su ile hazırlanan harçlara göre sırasıyla yaklaşık %37 ve %25 daha fazladır. Benzer şekilde, aynı s/ç oranı için şebeke suyu ile üretilen harçların dayanımı, geri kazanılan su ile üretilen harçların dayanımından yüksektir; ancak değişim yüzdesi (7. ve 28. günler için sırasıyla yaklaşık %12 ve %14) daha düşüktür. Literatürde değişik oranlarda geri kazanılmış su içeren betonlarda yapılan bir çalışmada, elde edilen basınç dayanımlarının şebeke suyu ile üretilen betonların basınç dayanımının %85-94 mertebesine düştüğü, ayrıca diğer mekanik özelliklerinin de (eğilme dayanımı, elastisite modülü) olumsuz yönde değiştiği belirtilmiştir; bu sonucun geri kazanılan su içerisindeki katı maddelerin etrenjit bulundurmasına ve bunların da suda çözünerek gözenekli bir yapı oluşturmaya bağlanmıştır [20].



Şekil 4. Havada kür edilen harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

Diğer s/ç oranları ile üretilen serilerin dayanımları karşılaştırıldığında, genel olarak yukarıda belirtilen seviyede bir değişim olmadığı görülmüştür. Sadece s/ç=0,55 olan seride şebeke suyu ile üretilen harçların dayanımları ile geri kazanılan su ile üretilen harçların dayanımları arasında 7. ve 28. günler için yaklaşık %27 ve %30 farklılık vardır. Son olarak havada kür edilen tüm numunelerin dayanım gelişimleri takip edildiğinde 7 günlük dayanım değerlerinin 28 günlük dayanım değerlerinin genellikle %90'ından büyük olduğu; bir

başka deyişle, standart dayanım değerlerinin ~%90'ının ilk bir hafta içinde kazanıldığı belirlenmiştir.



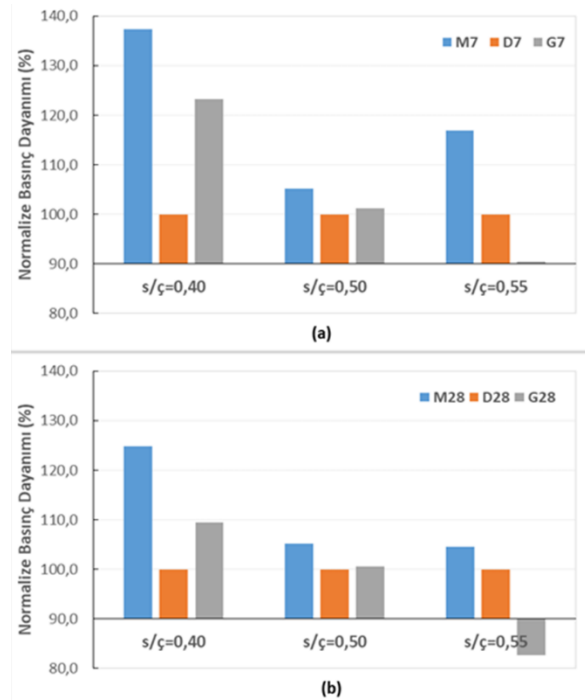
Şekil 5. Suda kür edilen harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

Suda kür edilen numunelerin basınç dayanımları irdelendiğinde (Şekil 5), havada kür edilen numunelerden farklı olarak, bu kez en yüksek dayanım değerlerinin (7 ve 28. günler için sırasıyla 59,5 MPa ve 73,7 MPa) damıtık su ile üretilen harç grubunda olduğu görülmektedir. Bu grubun dayanım değerleri, şebeke suyu ve geri kazanılan su ile üretilen harçların 28 günlük dayanımları ile karşılaştırıldığında sırasıyla %9 ve %16 oranında daha yüksek basınç dayanımına sahiptir. Su/çimento oranı 0,50 olan serilerin 7 günlük dayanımları arasında bariz bir farklılık bulunmazken; 28 günlük dayanımlar irdelendiğinde, şebeke suyu ile üretilen harç dayanımlarının diğer iki harç grubuna göre ~%10-15 oranında yüksek olduğu görülmüştür. Son olarak s/ç oranı 0,55 olan seriler incelendiğinde, 7 günlük dayanım değerlerinin birbirine yakın olduğu görülürken, 28 günlük dayanımı en yüksek olan harç grubu geri kazanılan su ile üretilen seridir.

Literatürde benzer su kaynakları ile yapılan çalışmaların ilgili bölümleri incelendiğinde, elde edilen sonuçların bu çalışmadaki sonuçlarla yakınlık gösterdiği tespit edilmiştir. Örneğin Soltanianfard vd. yaptıkları çalışmada farklı filtreleme aşamalarından temin ettikleri atık suları karma suyu olarak kullanmış, elde ettikleri basınç dayanımı sonuçlarında bu çalışmadakine benzer şekilde dalgalı bir trend görmüşlerdir [21]. Öte yandan, Abushanab vd.'nin su kürü uyguladıkları 7, 28 ve 90 günlük çimento harcı numunelerinden elde ettikleri tüm basınç dayanımları değerlerinin az da olsa referans numunelerden düşük çıktığı ifade edilmiştir. Araştırmacılar bu düşüşü arıtılmış suda bulunan askıdaki katı maddeler, çinko ve fosfatın çimento hidrasyonunu geciktirmesine ve çimento-agrega arayüzey bölgesini zayıflatmasına bağlamaktadır [22]. Bu çalışmada kullanılan arıtılmış sudaki askıda katı madde oranı vb. safsızlıkların az oluşunun dayanımdaki söz konusu farklılığın kaynağı olduğu düşünülmektedir ki bu durum Venkatesan vd. tarafından yapılan çalışma ile kanıtlanmıştır. Yazarlar yaptıkları kapsamlı çalışmada kullandıkları beş farklı su kaynağı ile ürettikleri numunelerin taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini incelemiş ve genel olarak su içeriğinin bu özellikleri baskın şekilde değiştirdiği;

ancak dayanıklılık göz ardı edilirse dayanım açısından arıtılmış suların karma suyu olarak beton üretiminde kullanılabileceğini belirtmiştir [23].

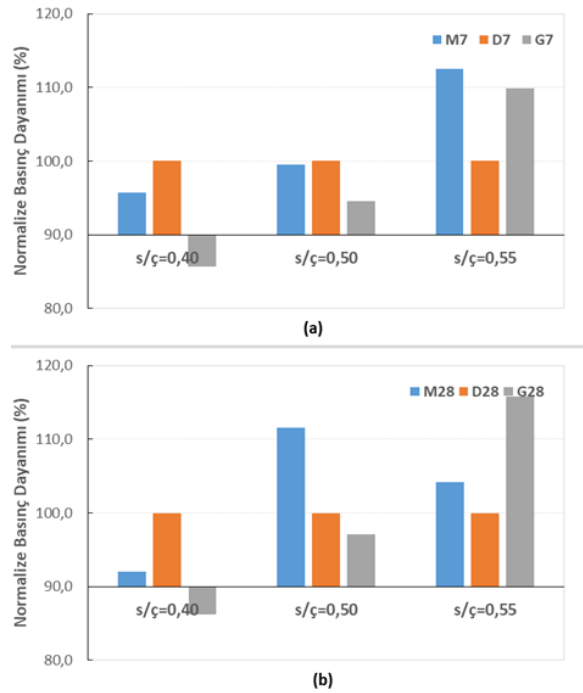
TS EN 1008'e göre karışım suyu olarak kullanılabilirliği araştırılan su kaynağının dayanım açısından uygunluğu için bu su ile üretilen harçların 7 ve tavsiye olarak 28 günlük dayanımının, damıtık su ile üretilen aynı yaşlardaki referans harç dayanımına oranının %90'ın üzerinde olması gerekmektedir. Damıtık su ile üretilen referans harcı ise TS EN 196-1'e göre s/ç oranı 0,50 olan ve suda kür edilen standart çimento harcıdır. Yukarıda açıklanan uygunluk kriteri uyarınca deneysel çalışma kapsamında üretilen tüm harçların basınç dayanımları, damıtık su ile üretilen harçların basınç dayanımına göre normalize edilmiş, sonuçlar Şekil 6 ve 7'de sunulmuştur.



Şekil 6. Havada kür edilen numunelerin (a) 7 günlük (b) 28 günlük normalize basınç dayanımları

TS EN 1008'deki s/ç oranı ve kür koşullarına göre incelendiğinde geri kazanılan su ile üretilen harçların basınç dayanımının hem 7. günde hem de 28. günde %90'lık asgari limit değerinin üzerinde olduğu görülmüştür. Şekil 7'de verildiği üzere s/ç oranı 0,50 olan ve geri kazanılan su ile üretilen harçların normalize dayanım değerleri 7 ve 28. günler için sırasıyla %95 ve %97'dir. Kür koşulları aynı ancak farklı s/ç oranlarına bakıldığında s/ç oranı 0,40 olan harçların 7 ve 28 günlük normalize dayanımlarının limit değerinin altında olduğu görülürken; birim çimento kütlelerine daha çok su düşen s/ç=0,55 olan seri de hem 7. günde hem de 28. günde normalize basınç dayanımları %100'ün üzerindedir. Su/çimento oranı 0,40 olan harçlardaki söz konusu normalize basınç dayanımı düşüşünün, sadece bu serilerde kullanılan kimyasal katkı ile geri kazanılan suyun

uyumsuzluğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Havada kür edilen tüm serilerde, sadece $s/\ç=0,55$ serisi hariç, geri kazanılan su ile üretilen harçların normalize dayanım değerleri %90'ın üzerindedir. Geri kazanılan su ile üretilen harçların bu $s/\ç$ grubundaki normalize dayanımları 7. ve 28. günler için sırasıyla %90 ve %83'tür. Her iki kür koşulunda da $s/\ç=0,55$ olduğu durumda uç sonuçların çıkması dikkat çekici bir başka noktadır.



Şekil 7. Suda kür edilen numunelerin (a) 7 günlük (b) 28 günlük normalize basınç dayanımları

III. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Doğal su kaynakları hızla tükenirken, insanoğlunun sudan sonra en fazla tükettiği madde olan beton üretiminin giderek artması ve bu yapı malzemesinin üretiminde de su kullanılması araştırmacıları farklı su kaynaklarının kullanılması konusunda arayışlara yönlendirmiştir. Bu çalışmada, İSKİ Ataköy İleri Biyolojik Atık Su Arıtma Tesisi'nden alınan membran biyoreaktör çıkış suyunun çimento bağlayıcı sistemlerde karma suyu olarak kullanılabilirliği fiziksel ve mekanik özellikler yönüyle araştırılmış, elde edilen genel sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur:

- Araştırılan su ile üretilen harçların işlenebilirliği ile referans alınan diğer su kaynaklarının işlenebilirliği kıyaslandığında belirgin bir farklılık gözlenmemiştir. Yapılan kıvam deneylerinde -farklı su/çimento oranlarına sahip tüm karışımlarda geçerli olmak üzere- geri kazanılan su ile üretilen harçlardaki yayılma çapı farklılığının ± 10 mm'lik sınırlar içinde kaldığı görülmüştür.
- Priz süreleri göz önüne alındığında geri kazanılan su kullanımının priz başlangıç

süresinde belirgin bir değişikliğe yol açmadığı, priz bitiş süresinde ise 10 dakikalık önemsiz bir artışa neden olduğu tespit edilmiştir.

- Her bir $s/\ç$ oranında geçerli olmak üzere, en düşük birim-hacim ağırlık değerinin referans alındığı duruma göre harçların birim-hacim ağırlıklarındaki değişim %0,7 ila %3,2 arasında kalmıştır. Bu durumun geri kazanılan sudaki çöken katı madde miktarının oldukça düşük olmasının bir sonucu olduğu düşünülmektedir.
- Serilerin basınç dayanımları kontrol edildiğinde elde edilen sonuçların su/çimento oranına ve kür koşuluna göre dalgalanma gösterdiği; bununla birlikte, kür koşullarına ve $s/\ç$ oranına bakılmaksızın geri kazanılan su ile üretilen tüm harçların 28 günlük basınç dayanımlarının 25 MPa'nın üzerinde olduğu görülmüştür. Söz konusu değer sadece suda kür edilen numuneler için kontrol edildiği zaman ölçülen 28 günlük basınç dayanımlarının 40 MPa'nın üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, tüm su/çimento oranları ve kür koşulları dikkate alınarak, sadece musluk suyu ve geri kazanılan suyun basınç dayanımları karşılaştırıldığında dayanımın ~%20-25 aralığında düşüş gösterebileceği belirlenmiştir.
- TS EN 1008 standardında bir su kaynağının beton karma suyu olarak uygunluğunun tespiti için kapsamlı bir deneysel çalışma tarif edilmiş olup, buradan elde edilecek sonuçlara dair gerek/sınır değerler yine standartta belirtilmiştir. Bunlardan askıda katı madde analizindeki çökelti miktarı, priz süresi ve basınç dayanımı için gereklilikler dikkate alındığında araştırılan su kaynağının karma suyu olarak kullanımının uygun olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yine standartta tarif edilen diğer tüm analizlerin yapılarak araştırılan suyun uygunluğu kontrol edilmelidir. Beton ve betonarme sistemlerde özellikle dayanıklılık hususunda olumsuz etki oluşturacak sülfat ve klorür iyonları ile organik madde varlığı mutlaka sorgulanmalıdır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, araştırılan su türünün beton karma suyu için alternatif bir kaynak potansiyeli taşıdığını göstermiştir. Ancak bu çalışmadaki deneysel çalışma ve TS EN 1008'de tarif edilen diğer analizler, bir su kaynağının beton karma suyu olarak kullanılabilirliğinin teyidi için yeterli değildir. Betonun uzun bir süre boyunca çevre koşullarının etkisi altında yeterli performansı gösterebilmesi için farklı bir su kaynağı ile üretilecek betonu özellikle dayanıklılık açısından değerlendirmek ve hatta çelik donatılı bir sistemde korozyon riskini irdelemek uygun bir yaklaşım olacaktır.

TEŞEKKÜR

Çalışmanın ana unsuru olan su örneğinin temini için YTÜ Çevre Mühendisliği öğretim üyesi Doç. Dr. Neslihan MANAV DEMİR'e ve İSKİ'ye; çimento tedariki için AKÇANSA Çimento'ya teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- [1] Global Cement and Concrete Association, <https://gccassociation.org/concretefuture/cement-concrete-around-the-world>, (Temmuz 2024).
- [2] Erdoğan, T.Y. (2003). Beton. 1. baskı, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayınları, Türkiye, s. 116-118.
- [3] TS EN 1008 (2003). Beton-Karma suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları. Ankara, Türkiye.
- [4] Sandrolini, F. ve Franzoni, E. (2001). Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants. *Cem. Concr. Res.*, 31, 485-489.
- [5] Su, N., Miao, B. ve Liu, F.S. (2002). Effect of Wash Water and Underground Water on Properties of Concrete. *Cem. Concr. Res.*, 32, 777-782.
- [6] Ekolu S.O. ve Dawneerangen, A. (2010). Evaluation of recycled water recovered from a ready-mix concrete plant for reuse in concrete. *J. S. Afr. Inst. Civ. Eng.*, 52, 77-82.
- [7] Tsimas, S. ve Zervaki, M. (2011) Reuse of Waste Water from Ready-mixed Concrete Plants. *Management of Environmental Quality: An Inter. J.*, 22(1), 7-17.
- [8] Wasserman, B. (2012). Wash Water in the Mix: Effects on the Compressive Strength of Concrete. *Int. J. Construct. Educ. Res.*, 8(4), 301-316.
- [9] Asadollahfardi, G., Asadi, M., Jafari, H., Moradi, A. ve Asadollahfardi, R. (2015). Experimental and Statistical Studies of Using Wash Water from Ready-mix Concrete Trucks and a Batching Plant in the Production of Fresh Concrete. *Constr. Build. Mater.*, 98, 305-314.
- [10] Audo, M., Mahieux, P. ve Turcry, P. (2016). Utilization of Sludge from Ready-mixed Concrete Plants as a Substitute for Limestone Fillers. *Constr. Build. Mater.*, 112, 790-799.
- [11] Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO) (2006). Guidance on Concrete Wash Water in the European Ready Mixed Concrete Industry. Brüksel, Belçika.
- [12] Doğan, Ü.A. ve Özkul, M.H. (2019). Hazır Beton Tesisinde Geri Kazanılan Suyun Beton Basınç Dayanımı ve Kılcallık Üzerine Etkisi. *Türkiye Hazır Beton Birliği Hazır Beton Dergisi*, 154, 73-78.
- [13] Özkul, M.H. ve Doğan, Ü.A. (2016). Transmikser Yıkama Suyunun Hazır Beton Üretiminde Geri Dönüşümü. *Türkiye Hazır Beton Birliği Hazır Beton Dergisi*, 137, 82-86.
- [14] TS EN 196-1 (2016). Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini. Ankara, Türkiye.
- [15] TS EN 1015-3 (2000). Kagir Harcı- Deney Metotları - Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası ile). Ankara, Türkiye.
- [16] TS EN 196-3 (2017). Çimento Deney Yöntemleri - Bölüm 3: Priz Süreleri ve Genleşme Tayini. Ankara, Türkiye.
- [17] TS EN 12390-7 (2019). Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş Betonun Birim Hacim Kütlesinin Tayini. Ankara, Türkiye.
- [18] ASTM C109 (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 50-mm Cube Specimens). USA.
- [19] Bouaich, F.Z., Maherzi, W., Benzerzour M., Taleb M., Abriak N-E., Rais, Z. ve Senouci, A. (2022). Mortar Mixing Using Treated Wastewater Feasibility. *Constr. Build. Mater.*, 352, 1-12.
- [20] Chatveera, B., Lertwattanaruk, P. ve Makul, N. (2006). Effect of Sludge Water from Ready-mixed Concrete Plant on Properties and Durability of Concrete. *Cem. Concr. Comp.*, 28, 441-450.
- [21] Soltanianfard, M.A., Abuhishmeh, K., Jalali, H.H. ve Shah, S.P. (2023). Sustainable Concrete Made with Wastewater from Different Stages of Filtration. *Constr. Build. Mater.*, 409, 1-13.
- [22] Abushanab, A. ve Alnahhal, W. (2022). Performance of Sustainable Concrete Incorporating Treated Domestic Wastewater. *Constr. Build. Mater.*, 329, 1-15.
- [23] Venkatesan, G., Kumar, A., ve Perumal, P. (2021). Fresh and Hardened Properties of Five Non-Potable Water Mixed and Cured Concrete: A Comprehensive Review. *Constr. Build. Mater.*, 309, 1-12.