



BUHAR KÜRÜNÜN UÇUCU KÜLLÜ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN KISA VE UZUN SÜRELİ BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ

Şirin KURBETCİ*

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Buhar Kürü, Kendiliğinden Yerleşen Beton, Uçucu Kül, Basınç Dayanımı.</i>	Bu çalışmada buhar kürünün farklı dozajlarda uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betonların kısa ve uzun süreli basınç dayanımı üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla çimento ağırlığının %0, %20, %30, %40 ve %50' si oranında uçucu kül ikame edilen 500 kg/m ³ , 550 kg/m ³ ve 600 kg/m ³ dozajlı kendiliğinden yerleşen betonların buhar kürü sonrası 1 gün, 28 gün ve 180 günlük basınç dayanımları standart kür gören betonlarla karşılaştırılmıştır. Buhar kürünün 1 günde sağladığı dayanım kazancı uçucu kül ikame oranı arttıkça artarak %24-93 arasında olmuştur. 28 günlük basınç dayanım oranları ise uçucu kül ikame oranı arttıkça artmış, buhar kürü etkisiyle oluşan dayanım kayıpları %13 ile %6 arasında değişmiştir. İleri yaşta ise uçucu kül ikame oranı arttıkça buhar kürlü ve standart kürlü dayanımlar arasındaki fark büyümüştür.

EFFECT OF STEAM CURING ON SHORT AND LONG-TERM COMPRESSIVE STRENGTH OF SELF-COMPACTING CONCRETE WITH FLY ASH

Keywords	Abstract
<i>Steam Curing, Self-Compacting Concrete, Fly Ash, Compressive Strength.</i>	In this study, the effect of steam curing on the short and long-term compressive strength of self-compacting concrete containing fly ash was investigated. For this purpose, steam curing was applied to self-compacting concrete with dosages of 500 kg/m ³ , 550 kg/m ³ and 600 kg/m ³ in which fly ash was substituted at ratios of 0%, 20%, 30%, 40% and 50% of the cement weight and 1 day, 28-day and 180-day compressive strengths were compared with standard cured concrete. The strength gain of steam cured concrete in 1 day increased as the fly ash replacement ratio increased in level of 24-93%. The ratio of 1-day steam-cured concrete strengths to the 28-day compressive strength increased as the fly ash replacement ratio increased, and strength losses due to steam curing varied between 13% and 6%. In later ages, the difference between steam cured and standard cured strengths increased as the fly ash replacement ratio increased.

Alıntı / Cite

Kurbetci, Ş., (2022). Buhar Kürünün Uçucu Küllü Kendiliğinden Yerleşen Betonların Kısa ve Uzun Süreli Basınç Dayanımına Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 28-37.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Ş. Kurbetci, 0000-0002-2000-571X

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	15.06.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	15.09.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	03.11.2021
Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Kendiliğinden yerleşen beton, kendi ağırlığı etkisinde, ayrışma ve terleme oluşmadan kalıba yerleşebilen bir beton türüdür (Cengiz vd., 2020). Prefabrik beton tesislerinde kendiliğinden yerleşen betonun kullanımı, işçilik ve ekipman maliyetlerinin azaltılması, verimliliğin artırılması, karmaşık kalıpların doldurulmasında kolaylık sağlanması, yoğun donatılı bölgelerde boşluksuz yerleşme sağlanması, şantiyedeki gürültünün azaltılması ve üstün yüzey kalitesine sahip olması gibi avantajlarından dolayı artmaktadır (Ramezaniyanpour vd., 2013). Kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) düşük S/Ç oranı, yüksek bağlayıcı miktarı ve boşluksuz yerleşmesi nedeniyle dış etkilere dayanıklı oluşu da tercih nedenlerindedir. KYB'nin malzeme türü ve miktarındaki değişiklik reolojiyi ve dizaynı önemli derecede değiştirdiği için üretim koşullarının çok hassas olması nedeniyle çok kontrollü olarak üretilip uygulanmalıdır. Dolayısıyla bu nedenle de prefabrikasyon için çok uygun bir beton türüdür.

KYB, bileşenlerinin bileşimine ve özelliklerine büyük ölçüde bağımlı olan hassas bir karışım olmanın yanında ayrışmaya karşı yüksek direnç ile yüksek akışkanlık gibi zıt özelliklere de sahip bir betondur. Dezavantajlarından biri de yüksek maliyetidir. KYB'nin maliyetini düşürmenin bir alternatifi, portland çimentosunun bir kısmının yerini alan mineral katkıların kullanılmasıdır. Kireçtaşı tozu, mermer tozu, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve metakaolin kullanımının KYB üzerindeki etkisi çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Felekoglu, 2007; Bosiljkov vd., 2010; Uysal ve Yılmaz, 2011; Uysal ve Mansur, 2011; Vejmelkova vd., 2011). Bu ince malzemeler ince tanelerin granülo metrisini iyileştirir, böylece taze halde daha iyi bir kohezyon sağlarlar. Sertleşmiş durumda da betonun mikro yapısını önemli ölçüde iyileştirir ve betondaki birbirine bağlı kılcal gözenekleri azaltırlar (Derabla ve Benmalek, 2014).

Prefabrik beton tesislerinde, kullanılan teçhizatın mümkün olduğunca çabuk serbest kalması, depolama alanlarının uzun süre işgal edilmemesi gibi gereklilikler vardır. Taze betonun hazırlanması ve beton ürünlerin kalıptan çıkarılması arasındaki sürenin azaltılması, kullanılan ekipmanın mümkün olduğunca çabuk serbest kalması için önemli bir faktördür ve toplam üretim maliyetini düşürür. Bu da betonun dayanım gelişiminin hızlandırılması ile gerçekleşebilir (Higginson, 1961). Geleneksel bileşenler ve uygun katkıları içeren KYB karışımına optimize edilmiş bir ısıtma işlemi uygulanması, birkaç saatlik bir işlemden sonra önemli bir basınç dayanımına ulaşan ve sertleşmiş betonun dayanım kaybının en aza indirilmesine izin veren bir beton üretmeyi mümkün kılar (Ardahanlı vd., 2021; Tuyan, 2019). Prefabrikasyonda kullanılan erken dayanım kazandırma yöntemi buhar kürüdür. Atmosferik buhar kürü, beton ürünlerin mukavemet gelişimini hızlandırmak için uzun yıllardır kullanılan bir ısıtma işlemidir. Sıcaklığın artması ile çimentonun hidrasyon hızı artar, bu nedenle betonun buharla kürlenmesi ile mukavemet kazanımı hızlandırılır (Türkel ve Alabaş, 2005). Uzun süre ısıtma işlemi görmüş betonun erken yaşlardaki basınç dayanımı kazancı, karışımın bileşiminden ve işlem sürecinin parametrelerinden etkilenir (Hwang vd., 2012). Fakat yüksek sıcaklığın priz hızlandırıcı etkisinden yararlanan betonlarda, beton türü ve bileşenlerine bağlı olarak ileri yaşta betonun bazı zararlar gördüğü, bu zararların da betonu dış etkilere dayanıksız hale getirebileceği bilinmektedir.

Buhar kürünün, üretiminde çeşitli mineral katkıları kullanılan KYB'ye uygulanabilirliği ve buhar kürünün mineral katkılarıyla uyumu üzerinde çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Derabla ve Benmalek mineral katılı KYB' ler üzerinde buhar kürünün kısa ve uzun vadedeki etkisini araştırdılar (Derabla ve Benmalek, 2014). 60 °C de 24 saat ısıtma işlemi uygulamasının uzun vadede en az kayıp oluşturan çevrim parametreleri olduğunu belirttiler. Calvo ve arkadaşları prekast ürünlerde KYB'ye ısıtma işlemi uygulamasının dayanıklılık performansını incelediler (Calvo vd., 2016). ısıtma işlemi uygulamasının, %20 oranında filler ile ikame ederek ürettikleri KYB nin durabilitesine çok önemli bir olumsuz etki yapmadığını belirttiler. ısıtma işlemi uygulanmış betonlarda nihai dayanımın beklendiği gibi azaldığını, kılcallık katsayısının arttığını, toplam porozitenin arttığını, gözenek boyutu dağılımının değiştiğini ve C-S-H jellerinde değişiklikler oluştuğunu söylediler. Reinhardt ve Stegmaier, ısıtma işleminin KYB'lerin basınç dayanımı ve gözenek boyutu dağılımı üzerindeki etkisini araştırdılar (Reinhardt ve Stegmaier, 2006). KYB'lere ısıtma işlemi uygulamasının gözeneklerin toplam hacmini artırmadan daha kaba gözenek boyutu dağılımına yol açtığını ve daha büyük gözeneklerin miktarının, işlem sıcaklığı ile arttığı sonucuna vardılar. Ramezani pour ve arkadaşları farklı tipte mineral katılı KYB'ler üreterek buhar kürü uyguladılar ve mekanik özelliklere ve durabiliteye etkisini araştırdılar (Ramezani pour vd., 2013). Mineral katkıların durabiliteyi iyileştirdiğini ve yüksek sıcaklıkta buhar kürünün basınç dayanımını arttırdığını fakat durabiliteye olumsuz etki yaptığını belirttiler. Başka bir çalışmada ise 36 farklı buhar kürü çevrimi uyguladıkları KYB'lerin durabilite özelliklerini araştırdılar (Ramezani pour vd., 2014). 70 °C işlem sıcaklığının durabilite üzerinde olumsuz etki yaptığını, çünkü C-S-H jelinin ve CH'in hızlı oluşumları nedeniyle heterojen ve daha büyük boşluklu olduğunu söyleyerek en uygun kür çevrimini 3 saat ön bekleme, 60 °C işlem sıcaklığı ve 10 saat toplam kür süresi olarak önerdiler. Bingöl ve Tohumcu, uçucu kül ikame ederek ürettikleri KYB'lere çeşitli buhar kürü çevrimleri uyguladılar ve uçucu kül ikame miktarındaki artışın, basınç dayanımının azalmasına neden olduğunu, standart kür görmüş betonlara göre en yüksek basınç dayanımı oranının 16 saatlik kür süresi boyunca 70 °C'de %55 uçucu kül ikamesi ile standart kürlenmiş numunelerin %95'i olduğunu belirttiler (Bingöl ve Tohumcu, 2013). Zhimin ve arkadaşları mineral katkıların buhar kürlü betonun kısa ve uzun süreli performansına etkisini araştırdılar. Genel olarak mineral katkıların performansı iyileştirdiğini, uçucu külün olumlu etkisinin uzun sürede ortaya çıktığını, granüle yüksek fırın cürufu ile uçucu kül birlikte kullanıldığında yüksek sıcaklığın bu mineral katkıların reaktivitesini iyileştirdiğini ve dolayısıyla betonun transport özelliklerini iyileştirdiğini söylediler (Zhimin vd., 2012). Maltais ve Marchand uçucu külün erken yaşta çimento hidrasyon oranını önemli ölçüde artırma eğiliminde olduğunu belirterek, kürlenme sıcaklığındaki bir yükselmenin referans harcın uzun vadeli basınç dayanımını azalttığını, bunun tersine uçucu kül karışımlarının uzun vadeli basınç dayanımı üzerinde hiçbir zararlı etkisi olmadığını gözlemlediler (Maltais ve Marchand, 1997). Liu ve arkadaşları, buharla kürlenmiş ultra ince uçucu kül içeren betonun 13 saatlik buhar küründen sonra çok düşük erken dayanıma sahip olduğu ve bu beton ile standart kür gören betonun 28 günlük basınç dayanımı arasında büyük fark olduğunu belirtmişlerdir (Liu vd., 2005). Uçucu külün reaktivitesini etkinleştirmek için kimyasal aktivatörler kullanılması ile erken dayanımın arttığını gözlemişlerdir. Yazıcı vd. buhar kürünün, yüksek hacimli uçucu kül beton karışımlarının 1 günlük mukavemet

değerlerini (%40, %50 ve %60 uçucu kül ikamesinde) yaklaşık 10 MPa'dan 20 MPa'a çıkardığını, bunun da prefabrik beton endüstrisi için yeterli olduğunu söylemişlerdir (Yazıcı vd., 2005). Bununla birlikte, buhar kürü uygulanmış uçucu küllü betonun nihai basınç dayanımının, standart kürlenmiş betonunkinden çok daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışmanın amacı buhar kürünün farklı dozajlarda uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betonların kısa ve uzun süreli basınç dayanımı üzerine etkisinin araştırılmasıdır. Bu amaçla çimento ağırlığının %0, %20, %30, %40 ve %50' si oranında uçucu kül ikame edilen 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlı kendiliğinden yerleşen betonların buhar kürü sonrası 1 gün, 28 gün ve 180 günlük basınç dayanımları standart kür gören betonlarla karşılaştırılmıştır.

2. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

2.1. Malzemeler (Materials)

Çalışmada Aşkale Çimento Fabrikası üretimi CEM I 42.5R çimentosu kullanılmıştır. Uçucu kül ise Sugözü termik santralinden elde edilen F sınıfı uçucu küldür. Çimento ve Uçucu küle ait bazı fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Çimento ve Uçucu Küle Ait Bazı Özellikler (Some Properties of Portland Cement And Fly Ash)

Kimyasal özellikler, %	Çimento	UK	Fiziksel özellikler	Çimento	UK
CaO	64,33	3,36	45µm elek üstü (%)	7,84	16,1
SiO ₂	18,62	58,75	Özgül ağırlık (gr/cm ³)	3,13	2,32
Al ₂ O ₃	4,51	29,17	Özgül yüzey (cm ² /gr)	3616	3050
Fe ₂ O ₃	2,95		Priz başı (dk)	143	
MgO	2,09	1,45	Priz sonu (dk)	182	
SO ₃	2,77	0,15	Hacim genişmesi (mm)	1	
Na ₂ O	0,25		Normal kıvam (%)	28,8	
K ₂ O	0,62		Mekanik Özellikler		
Cl	0,0191	0,002	Basınç dayanımı (MPa) 2 gün	25,1	
Serbest CaO	0,62				
Çözünmeyen kalıntı	0,7	87,56	Basınç dayanımı (MPa) 28 gün	52,8	
Kızdırma kaybı	3,46	1,37			

Üretimlerde kullanılan agregalar kırma agrega ve doğal kumdur. Kullanılan doğal kumun ve kırma agreganın max. tane çapları sırasıyla 8 mm ve 16 mm'dir. Agregalar ile ilgili bazı fiziksel özellikler Tablo 2.'de verilmiştir. Kullanılan agregaların ve karışım agregasının granülometreleri Tablo 3.'de verilmiştir. Karışım agregası %60 doğal kum, %40 kırma agrega kullanılarak oluşturulmuştur.

KYB üretiminde polikarboksilik eter içeren hiperakışkanlaştırıcı bir katkı kullanılmıştır.

Tablo 2. Agregaların Bazı Fiziksel Özellikleri (Some Physical Properties of Aggregates)

	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme (%)
Doğal Kum	2.58	3
Kırmataş	2.62	2

Tablo 3. Kullanılan Agregalara Ait Granülometri Değerleri (The Gradations of The Used Aggregates)

Elek açıklığı, mm	Geçen, %					
	16	8	4	2	1	0,25
Doğal Kum	100.0	100.0	92.0	76.0	60.0	6.0
Kırmataş	100.0	70.0	32.0	0.0	0.0	0.0
Karışım agregası	100.0	88.0	68.0	45.6	36.0	3.6

Deneysel çalışma üç farklı toplam bağlayıcı miktarında (500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³) kendiliğinden yerleşen betonlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm betonlarda Su/Bağlayıcı oranı 0.35 değerinde sabit tutulmuştur. Su indirgeyici katkı, (çimento + uçucu kül) miktarının %1.5'i oranında kullanılmıştır. Her toplam bağlayıcı miktarı için, uçucu külsüz ve çimento ağırlığının %20, %30, %40 ve %50' si oranında uçucu kül ile ikame edilerek toplam 15 üretim gerçekleştirilmiştir. Her üretimde 18 adet 15 cm küp numune üretilmiştir. Numunelerin 9 tanesine buhar kürü, 9 tanesine su kürü uygulanmış; 1, 28 ve 180 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Üretilen betonların bileşimleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Beton Bileşimleri (Concrete Mix Proportions)

KOD	Ç (kg/m ³)	UK (kg/m ³)	S (kg/m ³)	Doğal Kum (kg/m ³)	Kırmataş (kg/m ³)		
					8-16 mm	4-8 mm	2-4 mm
500UK00	500	0	175.0	988.0	196.0	248.0	210.0
500UK20	400	100		968.0	192.0	243.1	204.7
500UK30	350	150		957.5	189.9	240.5	202.5
500UK40	300	200		947.2	187.3	238.2	200.0
500UK50	250	250		936.7	185.7	235.3	198.1
550UK00	550	0	192.5	937.1	185.8	235.4	198.2
550UK20	440	110		914.2	181.0	229.3	193.1
550UK30	385	165		902.7	179.0	226.7	191.0
550UK40	330	220		891.2	176.7	223.9	188.5
550UK50	275	275		879.8	174.5	221.0	186.1
600UK00	600	0	210.0	885.4	175.6	222.4	187.3
600UK20	480	120		860.4	170.6	216.1	182.0
600UK30	420	180		847.9	168.1	213.0	179.3
600UK40	360	240		835.4	165.7	209.8	176.7
600UK50	300	300		823.2	163.2	176.7	174.0

Ç: Çimento, UK: Uçucu kül, S: Su

2.2.1. Taze Beton Deneyleri (Fresh Concrete Tests)

Taze betonlar üzerinde çökme yayılma deneyi yapılarak yayılma çapı ve T50 süresi ölçülmüştür. Geçiş özelliği ise V hunisi deneyi ile belirlenmiştir. Deneylerin yapılına ait görseller Şekil 1.'de verilmiştir.



Şekil 1. Çökme Yayılma ve V Hunisi Deneylerinin Yapılışı (Slump Flow And V-Funnel Tests)

2.2.2. Buhar Kürü Çevrimi (Steam Curing Cycle)

Tipik bir buhar kürü çevrimi, numunelerin üretiminden sonra 2-4 saatlik ön bekleme periyodu, 11-44 °C /s' lik bir ısıtma ve soğutma hızı ve 6-18 saatlik sabit sıcaklıkta bir işlem periyodundan oluşur. Buhar küründe maksimum işlem sıcaklığı genellikle 60-90 °C ile sınırlıdır. Gecikmiş etrenjit oluşumu riski nedeniyle bu sıcaklığının 65 °C'yi aşmaması önerilmektedir (Hwang vd., 2012). Bu çalışmada uygulanan kür çevrimi Şekil 2'de görüldüğü gibi 4 saat ön bekleme, 4 saat ısıtma, 65 °C' de 11 saat işlem, 4 saat soğuma ve 1 saat son bekleme şeklinde toplam 24 saat süren yumuşak bir çevrimdir. Üretilen betonlar kalıplara yerleştirildikten sonra buhar kürü uygulanacak numuneler laboratuvarında 20 °C sıcaklıkta üzerleri naylon örtü ile örtülerek 4 saat ön beklemenin ardından kür tankına yerleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan buhar kürü tankı Şekil 3' te görülmektedir.



Şekil 2. Buhar Kürü Çevrimi (Steam Curing Cycle)



Şekil 3. Deneylerde Kullanılan Buhar Kürü Tankı (Steam Curing Chamber Used in Experiments)

3. Deneysel Bulgular ve Yorum (Experimental Results and Discussion)

3.1. Taze Beton Özellikleri (Fresh Concrete Properties)

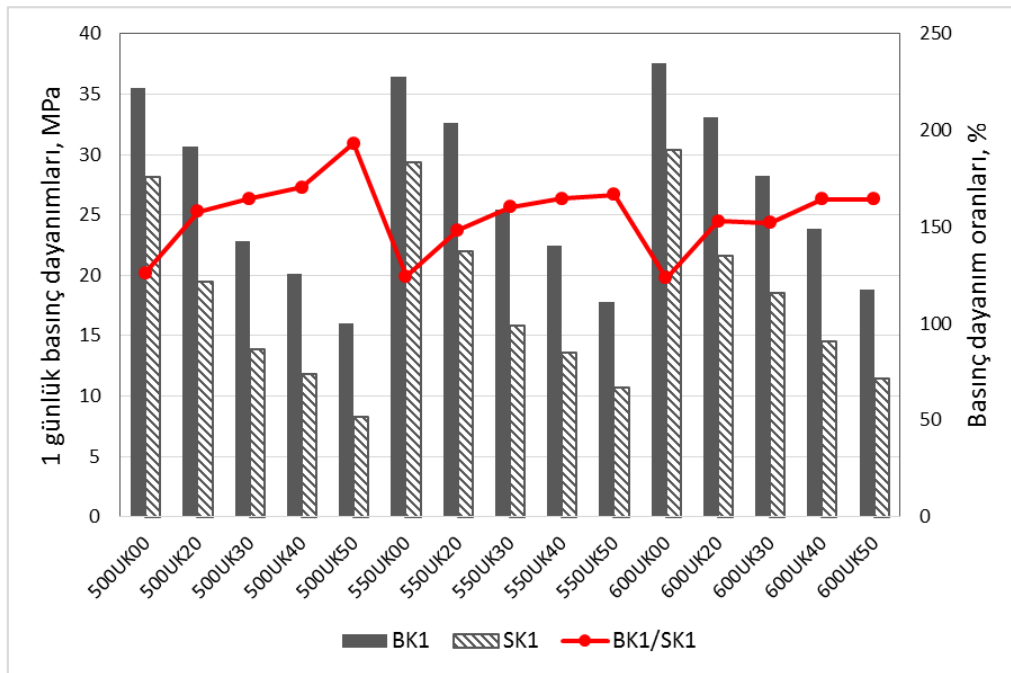
Üretilen betonların Abrams konisi ile belirlenen yayılma çapları, T50 süreleri ve V- hunisi akış süreleri Tablo 5'de görülmektedir. EFNARC kendiliğinden yerleşen betonlar için SF1 (550-650 mm), SF2 (660-750 mm) ve SF3 (760-850 mm) şeklinde üç çökme-yayılma sınıfı tanımlamıştır (Efnarc, 2002). Çalışmada üretilen betonların çökme-yayılma değerleri ise 63-78 cm arasında olmuştur ve EFNARC kriterlerine göre üç beton dışında tümü SF2 sınıfındadır. Toz malzeme miktarı arttıkça yayılma çapının arttığı görülmektedir. EFNARC kriterlerine uygun olarak tüm betonların T50 süreleri 2-5 sn arasında, V hunisi akış süreleri ise 6-12 sn arasında olmuştur.

Tablo 5. Taze Beton Özellikleri (Properties of Fresh Concretes)

KOD	Yayılcma çapı cm	T50 süresi sn	V hunisi sn
500UK00	63	5	11
500UK20	65	5	12
500UK30	67	3	7
500UK40	68	2	7
500UK50	78	3	8
550UK00	65	4	9
550UK20	67	3	8
550UK30	68	3	7
550UK40	68	3	7
550UK50	70	3	6
600UK00	68	2	6
600UK20	67	3	6
600UK30	69	2	6
600UK40	74	2	9
600UK50	78	2	8

3.2. Buhar Kürünün 1 Günlük Basınç Dayanımları Üzerindeki Etkisi (The Effect of Steam Curing on 1-Day Compressive Strengths)

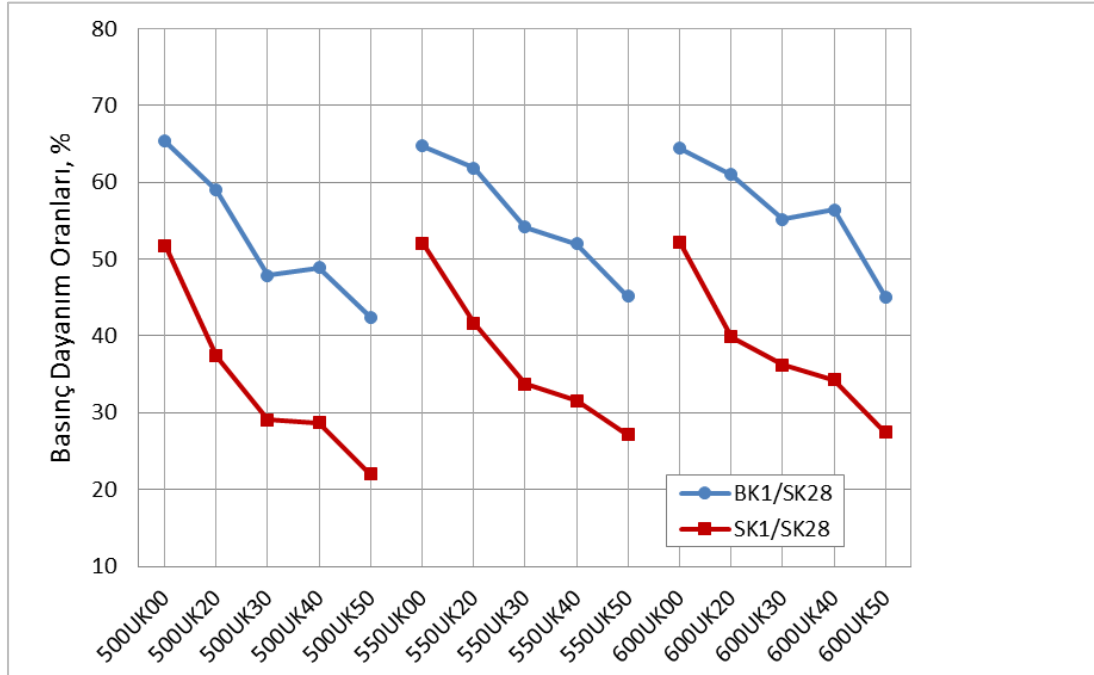
Şekil 4'de buhar kürü ve standart kür uygulanan numunelerin 1 günlük basınç dayanımları ve basınç dayanım oranları verilmiştir. Standart kürlü kontrol betonlarında (uçucu kül kullanılmayan) 1 günlük basınç dayanımları 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlar için sırasıyla 28.1 MPa, 29.3 MPa ve 30.4 MPa olurken, uçucu kül ikamesinin artmasıyla değerler azalmış, %50 uçucu kül ikameli betonlarda dayanımlar sırasıyla 8.3 MPa, 10.7 MPa ve 11.5 MPa değerine inmiştir. Buhar kürü uygulanan betonlarda ise kontrol betonlarının 1 günlük basınç dayanımları 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlar için sırasıyla 35.5 MPa, 36.5 MPa ve 37.6 MPa değerlerine ulaşırken %50 uçucu kül ikame edilen betonlarda dayanımlar aynı sıra ile 16.0 MPa, 17.8 MPa ve 18.8 MPa değerine düşmüştür. Yazıcı ve arkadaşları, prekast ürünlerin kalıp sökümü için 1 günlük basınç dayanımının 20 MPa olmasının yeterli olduğunu belirtmişlerdir (Yazıcı vd., 2005). Bu açıdan değerlendirildiğinde standart kür uygulanan numunelerden kontrol betonları dışında sadece 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozlu betonlarda %20 uçucu kül içerenlerin 20 MPa'yı aştığı görülmektedir. Buhar kürü uygulanan betonlarda ise %50 uçucu kül ikameli olanlar dışında tüm dayanımlar 20 MPa'nın üzerindedir. Buhar kürü uygulamasının standart küre kıyasla tüm betonlarda 1 günlük basınç dayanımını arttırmasının nedeni, nem ve yüksek sıcaklık etkisinde hidrasyon reaksiyonlarının hızlanması ve sertleşmiş betonun en önemli bağlayıcı fazı olan C-S-H jelinin hızlı oluşumudur (Richardson, 2004).



Şekil 4. 1 Günlük Basınç Dayanımları ve Basınç Dayanım Oranları (1-Day Compressive Strengths And Strength Ratios)

Şekil 4'de aynı zamanda buhar kürlü ve standart kürlü numunelerin 1 günlük basınç dayanım oranları görülmektedir. Görüldüğü gibi her üç bağlayıcı dozajında da uçucu kül kullanılmayan kontrol betonunda dayanım oranları hemen hemen eşit ve yaklaşık %25 düzeyinde olmuş, ikame oranı arttıkça dayanım kazancı da artmıştır. Dayanım oranları %50 uçucu kül ikameli betonlarda 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlar için sırasıyla %193, %167 ve %164 düzeyindedir. Bu durum buhar kürünün uçucu külün normalde yavaş gelişen dayanım gelişimini hızlandırdığının göstergesidir. Bu bulgu puzolanik katkıların ısı işlemlere yatkın olduğu görüşünü doğrular niteliktedir. Yazıcı ve Arel, %10, %20 ve %30 uçucu kül ikameli 450 kg/m³ dozajlı harçlar üzerinde yaptıkları çalışmada 65 °C de toplam 24 saat buhar kürü çevrimi sonunda uçucu kül ikamesi arttıkça %70'den %80'e artan dayanım kazançları gözlemlenildi ve uçucu küllü betonların buhar kürü altında kontrol harcına göre daha fazla dayanım kazanımının yüksek miktarda silis içermesi nedeniyle olduğunu belirttiler (Yazıcı ve Arel, 2016).

Buhar kürü uygulamasıyla betonun kazandığı erken dayanımın 28 günlük standart dayanıma ne kadar yaklaştığı da dayanım oranları ile belirlenmiştir. Şekil 5'te buhar kürlü ve standart kürlü betonların 1 günlük dayanımlarının 28 günlük standart dayanımlara oranları görülmektedir. Her üç dozajda da standart kür gören kontrol betonları 1 günde 28 günlük basınç dayanımının %52'sini kazanmıştır. Bu oran buhar kürü gören betonlarda her üç dozaj için % 65'e çıkmıştır. Uçucu kül ikame oranının artması ile dayanım oranları gittikçe azalmıştır. %50 uçucu kül ikamesi için buhar kürü gören betonlarda dayanım oranları 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlar için sırasıyla %42, %45 ve %45 olmuş, standart kür gören betonların oranları aynı sıra ile %22, %27 ve %27'ye inmiştir. Uçucu kül kullanılmayan betonlarda buhar kürü ve standart kürün dayanım oranları arasındaki fark %13 iken %50 uçucu kül ikameli betonlarda fark ortalama %19'a çıkmıştır. Uçucu kül ikame oranının artmasının buhar kürünün sağladığı dayanım kazancını arttırdığı burada da görülmektedir.



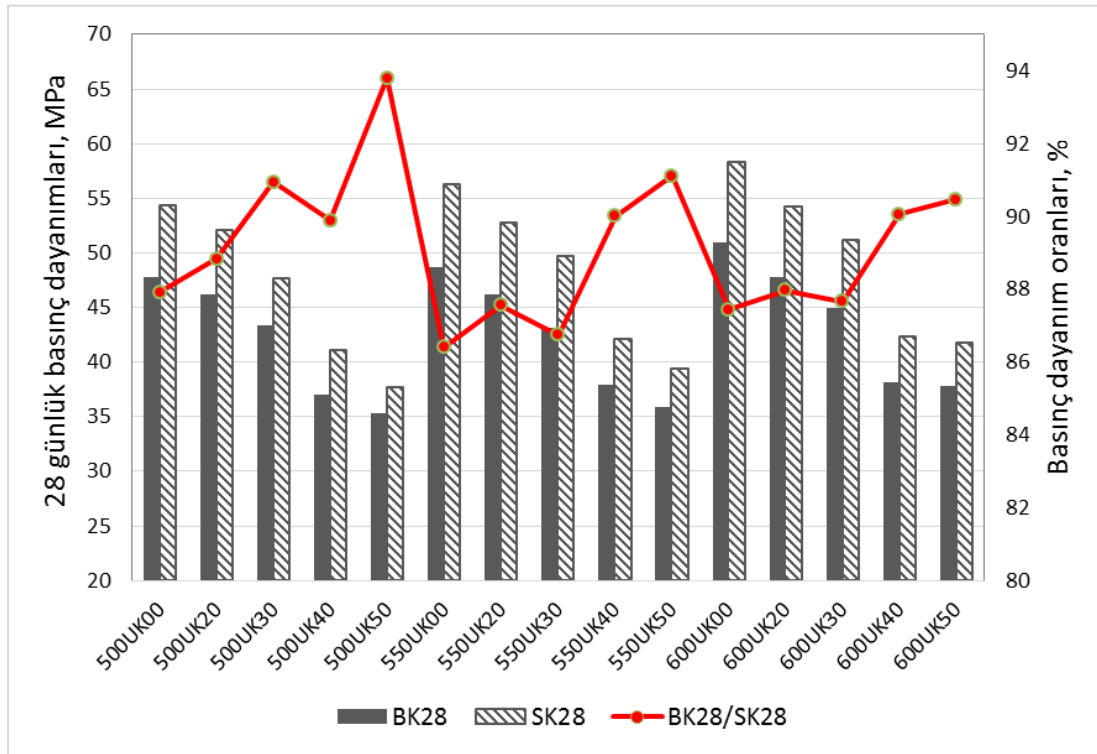
Şekil 5. 1 Günlük Basınç Dayanımlarının 28 Günlük Standart Basınç Dayanımına Oranları (Ratios of 1-Day Compressive Strength to 28-Day Standard Compressive Strength)

3.3. Buhar Kürünün 28 Günlük Basınç Dayanımları Üzerindeki Etkisi (The Effect of Steam Curing on 28-Day Compressive Strengths)

Şekil 6'da buhar kürlü ve standart kürlü numunelerin 28 günlük basınç dayanımları ve basınç dayanım oranları görülmektedir. Standart kür uygulanan kontrol betonlarının 28 günlük basınç dayanımları 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlar için sırasıyla 54.4 MPa, 56.3 MPa ve 58.3 MPa değerlerine ulaşırken, uçucu kül ikamesinin artması dayanımların azalmasına yol açmış, %50 uçucu kül ikameli betonlarda sırasıyla 37.7 MPa, 39.4 MPa ve 41.8 MPa değerine inmiştir. Taşdemir, betondaki en zayıf halka olan çimento-agrega arayüzey bölgesinin iyileşmesi için mineral katkıların inceliğinin çok önemli olduğunu belirterek uçucu külün boyutunun yeterince ince olmadığını vurgulayarak hem puzolanik aktivitesinin hem de dolgu etkisinin yeterince iyi olmaması nedeniyle basınç dayanımında azalmaya yol açtığını belirtmiştir (Taşdemir, 2003). Buhar kürü uygulanan betonlarda, kontrol betonlarının 28 günlük basınç dayanımları 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlar için sırasıyla 47.8 MPa, 48.7 MPa ve 51.0 MPa değerlerine ulaşırken %50 uçucu kül ikame edilen betonlarda basınç dayanımları aynı

sıra ile 35.4 MPa, 35.9 MPa ve 37.8 MPa değerine düşmüştür. Her üç dozaj için de buhar kürü uygulanan betonların 28 günlük basınç dayanımlarında standart kür görenlere kıyasla azalma olmuştur. Öztekin, ısı işlem uygulamasının ileri yaş basınç dayanımında oluşturduğu bu azalmanın nedenini, yüksek sıcaklıkta hidrasyon sonucu kristalleşme oranının artması ve kristal boyutlarının büyümesiyle kristaller arasındaki köprülerin azalması, daha heterojen ve boşluklu bir yapı oluşması ve ileri yaşlardaki hidrasyon derecesinin 20 °C'ye oranla daha düşük olması şeklinde açıklamıştır (Öztekin, 1983).

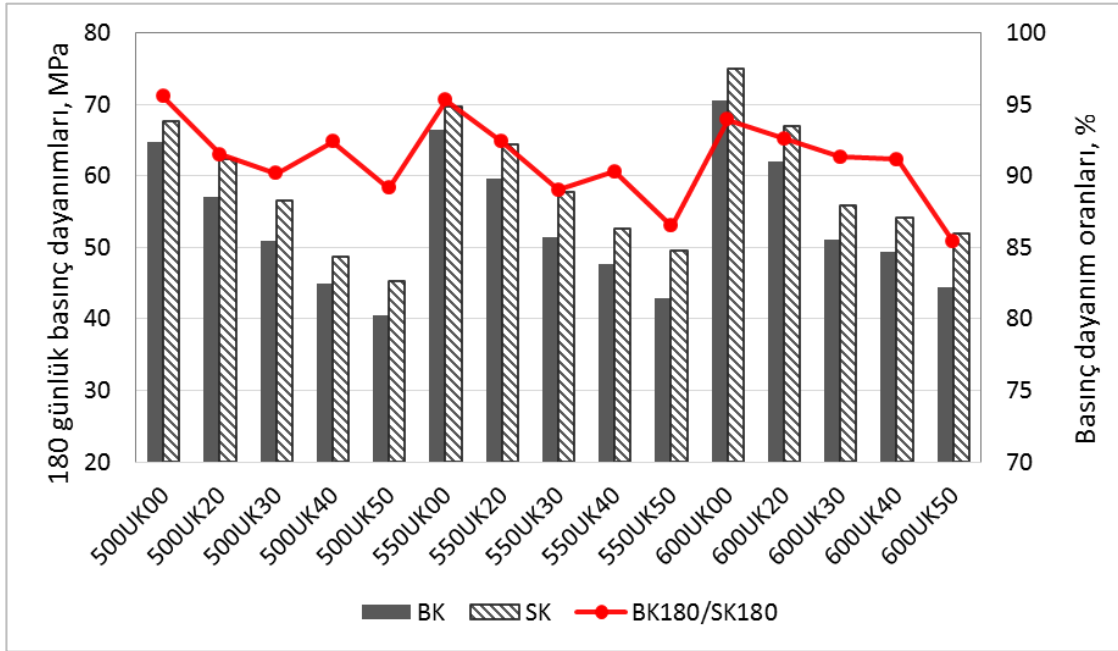
Şekil 6'da aynı zamanda buhar kürlü ve standart kürlü numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının birbirine oranı görülmektedir. Her üç dozajda da uçucu kül ikame oranı arttıkça basınç dayanım oranları da artmıştır. Bu oranlar uçucu kül kullanılmayan kontrol betonlarında 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ için sırasıyla %88, %86 ve %87 olmuştur. %50 uçucu kül ikameli betonlarda ise oranlar aynı sırayla %94, %91 ve %90 olmuştur. Yani uçucu kül ikame oranının artması 28 günde buhar kürlü betonların dayanım kaybının daha az olmasına yol açmıştır. Shi ve arkadaşları, mineral katkıların ısı hasarının etkisini azalttığını, bu nedenle buharla kürlenmiş betonun uzun vadeli performansı için faydalı olabileceğini söylemiştir (Shi vd., 2020). Uçucu küllü harçların yüksek sıcaklıkta kürlenmesinin uzun vadeli basınç dayanımı üzerindeki faydalı etkisi, çoğu kimyasal reaksiyon gibi puzolanik reaksiyonun da sıcaklıktan önemli ölçüde etkilenmesi gerçeğiyle açıklanabilir (Fraay vd, 1989). Fraay ve arkadaşları, sıcaklığın çimentonun hidrasyon reaksiyonlarını hızlandırarak sistemdeki OH⁻ iyon konsantrasyonunu arttırdığını, gözenek çözeltisinin pH seviyesinin 13.2'nin üzerine çıkmasının uçucu kül partiküllerinin daha iyi çözünmesine neden olduğu söyleyerek uçucu külün hidrasyonunun kür sıcaklığının yükselmesiyle nasıl hızlandığını açıklamışlardır. Berry ve Malhotra ise, puzolanik reaksiyonun ısı ile bir kez başlatıldığında, sıcaklık düşürülse bile devam edeceğini ve uçucu kül parçacıklarının yüzeyi bir kez çözüldüğünde, hidrasyonun çok daha kolay olduğunu söylemişlerdir (Berry ve Malhotra, 1980).



Şekil 6. 28 Günlük Basınç Dayanımları ve Basınç Dayanım Oranları (28-Day Compressive Strengths And Strength Ratios)

3.4. Buhar Kürünün 180 Günlük Basınç Dayanımları Üzerindeki Etkisi (The Effect of Steam Curing on 180-Day Compressive Strengths)

Şekil 7'de buhar kürlü ve standart kürlü numunelerin 180 günlük basınç dayanımları görülmektedir. Standart kür uygulanan kontrol betonlarda 180 günlük basınç dayanımları 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlarda sırasıyla 67.8 MPa, 69.8 MPa ve 75.0 MPa değerlerine ulaşmış, uçucu külün %50 ikame edildiği betonların dayanımları sırasıyla 45.4 MPa, 49.7 MPa ve 52.0 MPa değerlerine düşmüştür. Buhar kürlü betonlarda ise kontrol betonları sırasıyla 64.8 MPa, 69.8 MPa ve 70.5 MPa dayanım değerleri verirken uçucu külün %50 ikame edildiği betonların dayanımları 40.4 MPa, 43.0 MPa ve 44.4 MPa değerlerine düşmüştür.



Şekil 7. 180 Günlük Basınç Dayanımları ve Basınç Dayanım Oranları (180-Day Compressive Strengths And Strength ratios)

Şekil 7'de aynı zamanda basınç dayanım oranları verilmiştir. 180 günlük buhar kürlü ve standart kürlü basınç dayanım oranları kontrol betonlarında 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlarda sırasıyla %95.6, %95.3 ve %93.4 olmuştur. Bu oranlar 28 günlük dayanım oranları ile kıyaslanırsa buhar kürünün olumsuz etkisinin 180 günde azaldığı görülmektedir. Diğer yandan, uçucu kül ikameli betonlarda her üç dozajda da ikame oranı arttıkça dayanım oranları azalma eğilimindedir. Basınç dayanım oranları %50 ikame oranı için 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlarda sırasıyla %89.2, %86.5 ve %85.4 olmuştur. Yazıcı ve arkadaşları da yaptıkları çalışmada %50 uçucu kül içeren buhar kürlü beton 90 günde 40 MPa dayanım verirken standart kür uygulanan betonun 60 MPa olduğunu belirtmiş, buhar kürü uygulamasının, yüksek hacimli uçucu kül betonunun ileri yaştaki basınç dayanımını standart kür kadar iyileştirmedeğini söylemişlerdir (Yazıcı vd., 2005).

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada buhar kürünün farklı dozajlarda uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betonların kısa ve uzun süreli basınç dayanımı üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla çimento ağırlığının %0, %20, %30, %40 ve %50' si oranında uçucu kül ikame edilen 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlı kendiliğinden yerleşen betonların buhar kürü sonrası 1 gün, 28 gün ve 180 günlük basınç dayanımları standart kür gören betonlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Uçucun kül ikame oranı arttıkça her üç dozajda da standart ve buhar kürlü betonların basınç dayanımları her yaşta azalmıştır.
2. Buhar kürü standart kürlemeye kıyasla 1 günde tüm numunelerin basınç dayanımını iyileştirmiştir. %50 uçucu kül ikameli olanlar dışında buhar kürü uygulanan tüm KYB'lerin 1 günlük basınç dayanımı prekast elemanların kalıp sökümü için uygun dayanım olarak kabul edilen 20 MPa'nın üzerinde olmuştur.
3. Buhar kürünün standart kürle kıyaslandığında 1 günde sağladığı dayanım artışı uçucu kül ikame oranı arttıkça atarak %48-%93 arasında gözlemlenmiştir.
4. Her üç dozajda da buhar kürlü KYB'lerin 1 günlük basınç dayanımlarının 28 günlük standart basınç dayanımına oranları birbirine yaklaşık düzeyde olmuştur. Bu oran uçucu kül kullanılmayan betonlarda %65, %50 uçucu kül ikameli betonlarda ortalama %44 olarak belirlenmiştir.
5. Uçucu kül ikame oranı arttıkça buhar kürlü KYB'lerin 28 günlük basınç dayanımının standart basınç dayanımına oranı artmıştır. Yani uçucu kül ikamesinin artması buhar kürünün 28 günde oluşturduğu dayanım kaybını azaltmıştır. Dayanım kayıpları %13 ile %6 arasında değişmiştir.
6. Her üç dozajda da uçucu kül ikame oranı arttıkça 180 günlük buhar kürlü ve su kürlü dayanımların birbirine oranı azalmıştır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Ardahanlı, M , Oltulu, M , Alameri, I . (2021). Uçucu Küllü Kendiliğinden Yerleşen Betonun Özellikleri Üzerine Ön Isıtmanın Etkisi . Black Sea Journal of Engineering and Science, 4(3), 81-88.
- Berry, E. E., and Malhotra, V. M. (1980). Fly ash for use in concrete-a critical review. *ACI Journal, Proceedings*, 77(2), 59-73.
- Bingöl, A.F. and Tohumcu, İ. (2013). Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume. *Materials & Design*, 51, 12-18.
- Bosiljkov, V.B., Duh, D. and Zarnic, R. (2010). Time evolution of properties of SCC mixtures produced using crushed limestone aggregate and high content of limestone filler, design, production and placement of self-consolidating concrete. *Rilem Bookseries*,1, 317-27.
- Calvo, J.L.G., Alonzo, M.C., Luco, L.F. and Velasco, M.R. (2016). Durability performance of sustainable self compacting concretes in precast products due to heat curing. *Construction and Building Materials*, 111, 379-385.
- Cengiz, S. , Kamanlı, M. & Ünal, A. (2020). Investigation of flexural behavior of reinforced concrete beams produced with self compacting and normal concrete . *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* , 8 (2) , 429-438 .
- Derabla, R. and Benmalek, M.L. (2014). Characterization of heat-treated self-compacting concrete containing mineral admixtures at early age and in the long term. *Construction and Building Materials*, 66, 787-794.
- Efnarc. (2002). *Specification and Guidelines for Self Compacting Concrete*, Association House, 99 West Street, Farnham, Surrey GU9 7EN, UK, ISBN 0953973344, 32 p.
- Felekoglu B. (2007). Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case). *Resour Conserv Recycl*, 51, 770-91.
- Fraay, A.L.A., Bijen, J.M. and Haan, Y.M. (1989). The reaction of fly ash in concrete a critical examination. *Cement and Concrete Research*, 19(2), 235-246.
- Higginson, E. C. (1961). Effect of Steam Curing on the Important Properties of Concrete. *JACI*, Vol. 58, No. 3, 1961, pp. 281- 298.
- Hwang, S.D., Khatib, R., Lee, H.K. and Khayat, K. (2012). Optimization of steam-curing regime for high-strength, self-consolidating concrete for precast, prestressed concrete applications. *PCI J*, 57, 48-61.
- Liu, B., Xie, Y. and Li, J. (2005). Influence of steam curing on the compressive strength of concrete containing supplementary cementing materials. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 994-998.
- Maltas, Y. and Marchand, J. (1997). Influence of curing temperature on cement hydration and mechanical strength development of fly ash mortars, *Cement and Concrete Research*, 27(7),1009-1020.
- Öztekın, E., (1983). Beton sertleşmesinin hızlandırılmasında kullanılan ısı işlemler- eğilme dayanımına etkileri, Karadeniz Üniversitesi, Trabzon.
- Ramezaniapour, A.A., Khazali, M.H. and Vosoughi, P. (2013). Effect of steam curing cycles on strength and durability of SCC: A case study in precast concrete, *Construction and Building Materials*, 49, 807-813.
- Ramezaniapour, A.M., Esmaili, Kh, Ghahari, S.A. and Ramezaniapour, A.A. (2014). Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.*, (73), 187-194 (2014).
- Reinhardt, H.W. and Stegmaier, M. (2006). Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of self-compacting concrete (SCC), *Cement and Concrete Research*, 36(5), 879-885,
- Richardson, I.G. (2004). Tobermorite/jennite and tobermorite/calcium hydroxide-based models for the structure of C-S-H: applicability to hardened pastes of tricalcium silicate, b-dicalcium silicate, Portland cement, and blends of Portland cement with blast-furnace slag, metakaolin, or silica fume. *Cem Concr Res*, 34(9), 1733-77.
- Shi, J., Liu, B., Wu, X., Qin, J., Jiang, J. And He, Z. (2020). Evolution of mechanical properties and permeability of concrete during steam curing process. *Journal of Building Engineering*, 32, 101796.
- Taşdemir, C. (2003). Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete. *Cem Concr Res*, 33(10), 1637-1642.
- Tuyan, M . (2019). Atık Tuğla Tozunun Mineral Katkı Olarak Kullanımının Kendiliğinden Yerleşen Betonun Taze Hal, Mekanik ve Durabilite Özelliklerine Etkisi . Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi , 23 (2) , 540-548.
- Türkel, S. and Alabaş, V. (2005). The effect of excessive steam curing on portland composite cement concrete, *Cem Concr Res* , 35(2), 405 - 411.
- Uysal, M. and Mansur, S. (2011). Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. *Constr Build Mater*, 25, 4112-20.
- Uysal, M. and Yılmaz, K. (2011). Effect of mineral admixtures on properties of selfcompacting concrete. *Cement Concr Comp*, 33, 771-6.
- Vejmelkova, E., Keppert, M., Grzeszczyk, S., Bartłomiej, S. and Cerny, R. (2011) Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag. *Constr Build Mater*, 25, 1325-31.
- Yazıcı, H., Aydın, S., Yiğite, r H. and Baradan, B. (2005). Effect of steam curing on class C high-volume fly ash concrete mixtures. *Cem Concr Res* , 35(6), 1122-1127.
- Yazıcı, Ş., Arel, H.Ş., (2016). The influence of steam curing on early-age compressive strength of pozzolanic mortars. *Arab J Sci Eng*, 41, 1413-1420.
- Zhimin, H., Junzhe, L. and Kangwu, Z. (2012). Influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of steam-cured concrete. *Energy Procedia*, 16, Part B, 836-841.