

# UÇUCU KÜL KULLANIMININ FARKLI DAYANIM SINIFLARINDAKİ BETONLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

İlker TULGA<sup>1</sup>, Kadir KILINÇ<sup>2</sup>

*Kırklareli Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı Kayalı Kampusu Kırklareli  
Kırklareli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölüm, Kırklareli*

## Özet

Dünya yirminci yüzyılla birlikte hızlı bir endüstriyel gelişim içerisine girmiştir. Bu gelişim medeniyet açısından büyük getiriler sağlamakla birlikte endüstriyel atıkların çevreye olumsuz etkileri göz önüne alındığında büyük sorunlar karşımıza çıkmaktadır. Bu atık malzemelerin yararlı geri dönüşüm mekanizmaları ile değerlendirilmesi maliyet açısından ve aynı zaman da çevresel etkilerin iyileştirilmesi açısından önem kazanmaktadır. Çevresel olarak sorun oluşturan inşaat sektöründe kullanımı mevcut olan uçucu kül gibi endüstriyel bir atık malzemenin geri dönüşüm olarak değerlendirilmesi hem çevresel açıdan hem de betonun özelliklerini iyileştirmesi açısından insanlığa büyük katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada Çanakkale Biga Bekirli Termik Santralinin uçucu külünün betonun mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. 4 farklı dayanımda beton karışımı üretilmiştir. Her bir beton sınıfı için şahit beton, uçucu kül içeren beton ve uçucu kül içermeyen beton üretilmiştir. Uçucu kül kullanım yüzdesi çimento miktarının % 20'si, kimyasal katkı yüzdesi ise toplam bağlayıcı miktarının % 1'i olarak alınmıştır. Numunelerde 3, 7, 28 ve 56 gün sonunda basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Yarmada çekme dayanımı testleri de yapılmıştır. Dayanıklılık testi olarak ise donma-çözünme testi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak C20/25 sınıfı betonlarda uçucu kül kullanımı 3, 7 ve 56 günlük basınç dayanımlarını şahite oranla artırmış, ancak 28 günlük basınç dayanımını azaltmıştır. Uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük basınç dayanımı şahit betonun 3 günlük basınç dayanımından daha düşüktür. C25/30 sınıfı betonlarda uçucu kül kullanılan betonların en yüksek basınç dayanımının 56. günde elde edildiği gözlenmiştir. C30/37 ve C35/45 sınıfı betonlarda erken dayanım sonuçlarına bakıldığında uçucu külün erken dayanımları artırmadığı ileri ki dayanımları artırdığı görülmüştür. Tüm beton sınıfları için uçucu kül kullanımı yarmada çekme dayanımlarını artırmıştır. Farklı dayanım sınıflarındaki betonlarda ve kendiliğinden yerleşen betonda uçucu kül kullanımı donma-çözünme direncini artırmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Uçucu kül, Beton, Basınç dayanımı, Yarmada çekme dayanımı, Donma-çözünme direnci.

## EFFECT OF FLY ASH USE ON THE MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF CONCRETES WHICH HAVE DIFFERENT STRENGTH LEVEL

### Abstract

The world has entered a rapid industrial development with the twentieth century. This development provides great returns in terms of civilization, but when considering the negative effects of industrial wastes on the environment, big problems arise. The reuse of these waste materials with useful recycling systems is important both in terms of economic and environmental impacts. It is thought that an industrial waste-fly ash generally preferred in the construction industry which become problem to the environment is considered as recycling and will contribute to humanity in terms of improving both environmentally and concrete properties. At this experimental study, effect of fly ash which has been derived from Çanakkale Biga Bekirli Thermal Power Plant on the mechanical and durability properties of concrete was investigated. Four concrete mixture which have different strength level were produced. For each concrete class, control concrete, concrete with fly ash and concrete without fly ash were produced. The percentage of fly ash was 20 percent of the cement amount. Chemical admixtures was used as 1 percent of total binder amount. Compressive strength results were found for 3, 7, 28 and 56 day specimens. In addition, split tension strength result was determined. Freezing and thawing resistance was also investigated. Consequently, for C20/25 concrete, it was found to be significant that fly ash use increased 3, 7 and 56 day compressive strength results. However, fly ash use reduced 28 day compressive strength result. 3 day compressive strength of concrete without fly ash is less than 3 day compressive strength of control concrete. The greatest compressive strength result of concrete using fly ash in C25/30 concretes was obtained for 56 day specimens. It was significant that fly ash use increased the later compressive strength. For C30/37 and C35/45 concretes, fly ash does not increase the earlier compressive strength. However, fly ash increases the later compressive strength results. Fly ash use for all concrete classes has increased split tension strength results. Fly ash use for both all concrete classes has increased the freezing and thawing resistance.

**Keywords:** Fly ash, Concrete, Compressive strength, Split tension strength, Freezing and thawing resistance.

## 1. GİRİŞ

Dünya yirminci yüzyılla birlikte hızlı bir endüstriyel gelişim içerisine girmiştir. Bu gelişim medeniyet açısından büyük getiriler sağlamakla birlikte endüstriyel atıkların çevreye olumsuz etkileri göz önüne alındığında büyük sorunlar karşımıza çıkmaktadır. Bu atık malzemelerin yararlı geri dönüşüm mekanizmaları ile değerlendirilmesi maliyet açısından ve aynı zaman da çevresel etkilerin iyileştirilmesi açısından önem kazanmaktadır. Çevresel olarak sorun oluşturan inşaat sektöründe kullanımı mevcut olan uçucu kül gibi endüstriyel atık malzemenin geri dönüşüm olarak değerlendirilmesi hem çevresel açıdan hem de betonun özelliklerini iyileştirmesi açısından insanlığa büyük katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Beton özelliklerini iyileştirmek için üretimde uçucu kül gibi bir mineral katkının yanında kimyasal katkılar da kullanılabilir. Kimyasal katkılar betonun işlenebilirliğini iyileştirmede, priz sürelerini hızlandırma veya geciktirmede, dayanım kazanma oranını kontrol etmede, donatı dayanıklılığı artırmada, alkali-silika reaksiyonu, sülfat etkisi ve korozyondan korunmada tercih edilir [1]. Aynı zamanda kimyasal katkılar betonda sürüklenmiş hava kabarcıkları oluşturabilir ve suyun yüzey çekmesini değiştirebilir [2]. Kimyasal katkıların işlevi iki farklı şekilde olmaktadır. Birinci işlevi sağlayan kimyasal katkılar çimento-su ile etkileşim yaparak suyun yüzey çekmesini değiştirir. İkinci işlevi sağlayan kimyasal katkılar ise iyonik bileşenleri bozar ve çimento ile su arasında gerçekleşen kimyasal tepkimeleri yönlendirir. Tablo 1'de kimyasal katkıların beton özelliklerini iyileştirmedeki faydaları, kimyasal katkı çeşitleri ve sınıfları sunulmuştur [3]. Su azaltıcı kimyasal katkıların işlevi çimento-su arasındaki hidratasyon reaksiyonlarına dayanır. Çimento ile su arasındaki hidratasyon reaksiyonları tamamlandıktan sonra etrenjit oluşumu gerçekleşir. Çimento inceliği ve bileşimi, özellikle  $C_3A$  anabileşen miktarı,  $SO_3$  ve alkali miktarları etrenjit oluşturma miktarını etkileyebilir [1]. Süperakışkanlaştırıcılar yüksek miktarda su azaltıcı kimyasal katkılardır. Süperakışkanlaştırıcılar çimento taneleri tarafından adsorbe olduğunda, negatif yüke sahip olurlar. Negatif yüklü olması çevreleyen suyun yüzey çekmesini azaltır ve bu sayede betonun akıcılığı artar. Su miktarını % 20–30 azaltırlar [1]. Kimyasal katkılar TS EN 206:2013+A1 Türk Standardında, taze veya sertleşmiş beton özellikleri değiştirilmek istendiğinde, karışım sürecinde betona, çimento ağırlığının yüzdesi olarak karışıma eklenen katkı olarak tanımlanmıştır [4]. Kimyasal katkı kullanılması getireceği avantajlar belirtilecek olursa beton maliyeti azalabilir, beton özellikleri iyileşebilir, betonun karışım

sürecinden yerleştirme sürecine kadar beton kalitesi iyileşebilir [5]. Kimyasal katkıların kullanım uygunluğunun TS EN 934-2+A1 standardına göre incelenmesi gerekmektedir [4, 6].

**Tablo 1.** Kimyasal katkıların beton özellikleri üzerinde yararlı etkileri, kimyasal katkı tipleri ve kategorileri

Beton Özelliği	Kimyasal Katkı Tipi	Katkı Kategorisi
İşlenebilirlik	Su azaltıcılar	Kimyasal
	Hava sürükleyiciler	Hava sürükleme
	Mineral toz	Mineral
	Puzolanlar	Mineral
Priz kontrolü	Priz hızlandırıcılar	Kimyasal
	Priz geciktiriciler	Kimyasal
Dayanım	Su azaltıcılar	Kimyasal
	Puzolanlar	Mineral
	Priz geciktiriciler	Kimyasal
Dayanıklılık	Hava sürükleyiciler	Kimyasal
	Puzolanlar	Mineral
	Su azaltıcılar	Kimyasal
	Su itici kimyasal katkılar	Kimyasal

Mineral katkıları ise puzolanlardır. Eğer bir malzeme kalsiyum hidroksitle tepkimeye girebiliyorsa puzolanik aktiviteye sahip bir malzemedir ve “puzolan” olarak adlandırılır. Bir puzolan amorf silika içerir ve bu da kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek C-S-H jelini oluşturur [3]. Puzolanik malzemeler genellikle camsı formda silika ve alümina içerir ve bunlar da kalsiyum hidroksitle reaksiyona girebilir. Bunun sonucunda ilave C-S-H hidratlar ve kalsiyum alüminat hidratlar oluşur. Bu reaksiyon çimento hidratasyonundan daha yavaştır ve puzolanik çimentoların dayanım artışı hızı Portland çimentolarının dayanım artışı hızından daha düşüktür. Uçucu kül bir puzolanik malzemedir. Uçucu kül, camsı taneli küresel şekle sahiptir. Beton işlenebilirliği üzerinde pozitif bir etkisi vardır. Uçucu küldeki iri taneleri atmak uçucu külün performansını artırabilir [2]. Betonda uçucu kül kullanımı sertleşmiş betonun geçirimsizliğini azaltır ve dayanıklılığını artırır [3]. Ayrıca uçucu kül kullanımı sülfat

etkisi direncini de [1]. TS EN 206:2013+A1 Türk Standardında mineral katkı beton özelliklerini iyileştirmek, dayanıklılığı artırmak amacıyla kullanımı mevcut olan katkı sınıfı olarak tanımlanmıştır. Mineral katkılar iki farklı sınıfta tanımlanmıştır. Birinci sınıf mineral katkılar inert mineral katkılar (Tip I), ikinci sınıf mineral katkılar ise puzolanik mineral katkılar (Tip II) olarak vurgulanmıştır [4]. Puzolanlar Tip II sınıfı mineral katkılardandır. Kullanılacak uçucu külün uygunluk kriterleri TS EN 450-1 standardına göre belirlenir [7].

İşlenebilirlik betonda ayrışma meydana gelmeden betonun kolayca yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve bunun sonucunda istenilen görünüşte olmasıdır. Eğer agrega tane şekli ve dağılımı uygunsa, beton kıvamı da yüksekse beton karışımının işlenebilirliği yüksektir. Karışım suyundan dolayı taze betonda bir akıcılık mevcuttur. Kıvam bu akıcılığın bir göstergesidir. Ayrıca su ihtiyacını düşürebilmek için karışımda kimyasal katkı kullanılması da tercih edilebilir [8]. Su kesici ve priz sürelerini geciktiren kimyasal katkılar tercih edildiğinde betonda çok akıcı bir kıvam elde edilebilir. Kıvamı artırmak için karışıma sonradan kesinlikle ekstra su ilave edilmemelidir [1]. İstenilen çökmeyi elde etmek için ve karışım suyunu azaltmak için maksimum agrega tane boyutu artırılmalı, agregadaki pürüzlü ve köşeli tane miktarı azaltılmalıdır, beton karışımında sürüklenmiş hava miktarı artırılmalı ve uçucu kül kullanılmalıdır [1]. Yoğunluğunun düşük olmasından dolayı, uçucu kül, hacimsel olarak çimento, su, veya kum miktarında bir artış olmadan çimento harcı/agrega oranını artırır [1]. Taze beton kolay karıştırılabilir ve taşınabilir olmalıdır. Üniform olmalıdır. Yerleştirme ve sıkıştırmada segregasyon olmamalıdır. Yüzeyi kolaylıkla düzeltilebilmelidir [3]. İşlenebilirlik hem beton karışımlarının maliyetini hem de kalitesini etkileyebilir [1]. Beton karışımlarının işlenebilirliği çimento özellikleri, karışım suyu miktarı, agrega oranları etkisi, agrega özellikleri, zaman ve sıcaklık, katkılardan etkilenmektedir [1, 3]. Çimento miktarının oldukça düşük olması sert bir karışım meydana gelmesine neden olur. Zayıf bir beton yüzeyi elde edilir. Çok yüksek miktarda çimento içeren beton karışımlarında kohezyon mükemmeldir ancak yapışkanlık artar [1]. Betonun işlenebilirliğini yöneten en önemli faktör su miktarıdır. Su miktarını artırmak betonun kolay yayılma ve sıkıştırılabilme özelliğini artırır. Ancak dayanım azalmasının yanı sıra su miktarının artması segregasyona ve terlemeye neden olabilir. İnce tanelerin özgül yüzey alanı daha yüksektir. Bundan dolayı su ihtiyacı artar [3]. Çok ince kumlar veya açılı kumların su ihtiyacı daha yüksektir. Doğal kum yerine kırma kum kullanıldığında beton % 2–3 daha fazla kuma ve 5–10 kg/m<sup>3</sup> daha fazla karışım suyuna ihtiyaç duyar [1]. Çok ince kum kullanıldığında su ihtiyacı artar. Doğal kum yerine kırma

kum kullanıldığında betonda % 2-3 daha fazla kuma ve 5-10 kg/m<sup>3</sup> daha fazla suya ihtiyaç duyulur [1]. Mineral katkıların işlenebilirlik üzerindeki etkisi çok düşüktür. Hava sürükleyici kimyasal katkılar, su azaltıcı kimyasal katkılar ve priz geciktirici kimyasal katkıları işlenebilirliği artırır [3]. Su-azaltıcı kimyasal katkı taze beton karışımına ilave edildiğinde kıvam artar. Sürüklenmiş hava hamur hacmini artırır ve betonun kıvamını iyileştirir. Aynı zamanda terleme ve segregasyonu azaltarak kohezifliği artırır. Puzolanik katkıları terlemeyi azaltır ve betonun kohezifliğini artırır. Uçucu kül kullanımının kıvam üzerinde olumlu bir etkisi vardır [1].

## 2. BETON BASINÇ DAYANIMININ ÖNEMİ

Beton karışımı hazırlamadan önce, uygun bileşenin ve oranının seçimi ilk adımdır [1]. 1918 yılında, İllinoi Üniversitesi'nde Lewis Enstitüsünde yapılan testlerin bir sonucu olarak, Duff Abrams su-çimento oranı ve beton dayanımı arasında bir bağıntı kurmuştur. Bu bağıntı, Abrams su-çimento oranı kuralı olarak bilinir. Bağıntı (1)'de verildiği gibidir [1].

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{w/c}} \quad (1)$$

w/c: su-çimento oranı

k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>: ampirik sabitler

Beton basınç dayanımı, su-çimento oranı ve hidrasyon derecesinin bir fonksiyonudur. Belirli sıcaklıkta hidrasyon derecesi zamana bağlıdır. Su-çimento oranı 0.3'ün altında ise su-çimento oranında düşük azalmalar yapılarak basınç dayanımında yüksek artışlar elde edilebilir [1]. Hidrasyon reaksiyonlarının gelişim süreci beton porozitesi ve basınç dayanımını etkiler. Agrega dayanımı, beton dayanımını belirleyen en önemli faktördür. Agrega boyutu, şekli, yüzey yapısı, tane boyutu dağılımı ve mineralojisi de beton dayanımını farklı derecelerde etkiler [1]. İyi derecede gradasyonlu iri agreganın maksimum tane boyutunda yapılacak bir değişiklik beton basınç dayanımını iki farklı şekilde etkiler. İlk olarak eğer çimento miktarı benzer ve kıvamları birbirine yakın iki farklı karışım mevcutsa maksimum agrega tane boyutu daha yüksek olan betonda karışım suyu ihtiyacı daha düşüktür. Diğer yandan, daha iri agregalar daha çok mikro-çatlak oluşumuna sebep olabilir. Bu etki su-

çimento oranı ve gerilme tipine bağlı olarak değişecektir [1]. Su azaltıcı kimyasal katkıları, betonun hem erken hem de son dayanımını artırabilir. Ekolojik ve ekonomik sebeplerden dolayı puzolanik malzeme kullanımı ve atık kullanımı (mineral katkı olarak) artmaktadır. Portland çimentosunun bir kısmı yerine kullanıldığında, mineral katkıların genellikle erken yaşlarda dayanım üzerinde geciktirici bir etkisi vardır. Mineral katkı kullanımı, betonda boşluk miktarını azaltır [1]. Betonun mekanik özelliklerinden uygulama bakımından en kolay ve en çok tercih edileni beton basınç dayanımıdır. Beton basınç dayanımı belirlenecek olursa betonun diğer özellikleri hakkında bir fikir yürütülebilir. Yüksek dayanıma sahip bir betonda porozite düşük, geçirimsizlik düşük ve beton dayanıklılığı yüksektir. Beton basınç dayanımını tayin etmede küp veya silindir numune kullanılabilir. Eğer beton basınç dayanımı belirlenmesinde, TS EN 12390-3:2010 standardına göre küp numune tercih edilirse basınç dayanımı  $f_{c,küp}$ , silindir numune tercih edilirse basınç dayanımı  $f_{c,sil}$  olarak tanımlanır [9]. Numune şeklinin küp veya silindir olması tercihi basınç dayanımı deneyinden önce mutlaka belirtilmelidir. Basınç dayanımı deneyi genellikle 7 ve 28 günlük numunelerde gerçekleştirilir [4]. Betonda varolan gerilme taze betonda uygulanan sıkıştırma süreci, beton kür sürecine bağlı olarak farklılık gösterebilir [1].

## 2.1. Karakteristik basınç dayanımı ( $f_{ck}$ )

Beton sınıfı belirlenmesinde esas olan betonun karakteristik basınç dayanımıdır. Beton basınç dayanımını etkileyen önemli bir parametre kullanılacak çimentonun tipi ve beton karışımında kullanılacak çimento miktarıdır. Eğer karışımda çimento dozajı artarsa basınç dayanımı da artar ancak basınç dayanımı hakkında temel esas alınacak gösterge çimento miktarı değil su-çimento oranıdır. Beton karışım suyunun da basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisi söz konusudur. Karışım suyu miktarı çok yüksek veya çok düşük olursa basınç dayanımı da buna bağlı olarak azalır. Beton karakteristik basınç dayanımının Tablo 2’de sunulan en düşük karakteristik basınç dayanım değerinden daha yüksek veya eşit olması gerekmektedir [4].

**Tablo 2.** Normal ve yüksek dayanımlı betonlar için basınç dayanımı sınıfları

Basınç dayanımı sınıfı	En düşük karakteristik silindir dayanımı $f_{ck, sil}$ N/mm <sup>2</sup>	En düşük karakteristik küp dayanımı $f_{c, küp}$ N/mm <sup>2</sup>
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 3.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada Çanakkale Biga Bekirli Termik Santralinin uçucu külünün betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. 4 farklı dayanım sınıfında beton karışımı üretilmiştir. Her bir beton sınıfı için şahit beton, uçucu kül içeren beton ve uçucu kül içermeyen beton üretilmiştir. Uçucu kül kullanım yüzdesi çimento miktarının % 20'si olarak alınmıştır. Uçucu kül içeren ve uçucu kül içermeyen betonlarda toplam bağlayıcı miktarının % 1'i olmak üzere kimyasal katkı kullanılmıştır. Beton karışımlarında kullanılan kimyasal katkılar Tablo 3-6'da görülmektedir. Üretimlerde 10 cm ebatlı küp kalıplar kullanılmıştır. Üretilen küp numuneler kür havuzunda  $23 \pm 2$  °C suda bekletilmiştir. Numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan sonra 4 farklı yaşta basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı testi haricinde yarmada çekme dayanımı testleri de yapılmıştır. Dayanıklılık testi olarak ise donma-çözünme testi gerçekleştirilmiştir. C20/25 beton karışımında orta akışkanlaştırıcı, C25/30 ve C30/37 beton karışımlarında süper akışkanlaştırıcı, C35/45 beton karışımında modifiye polikarboksilat kimyasal katkısı kullanılmıştır.



### 3.2. Üretilen Betonların Özellikleri

Bu çalışmada üretilen betonların karışım dizaynları Tablo 3-6'da verilmiştir.

**Tablo 3.** C20/25 beton karışım dizaynı

Bileşen miktarı (kg/m <sup>3</sup> )							
	Çimento	Su	Kırmataş I	Kırmataş II	Taş Tozu	Uçucu Kül	Kimyasal Katkı
ŞAHİT	260	185	290	470	1200	0	0
KÜLLÜ	239	185	290	470	1200	52	2.6
KÜLSÜZ	260	185	290	470	1200	0	2.6

**Tablo 4.** C25/30 beton karışım dizaynı

Bileşen miktarı (kg/m <sup>3</sup> )							
	Çimento	Su	Kırmataş I	Kırmataş II	Taş Tozu	Uçucu Kül	Kimyasal Katkı
ŞAHİT	280	190	300	500	1150	0	0
KÜLLÜ	257	190	300	500	1150	56	2.8
KÜLSÜZ	280	190	300	500	1150	0	2.8

**Tablo 5.** C30/37 beton karışım dizaynı

Bileşen miktarı (kg/m <sup>3</sup> )							
	Çimento	Su	Kırmataş I	Kırmataş II	Taş Tozu	Uçucu Kül	Kimyasal Katkı
ŞAHİT	310	187	320	520	1100	0	0
KÜLLÜ	285	187	320	520	1100	62	3.1
KÜLSÜZ	310	187	320	520	1100	0	3.1

**Tablo 6.** C35/45 beton karışım dizaynı

Bileşen miktarı (kg/m <sup>3</sup> )							
	Çimento	Su	Kırmataş I	Kırmataş II	Taş Tozu	Uçucu Kül	Kimyasal Katkı
ŞAHİT	340	185	340	570	1030	0	0
KÜLLÜ	312	185	340	570	1030	68	3.4
KÜLSÜZ	340	185	340	570	1030	0	3.4

### 3.3. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

#### 3.3.1. Çimento

Çalışmanın tamamında Kırklareli Pınarhisar Limak Çimento Fabrikasında üretilmiş CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Portland çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 7-9'da sunulmuştur.

**Tablo 7.** CEM I 42,5R Portland çimentosunun kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşimin Tanımı	Kimyasal Bileşimin Yüzdesi (%)
SiO <sub>2</sub>	19.13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.83
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.22
CaO	63.60
MgO	1.12
SO <sub>3</sub>	2.89
Na <sub>2</sub> O	0.15
K <sub>2</sub> O	0.69
Cl	0.0098
Kızdırma Kaybı	3.56
Çözünmeyen Kalıntı	0.32
C <sub>3</sub> A	7.36

**Tablo 8.** CEM I 42,5R Portland çimentosunun fiziksel özellikleri

Özgül ağırlık		3.11
Priz süresi(dakika)	Başlangıç	195
	Son	235
Hacim Sabitliği(Le Chatelier) Toplam (mm)		1
Özgül Yüzey (Blaine) cm <sup>2</sup> /gr		3475

**Tablo 9.** CEM I 42,5R Portland çimentosunun mekanik özellikleri

Gün	Basınç Dayanımları (N/mm <sup>2</sup> )
2	28.6
7	48.1
28	59.8

### 3.3.2. Agregalar

Çalışmada agrega olarak kırmataş I dolomit agregası (5-12 mm), kırmataş II dolomit agregası (12-19 mm) ve taş tozu dolomit agregası (0-5 mm) kullanılmıştır. Agregaların birim ağırlıkları ve özgül ağırlıkları bulunmuştur. Agregaların gevşek yığın yoğunluğu ve özgül ağırlığı Tablo 10'da verilmiştir. Agregaların elek analizi sonuçları Tablo 11'de sunulmuştur.

**Tablo 10.** Agregaların gevşek yığın yoğunluğu ve özgül ağırlığı

Malzeme	Gevşek Yığın Yoğunluk (Mg/m <sup>3</sup> )	Özgül Ağırlık
Taş tozu	1.74	2.82
Kırmataş I	1.54	2.83
Kırmataş II	1.52	2.84

**Tablo 11.** Agregaların elek analiz sonuçları

Elek Boyutu(mm)	Elek altına geçen yüzde (%)		
	Taş tozu	Kırmataş I	Kırmataş II
31.5	100	100	100
22.4	100	100	100
16	100	100	47
11.2	100	99	3
8	100	47	0
5.6	100	13	0
4	96	2	0
2	61	1	0
1	38	0	0
0.5	26	0	0
0.25	21	0	0
0.125	18	0	0

### 3.3.3. Uçucu külün özellikleri

Deneylerde Çanakkale Biga Bekirli Termik Santralinin atığı olan uçucu kül kullanılmıştır. Bu kül F tipi uçucu kül olarak sınıflandırılmaktadır. F tipi uçucu külün kimyasal özellikleri Tablo 12'de sunulmuştur.

**Tablo 12.** Çanakkale Biga Bekirli Termik Santrali uçucu külünün kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşimin Tanımı	Kimyasal Bileşimin Yüzdesi	C Sınıfı Uçucu Küller İçin TS EN 450-1 [7] ve ASTM C618-17a [10]	F Sınıfı Uçucu Küller İçin TS EN 450-1 [7] ve ASTM C618-17a [10]
SiO <sub>2</sub>	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-
S+A+F	92.17	>50 ASTM C618-17a	>70 ASTM C618-17a
CaO	-	>10 (Yüksek Kireçli) ASTM C618-17a	<10 (Düşük Kireçli) ASTM C618-17a
MgO	0.682	-	-
SO <sub>3</sub>	-	<3 TS EN 450-1	<TS EN 450-1
K <sub>2</sub> O	-	-	-

Tablo 12 devam ediyor

Kimyasal Bileşimin Tanımı	Kimyasal Bileşimin Yüzdesi	C Sınıfı Uçucu Küller İçin TS EN 450-1 [7] ve ASTM C618-17a [10]	F Sınıfı Uçucu Küller İçin TS EN 450-1 [7] ve ASTM C618-17a [10]
Na <sub>2</sub> O	-	-	-
TiO <sub>2</sub>	-	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-
Cl	0.01	<0.1 TS EN 450-1	<0.1 TS EN 450-1
Kızdırma Kaybı	2.7	<5 TS EN 450-1	<5 TS EN 450-1
Serbest CaO	0.1	<1 TS EN 450-1	<1 TS EN 450-1

### 3.4. Beton Karışımları

C20/25 beton karışım dizaynında dozaj 260 kg/m<sup>3</sup>, C25/30 beton karışım dizaynında dozaj 280 kg/m<sup>3</sup>, C30/37 karışım dizaynında dozaj 310 kg/m<sup>3</sup>, C35/45 beton karışım dizaynında 340 kg/m<sup>3</sup> seçilmiştir. C20/25 beton karışım dizaynında su/bağlayıcı oranı 0,71, C25/30 beton karışım dizaynında su/bağlayıcı oranı 0,68, C30/37 beton karışım dizaynında su/bağlayıcı oranı 0,60, C35/45 beton karışım dizaynında su/bağlayıcı oranı 0,54'tür. Her bir karışım için 15 dm<sup>3</sup> beton üretilmiştir.

### 3.5. Beton Üretimi Karıştırma Yerleştirme Saklama Numune Boyutları

Beton karışımları laboratuvar tipi beton mikseri kullanılarak hazırlanmıştır. Karışımın katı bileşenleri su ilave edilmeden önce 2 dakika mikserde karıştırılmıştır. Daha sonra su ilave edilerek karışım mikserde 5 dakika daha karıştırılmıştır. Her bir beton karışımının 15 dm<sup>3</sup> olarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Her bir karışımında taze beton 12 adet 10x10x10 cm<sup>3</sup> boyutundaki küp kalıplara yerleştirilmiş, 24 saat sonra sertleşmiş beton kalıplardan çıkarılarak 23±2 °C su içerisinde bekletilmiştir. Basınç dayanımı deneyi 3, 7, 28 ve 56. günler sonunda uygulanmıştır.

### 3.6. Taze Beton Deneyleri

Her bir beton sınıfı için çökme değeri 150 mm olarak sabit alınmıştır. Aynı zamanda her bir karışım için yaş birim ağırlıklar belirlenmiştir.

### 3.7. Sertleşmiş Beton Deneyleri

10x10x10 cm<sup>3</sup> boyutlarında üretilen numuneler, 23±2 °C su içerisinde saklanmıştır. 3, 7, 28 ve 56. günler sonunda numuneler üzerinde basınç dayanımı testi uygulanmıştır. 28 günlük numuneler kullanılarak yarmada çekme dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca dayanıklılık deneylerinden olan donma-çözünme deneyi de yapılmıştır.

## 4. DENEY SONUÇLARI

### 4.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Bu çalışmada üretilen taze betonların birim ağırlıkları, çökme değerleri, hava sıcaklıkları ve beton sıcaklıkları, ayrıca kendiliğinden yerleşen betonun birim ağırlıkları, yayılma değerleri, hava sıcaklıkları ve beton sıcaklıkları Tablo 13-16'da sunulmuştur.

**Tablo 13.** C20/25 taze beton özellikleri

	Yaş birim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Slump (çökme) (mm)	Hava sıcaklığı (°C)	Beton sıcaklığı (°C)
ŞAHİT	2534	150	21.3	22.8
KÜLLÜ	2504	150	20.7	22.5
KÜLSÜZ	2494	150	23.3	20.5

**Tablo 14.** C25/30 taze beton özellikleri

	Yaş birim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Slump (çökme) (mm)	Hava sıcaklığı (°C)	Beton sıcaklığı (°C)
ŞAHİT	2528	150	20.3	19.7
KÜLLÜ	2534	150	20.1	19.6
KÜLSÜZ	2540	150	20.2	19.5

**Tablo 15.** C30/37 taze beton özellikleri

	Yaş birim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Slump (çökme) (mm)	Hava sıcaklığı (°C)	Beton sıcaklığı (°C)
ŞAHİT	2456	150	20.1	17.8
KÜLLÜ	2534	150	20.7	19.1
KÜLSÜZ	2540	150	20.2	19.5

**Tablo 16.** C35/45 taze beton özellikleri

	Yaş birim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Slump (çökme) (mm)	Hava sıcaklığı (°C)	Beton sıcaklığı (°C)
ŞAHİT	2514	150	20.4	21.2
KÜLLÜ	2572	150	20.8	20.2
KÜLSÜZ	2560	150	20.3	20.2

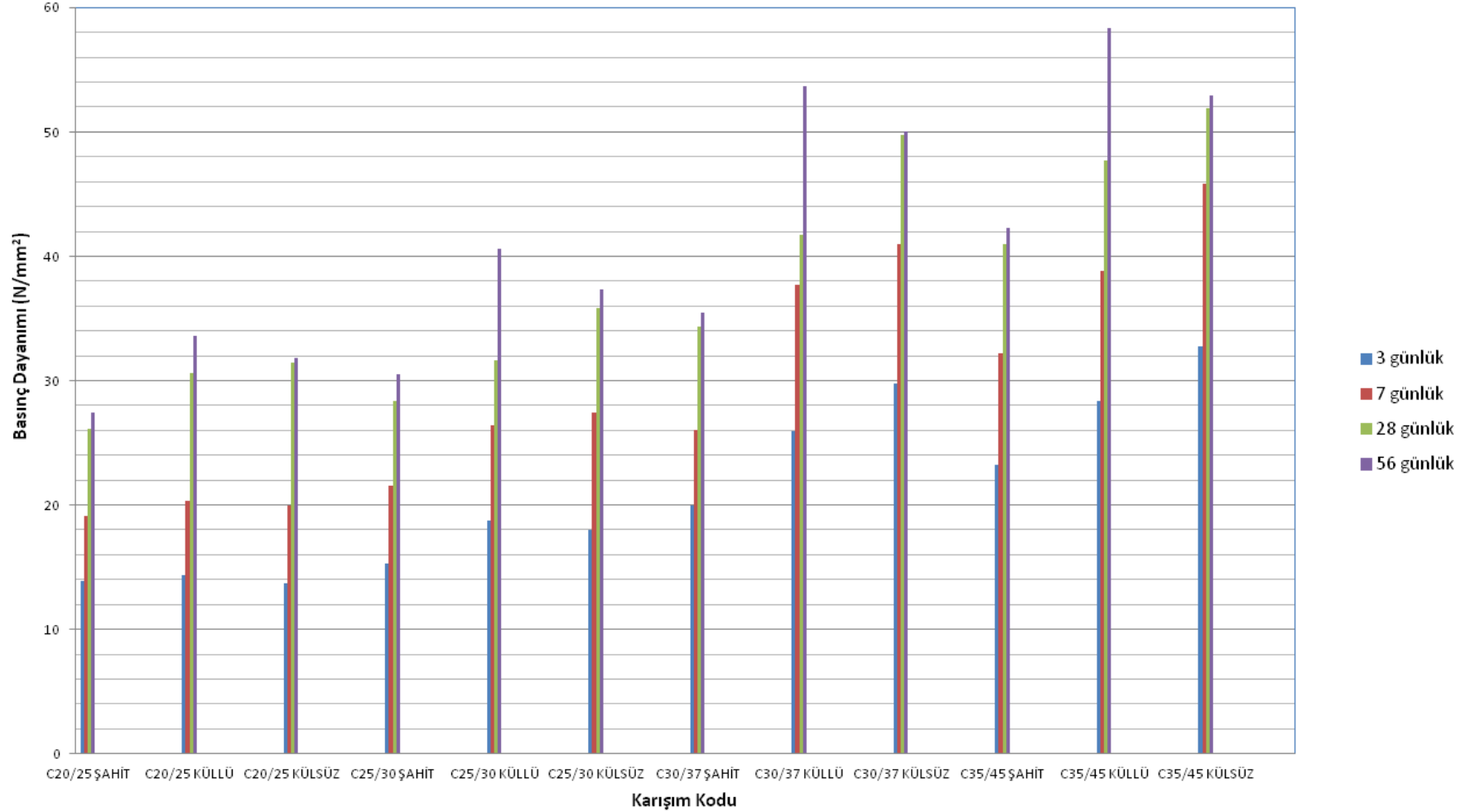
## 4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

### 4.2.1. Basınç dayanımı tayini

Bu çalışmada üretimi yapılan betonların basınç dayanımı değerleri ile rölatif basınç dayanımı değerleri Şekil 1-2'de verilmiştir.

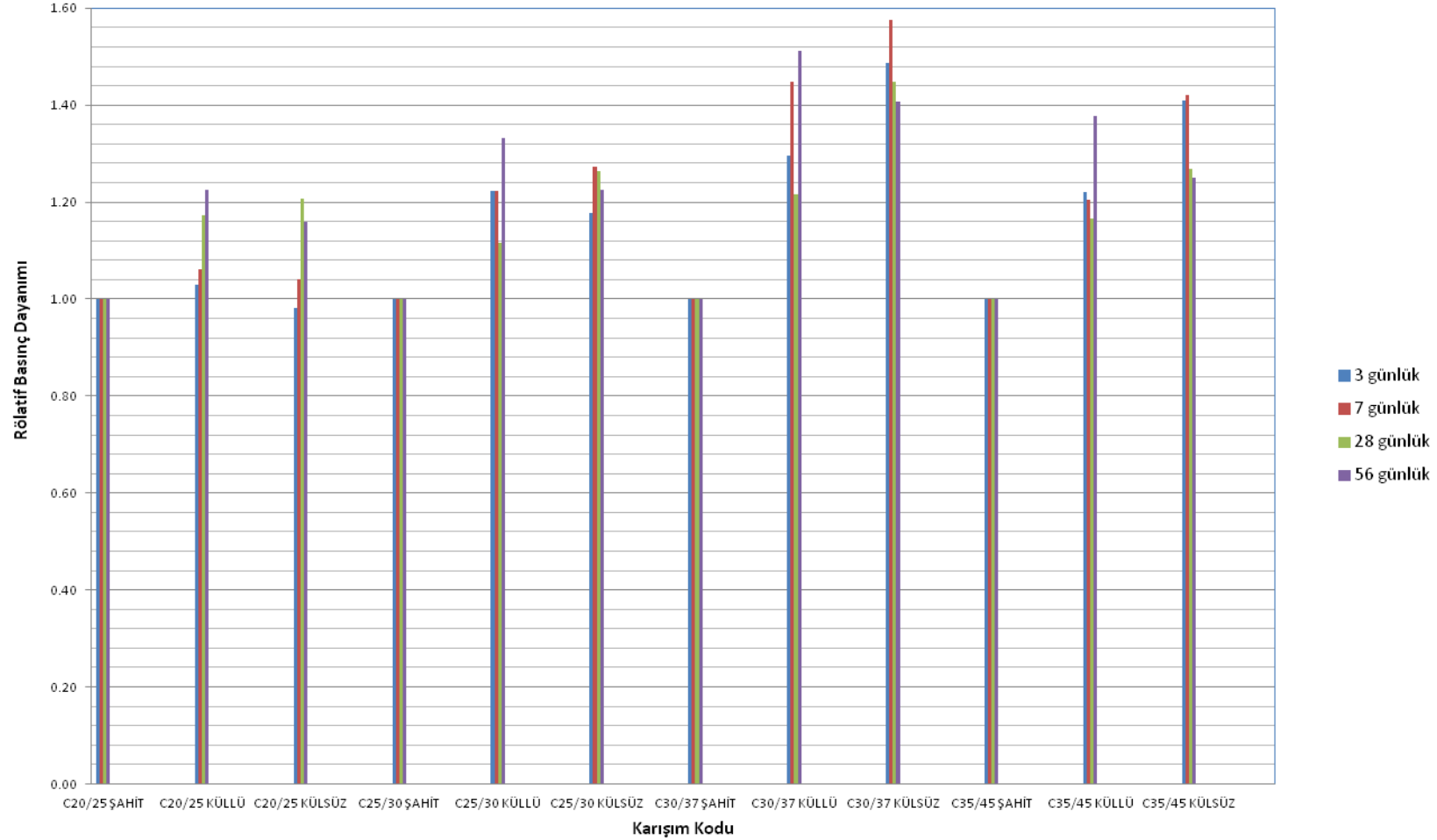
### 4.2.2. Yarmada çekme dayanımı tayini

28 günlük küp numunelerde yarmada çekme dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Farklı beton sınıflarında üretilen betonların yarmada çekme dayanımı değerleri ve rölatif yarmada çekme dayanımı değerleri Şekil 3-4'de verilmiştir.

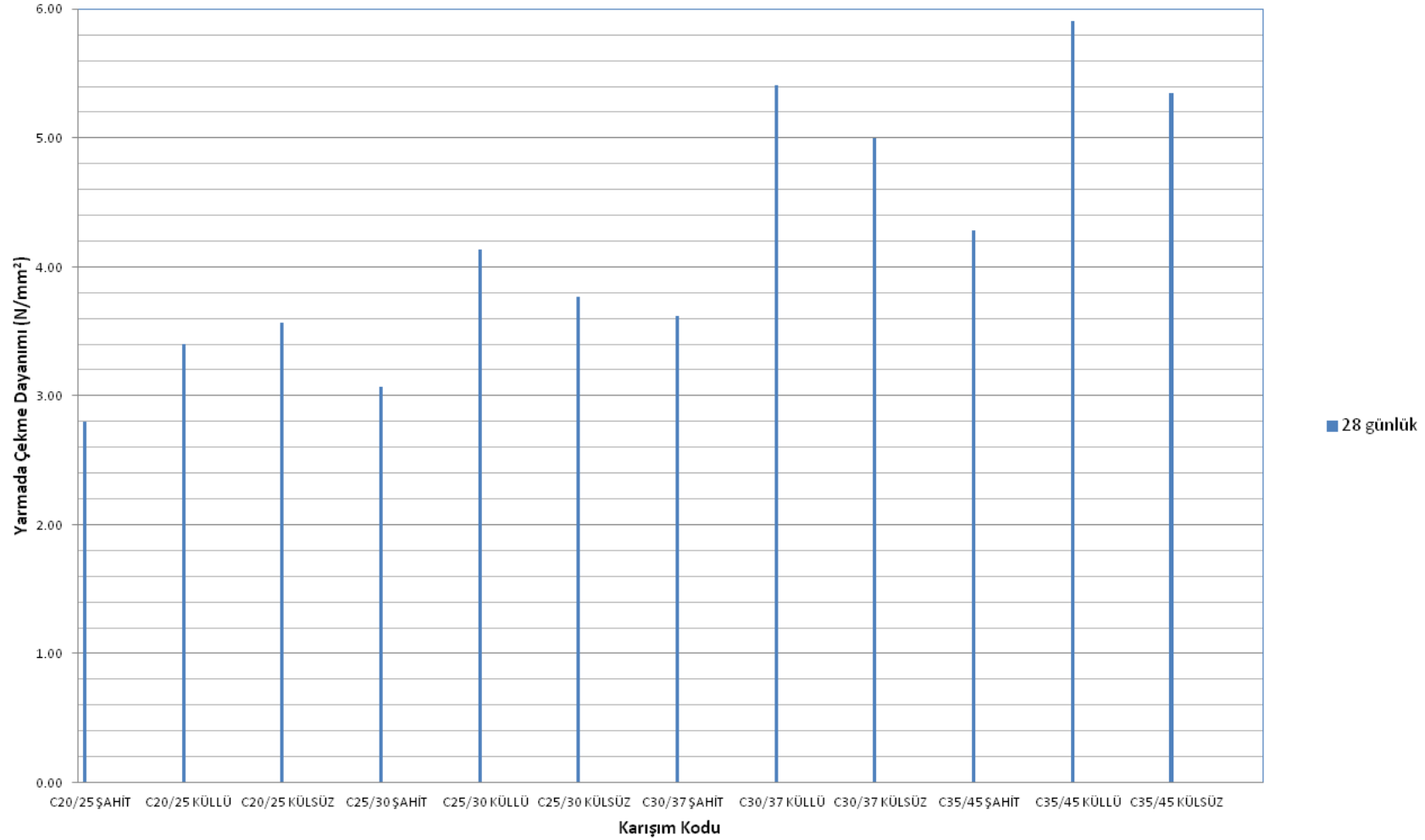


Şekil 1. Üretimi gerçekleştirilmiş farklı dayanım sınıflarında betonların 3, 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı değerleri

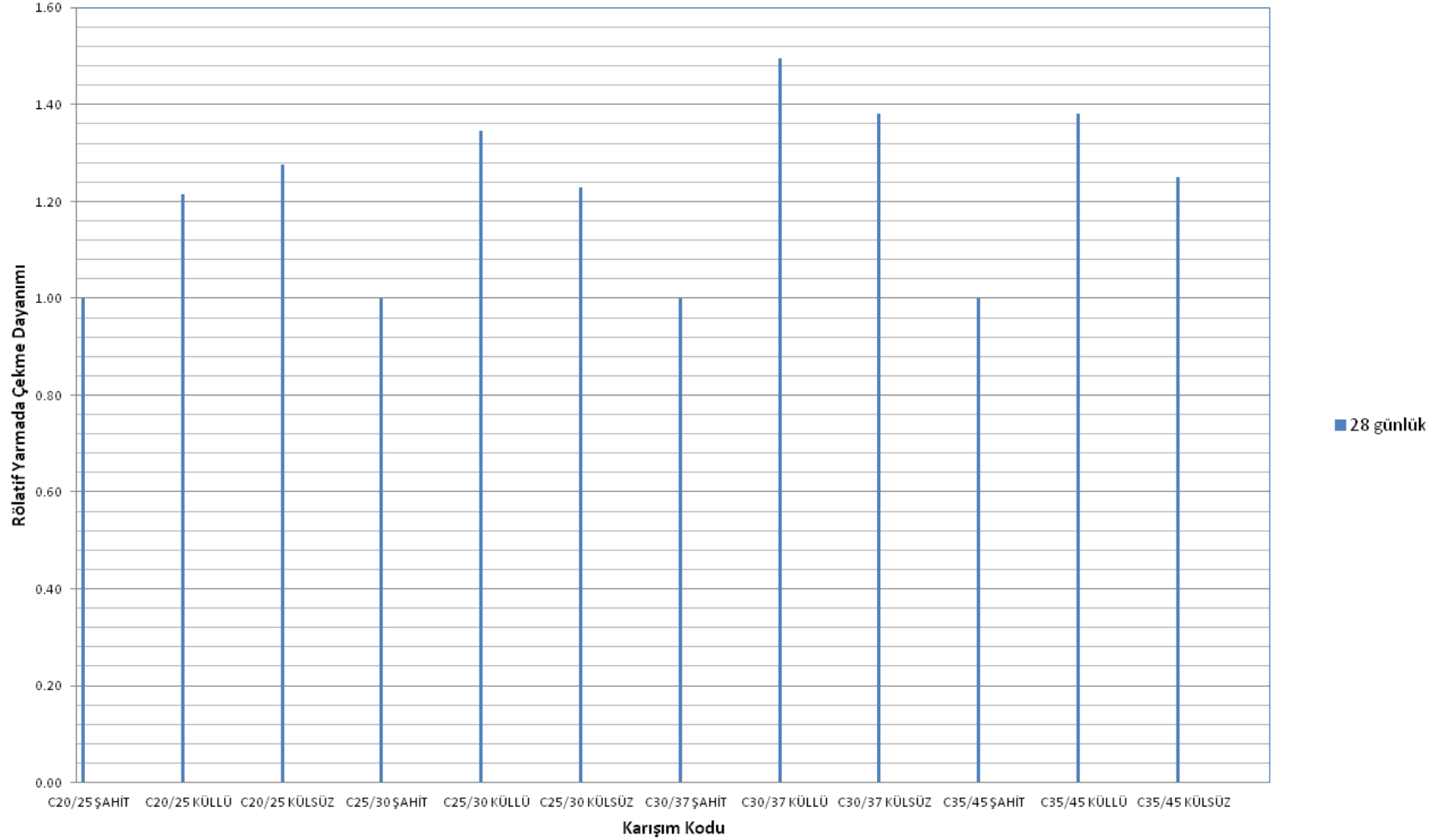




Şekil 2. Üretimi gerçekleştirilmiş farklı dayanım sınıflarında betonların 3, 7, 28 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımı değerleri



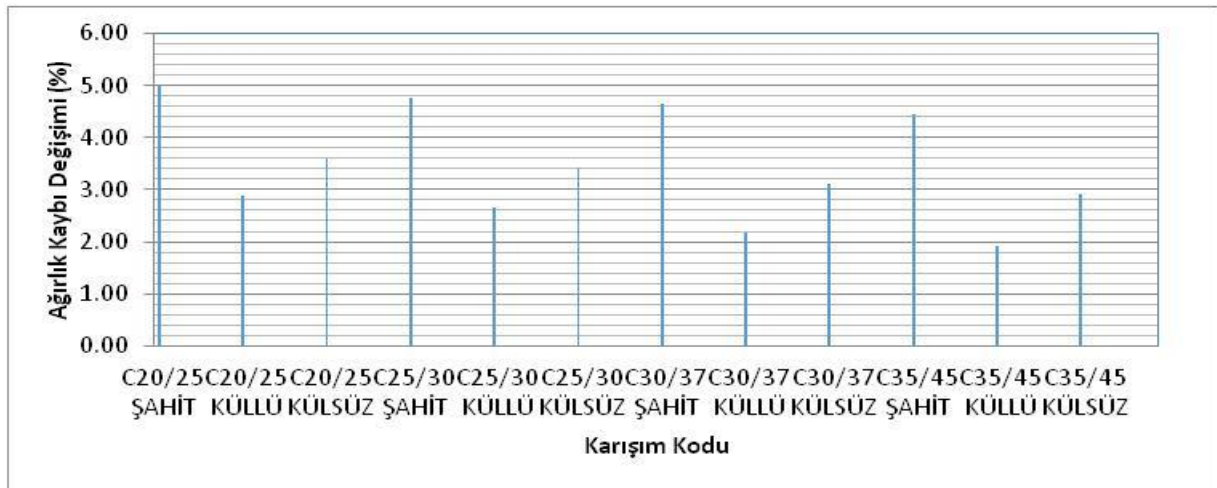
Şekil 3. Farklı dayanım sınıflarında betonların 28 günlük yarmada çekme dayanımları



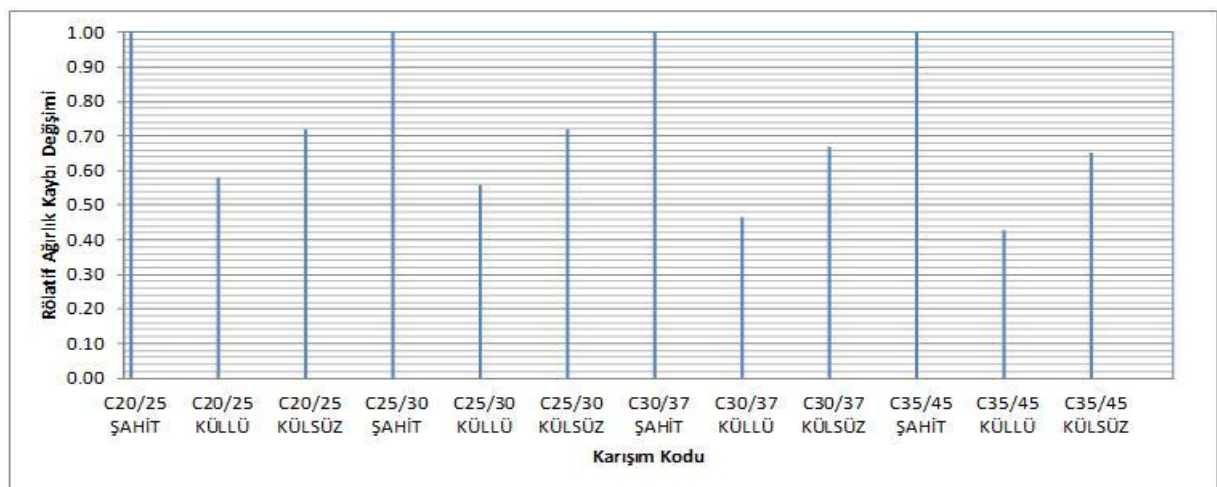
Şekil 4. Farklı dayanım sınıflarında betonların 28 günlük rölatif yarmada çekme dayanımları

### 4.2.3. Donma-çözünme direnci tayini

28 günlük küp numunelerde donma-çözünme direnci tayini deneyi gerçekleştirilmiştir. Donma-çözünme direnci tayini deneyi ASTM C666/C666M-15 standardına göre gerçekleştirilmiştir [11]. 28 günlük küp numuneler donma-çözünme kabininde 12 saat  $-20^{\circ}\text{C}$ 'de bekletilmiş, daha sonra numuneler donma-çözünme kabininden çıkarılıp  $20^{\circ}\text{C}$ 'deki suda 12 saat süreyle çözülmeye bırakılmıştır. Bu tam 1 döngüdür. 25 donma-çözünme çevrimi sonunda numunelerdeki ağırlık kayıpları deneysel olarak belirlenmiştir. Donma-çözünme direnci tayini deneyi sonrası ağırlık kaybı değişimleri Şekil 5'de, rölatif ağırlık kaybı değişimleri ise Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5. Farklı dayanım sınıflarındaki betonların donma-çözünme direnci tayini deneyi sonrası ağırlık kaybı değişimleri



Şekil 6. Farklı dayanım sınıflarındaki betonların donma-çözünme direnci tayini deneyi sonrası rölatif ağırlık kaybı değişimleri

## 5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

### 5.1. Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tablo 13-16'da görüldüğü üzere farklı dayanım sınıflarındaki betonlar için çökme değeri sabit seçilmiş olup 150 mm'dir. Hava sıcaklıkları ve beton sıcaklıkları da kaydedilmiştir. Hava sıcaklıkları 20.1 °C ile 23.3 °C arasında değişim göstermiştir. Beton sıcaklıkları ise 19.1 °C ile 22.8 °C arasında değişmiştir. Her bir beton karışımının yaş birim ağırlığı  $\text{kg/m}^3$  cinsinden ölçülmüştür. Betonların yaş birim ağırlıkları 2400-2600  $\text{kg/m}^3$  arasında farklılık göstermiştir. C20/25 sınıfı için hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen taze betonların yaş birim ağırlıkları şahite oranla daha düşüktür. Uçucu kül içeren betonda elde edilen yaş birim ağırlık uçucu kül içermeyen betonda elde edilen yaş birim ağırlıktan daha yüksektir. C25/30 ve C30/37 sınıfları için hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen taze betonların yaş birim ağırlıkları şahite oranla daha yüksektir. Uçucu kül içeren betonda elde edilen yaş birim ağırlık uçucu kül içermeyen betonda elde edilen yaş birim ağırlıktan daha düşüktür. C35/45 sınıfı için hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen taze betonların yaş birim ağırlıkları şahite oranla daha yüksektir. Uçucu kül içeren betonda elde edilen yaş birim ağırlık uçucu kül içermeyen betonda elde edilen yaş birim ağırlıktan daha yüksektir.

### 5.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 1'de görüldüğü üzere farklı dayanım sınıflarındaki betonlarda 3, 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. C20/25 sınıfı betonlarda 3, 7 ve 56 günlük sonuçlar incelendiğinde uçucu kül içeren betonun 3, 7 ve 56 günlük basınç dayanımının hem şahit betonun 3, 7 ve 56 günlük basınç dayanımından hem de uçucu kül içermeyen betonun 3, 7 ve 56 günlük basınç dayanımından daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. 28 günlük sonuçlar irdelendiğinde ise en yüksek basınç dayanımının uçucu kül içermeyen betonda gözlemlendiği açıkça görülmektedir. Uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük basınç dayanımı şahit betonun 3 günlük basınç dayanımından daha düşüktür. C25/30 sınıfı betonlarda hem uçucu kül içeren betonun 3 günlük basınç dayanımı hem de uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük basınç dayanımı şahit betonun 3 günlük basınç dayanımından daha yüksektir. Uçucu kül içeren betonun 3 günlük basınç dayanımı uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük basınç dayanımından daha yüksektir. 7 günlük sonuçlarda farklı davranış gözlenmiştir. Hem uçucu kül içeren betonun 7 günlük basınç dayanımı hem de uçucu kül içermeyen betonun 7 günlük

basınç dayanımı şahit betonun 7 günlük basınç dayanımından daha yüksektir. Uçucu kül içermeyen betonun 7 günlük basınç dayanımı uçucu kül içeren betonun 7 günlük basınç dayanımından daha yüksektir. 28 günlük sonuçlarda ise 7 günlük sonuçlardaki davranışa benzer durum gözlenmiştir. 56 günlük sonuçlara bakıldığında ise uçucu kül içeren betonun basınç dayanımının en yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu da beklenen bir sonuçtur. Çünkü uçucu kül nihai basınç dayanımlarını artıran bir puzolandır. C30/37 ve C35/45 sınıfı betonlarda sonuçlar irdelendiğinde uçucu kül içermeyen betonda 3 günlük basınç dayanımının uçucu kül içeren betonda 3 günlük basınç dayanımından daha yüksek olduğu gözlenmiştir. 7 ve 28 günlük sonuçlarda da benzer davranış gözlenmiştir. 56 günlük sonuçlara bakıldığında ise uçucu kül içeren betonun basınç dayanımının uçucu kül içermeyen betonun basınç dayanımından daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. C20/25 sınıfı betonlarda rölatif basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük rölatif basınç dayanımı hariç diğer tüm betonların 3, 7, 28 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımları şahit betonun rölatif basınç dayanımı değerlerinden daha yüksektir. Uçucu kül içeren betonun 3, 7 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonun 3, 7 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha yüksektir. 28 günlük sonuçlar ele alındığında uçucu kül içermeyen betonun rölatif basınç dayanımı uçucu kül içeren betonun rölatif basınç dayanımından daha yüksektir. En yüksek rölatif basınç dayanımının uçucu kül içeren betonun 56 günlük rölatif basınç dayanımı olduğu da açıkça görülmektedir. C25/30 sınıfı betonların rölatif basınç dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde uçucu kül içeren ve uçucu kül içermeyen betonların rölatif basınç dayanımlarının şahit betonun rölatif basınç dayanımlarından daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Uçucu kül içeren betonların 3 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonların 3 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha yüksektir. Ancak uçucu kül içeren betonların 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonların 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha düşüktür. En yüksek rölatif basınç dayanımı uçucu kül içeren betonun 56 günlük rölatif basınç dayanımında gözlenmiştir. C30/37 sınıfı betonların rölatif basınç dayanımı sonuçları ele alındığında hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen betonların rölatif basınç dayanımı sonuçları şahit betonun rölatif basınç dayanımı sonuçlarından daha yüksektir. Uçucu kül içeren betonların 3, 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonların 3, 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha düşüktür. Ancak uçucu kül içeren betonun 56 günlük rölatif basınç dayanımı uçucu kül

içermeyen betonun 56 günlük rölatif basınç dayanımından daha yüksektir. C35/45 sınıfı beton sonuçlarında ise yine aynı şekilde uçucu kül içeren ve uçucu kül içermeyen betonların rölatif basınç dayanımı sonuçlarının şahit betonun rölatif basınç dayanımı sonuçlarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Uçucu kül içeren betonların 3, 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonların 3, 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha düşüktür. Ancak uçucu kül içeren betonların 56 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonların 56 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha yüksektir.

Yarmada çekme dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde ise C20/25 sınıfı betonlarda hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen betonlarda yarmada çekme dayanımlarının şahit betonun yarmada çekme dayanımından daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. C25/30 sınıfı betonlarda uçucu kül içeren betonların ve uçucu kül içermeyen betonların yarmada çekme dayanımlarının şahit betonun yarmada çekme dayanımına oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca uçucu kül içeren betonların yarmada çekme dayanımının uçucu kül içermeyen betonların yarmada çekme dayanımına göre daha yüksek olduğu da açıkça görülmektedir. C30/37 ve C35/45 sınıfı betonlarda da C25/30 sınıfı betonlarda elde edilen sonuçlardaki davranışa benzer bir durum gözlenmiştir. Rölatif yarmada çekme dayanımı sonuçları irdelendiğinde C20/25 sınıfı betonlar için hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen betonlarda rölatif yarmada çekme dayanımlarının şahit betonun rölatif yarmada çekme dayanımlarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Uçucu kül içermeyen betonların rölatif çekme dayanımları uçucu kül içeren betonların rölatif çekme dayanımlarından daha yüksektir. C25/30 sınıfı betonlarda durum daha farklı gözlenmiştir. Hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen betonlarda rölatif yarmada çekme dayanımları şahit betonun yarmada çekme dayanımlarından daha yüksektir. Uçucu kül içeren betonların rölatif yarmada çekme dayanımları uçucu kül içermeyen betonların rölatif yarmada çekme dayanımlarından daha yüksektir. C30/37 ve C35/45 sınıfı betonlarda da benzer davranış gözlenmiştir.

Donma-çözünme direnci tayini deneyi sonuçlarına bakıldığında farklı beton sınıflarında üretilen numunelerin donma-çözünme direnci deneyi sonucundaki ağırlık kaybı değişimlerinin her bir beton sınıfı için şahit betonun donma-çözünme direnci deneyi sonucundaki ağırlık kaybı değişimlerinden daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu da beklenen bir sonuçtur. Çünkü uçucu kül kullanımı dayanıklılığı artırmaktadır. Uçucu kül kullanılan betonların donma-çözünme direnci tayini deneyi sonucundaki ağırlık kaybı değişimleri uçucu

kül kullanılmayan betonların donma-çözünme direnci tayini deneyi sonucundaki ağırlık kaybı değişimlerinden daha düşüktür. Bu da beklenen bir durumdur. Sonuç olarak uçucu kül kullanımı donma-çözünme direncini artırmıştır. Rölatif ağırlık kaybı değişimi sonuçları incelendiğinde her bir beton sınıfı için uçucu kül içeren ve uçucu kül içermeyen betonların rölatif ağırlık kaybı değişimlerinin şahit betonun rölatif ağırlık kaybı değişiminden daha düşük olduğu görülmektedir. Aynı zamanda uçucu kül içermeyen betonların rölatif ağırlık kaybı değişimleri uçucu kül içeren betonların rölatif ağırlık kaybı değişimlerinden daha yüksektir.

## 6. GENEL SONUÇLAR

Bu deneysel çalışma neticesinde elde edilen genel sonuçlar aşağıda sunulmuştur;

- C20/25 sınıfı betonlarda uçucu kül kullanımı 3, 7 ve 56 günlük basınç dayanımlarını şahite oranla artırmış, ancak 28 günlük basınç dayanımını azaltmıştır. Uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük basınç dayanımı şahit betonun 3 günlük basınç dayanımından daha düşüktür.
- C25/30 sınıfı betonlarda uçucu kül kullanılan betonların en yüksek basınç dayanımının 56. günde elde edildiği gözlenmiştir. Uçucu külün ileri ki basınç dayanımlarını artırdığı gerçeği de burada doğrulanmıştır.
- C30/37 ve C35/45 sınıfı betonlarda erken dayanım sonuçlarına bakıldığında uçucu külün erken dayanımları artırmadığı ileri ki dayanımları artırdığı görülmüştür.
- Tüm beton sınıfları için uçucu kül kullanımı yarmada çekme dayanımlarını artırmıştır.
- Farklı dayanım sınıflarındaki betonlarda uçucu kül kullanımı donma-çözünme direncini artırmıştır.

## 7. TEŞEKKÜR

Bu makaledeki tüm deneysel çalışma sonuçları ve değerlendirmeler, danışmanlığını Dr. Öğretim Üyesi Kadir KILINÇ'ın yaptığı İlker Tulga'nın sona ermiş olan yüksek lisans tez kapsamında yer almaktadır. Bu deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde ilgi ve



yardımlarını esirgemeyen Sayın Rektörümüz Prof. Dr. Bülent ŞENGÖRÜR'e, Üniversitemiz Genel Sekreteri Sayın Ergün ERBAY'a ve May Beton Kalite Şefi Oğuz TOSUN'a teşekkürlerimizi sunarız.

## 8. KAYNAKLAR

- [1] Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (2006). Concrete Microstructure, Properties, and Materials, Third Edition, McGraw-Hill.
- [2] Newman, J., Choo, B.S. (2003). Advanced Concrete Technology Processes, Butterworth-Heinemann, An Imprint of Elsevier, UK.
- [3] Mindess, S., Young, J.F. (1981). Concrete, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- [4] TS EN 206:2013+A1 (2017). Beton-Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standardları Enstitüsü, Ocak, Ankara.
- [5] Mamlouk, M.S., Zaniewski, J.P. (1999). Materials for Civil and Construction Engineers, Addison-Wesley, An Imprint of Addison Wesley Longman, Inc.
- [6] TS EN 934-2+A1 (2013). Kimyasal Katkılar-Beton, Harç ve Şerbet İçin-Bölüm 2: Beton Kimyasal Katkıları-Tarifler, Gereklere, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme, Türk Standardları Enstitüsü, Nisan, Ankara.
- [7] TS EN 450-1 (2015). Uçucu Kül-Betonda Kullanılan-Bölüm 1: Tarif, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standardları Enstitüsü, Mart, Ankara.
- [8] TS 802 (2016). Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları, Türk Standardları Enstitüsü, Mart, Ankara.
- [9] TS EN 12390-3 (2010). Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ocak, Ankara.
- [10] ASTM C618-17a (2017). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International.
- [11] ASTM C666/C666M-15 (2015). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, ASTM International.