



**STANDART BAŞLIKLAMA YÖNTEMLERİNİN FARKLI
ORTAMLARDA KÜR EDİLMİŞ SİLİNDİR BETON
ÖRNEKLERİN BASINÇ DAYANIMI VE KIRILMA
BİÇİMLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

Hamza ÇİNAR

**Danışman: Prof. Dr. Remzi ŞAHİN
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2022**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**STANDART BAŞLIKLAMA YÖNTEMLERİNİN FARKLI ORTAMLARDA KÜR
EDİLMİŞ SİLİNDİR BETON ÖRNEKLERİN BASINÇ DAYANIMI VE KIRILMA
BİÇİMLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

(Comparison of the Effects of Standard Capping Methods on the Compressive Strength and
Fracture Forms of Cylinder Concrete Samples Cured in Different Environments)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hamza ÇİNAR

Danışman: Prof. Dr. Remzi ŞAHİN

Erzurum

Mart, 2022



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

STANDART BAŞLIKLAMA YÖNTEMLERİNİN FARKLI ORTAMLARDA KÜR
EDİLMİŞ SİLİNDİR BETON ÖRNEKLERİN BASINÇ DAYANIMI VE KIRILMA
BİÇİMLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Prof. Dr. Remzi ŞAHİN danışmanlığında, Hamza ÇİNAR tarafından hazırlanan bu çalışma, 17/03/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Malzemeleri Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Doç. Dr. Nusret BOZKURT <i>Bitlis Eren Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Remzi ŞAHİN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Meral OLTULU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Remzi ŞAHİN danışmanlığında sunulan “Standart Başlıklama Yöntemlerinin Farklı Ortamlarda Kür Edilmiş Silindir Beton Örneklerin Basınç Dayanımı ve Kırılma Biçimleri Üzerindeki Etkilerinin Karşılaştırılması” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	6	30
Kuramsal Temeller	5	30
Materyal ve Yöntem	8	35
Bulgular	3	20
Tartışma	0	20
Tezin Geneli	12	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Hamza ÇİNAR	Prof. Dr. Remzi ŞAHİN
17.3.2022	17.3.2022
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının her aşamasında kendisine ne zaman danışsam kıymetli zamanını, bilgisini ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Remzi ŞAHİN'e,

Kıymetli zamanlarını ayırarak laboratuvar çalışmaları esnasında yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım; Sedat LALOĞLU, Furkan GÖKBAŞI, Zeynep ŞAHİN ve Emine Hazal POLAT'a,

Çimento temininde yardımcı olan AŞKALE Çimento Fabrikasına (Van) ve Arkoz Madencilğe (Ağrı), agregaların temininde yardımcı olan BALSOY BETON (Erzurum) ve Kalsiyum Alüminat Çimentosunun temininde yardımcı olan ÇİMSA Çimento Fabrikasına (Mersin),

Laboratuvar çalışmam boyunca sağlamış olduğu olanaklardan dolayı Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne,

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli aileme,

Sonsuz teşekkür ederim.

Hamza ÇİNAR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

STANDART BAŞLIKLAMA YÖNTEMLERİNİN FARKLI ORTAMLARDA KÜR EDİLMİŞ SİLİNDİR BETON ÖRNEKLERİN BASINÇ DAYANIMI VE KIRILMA BİÇİMLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Hamza ÇİNAR

Danışman: Prof. Dr. Remzi ŞAHİN

Amaç: TS EN 12390-3 (2019)'da önerilen dört başlıklama yöntemi ile uygulamada sıkça başvurulanan iki yöntemin farklı koşullarda saklanan beton silindir örneklerin basınç dayanımları üzerindeki etkilerini mukayeseli olarak incelemektir.

Yöntem: Aynı karışım hesabına sahip betonlar üretildi. Başlıklama çeşidi olarak öğütme (G), kalsiyum alüminatlı çimento harcı (CM), kükürt + silis kumu (SSM), kum kutusu (SB), kükürt (S) ve kesme (C) yöntemleri seçildi. Kür ortamları ise hava kürü, nem kürü, deney başlangıcından 24 saat önce (su kürü I) ve 10 saatten kısa (su kürü II) sürede numuneyi su kürü havuzundan çıkarma olarak belirlendi. Her bir kür koşulu için 14 adet silindir ($\varnothing 100 \times 200$ mm) ve 2 adet küp ($150 \times 150 \times 150$ mm) numune üretildi. Birim ağırlık, çökme, eksenel basınç ve ultrases geçiş hızı (UPV) deneyleri yapıldı. Başlıklama malzemelerinin dayanım gelişimleri belirlendi ve numunelerin kırılma biçimleri gözlemlendi. Öğütme işlemi, zımpara makinesi kullanılarak el ile (manuel öğütme) yapıldı.

Bulgular: Başlıklama malzemesinin dayanımı en yüksek (35 MPa) olan SSM, başlıklama süresi en kısa (7-8 dk.) olanlar ise C, S ve SSM'dir. Havada kür edilenlere oranla nem, su kürü I ve su kürü II'de kür edilmiş betonların UPV değerleri, sırasıyla, %10,2, %12,7 ve %18,8 oranlarında artmıştır. Başlıklamadan sonra UPV değerleri genelde artmıştır. En fazla (%100) UPV artışı havada kür edilmiş örneklerin S ile başlıklanması sonucu elde edilmiştir. Başlıksız betonların dayanımına oranla tüm kür ortamlarında, manuel öğütme hariç, başlıklama işlemi örneklerin dayanımlarını arttırmıştır. En yüksek dayanım artışı nem küründe görülmüştür. SB yöntemi ile başlıklanan silindirlerin %50'sinin kırılma biçimi tatmin edici iken diğer başlıklama yöntemlerinin kırılma biçimleri genelde tatmin edici değildi.

Sonuç: Manuel öğütmenin basınç dayanımlarını genelde düşürdüğü belirlendiğinden özel otomatik öğütme cihazları ile betonların aşındırılması önerildi. Numunelerin kırılma biçimi üzerinde başlık şeklinin önemli etkisinin olduğu gözlemlendi. Başlıklama performansı en yüksek SB, sonra C bulundu. Bulgular, araştırma hipotezini doğruladı.

Anahtar Kelimeler: beton, başlıklama yöntemi, kür koşulu, basınç dayanımı, TS EN 12390-3, kırılma biçimi

Mart 2022, 132 Sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

COMPARISON OF THE EFFECTS OF STANDARD HEADING METHODS ON THE COMPRESSIVE STRENGTH AND FRACTURE FORMS OF CURED CYLINDER CONCRETE SAMPLES IN DIFFERENT MEDIA

Hamza ÇİNAR

Advisor: Prof. Dr. Remzi ŞAHİN

Purpose: The aim is to compare the effects of the four capping methods recommended in TS EN 12390-3 (2019) and the two methods frequently used in construction practice on the compressive strength of concrete cylinder samples stored in different curing conditions.

Method: Concretes with the same mix design were produced. Grinding (G), calcium aluminate cement mortar (CM), sulfur + silica sand (SSM), sandbox (SB), sulfur (S) and cutting (C) methods were selected as the capping. Curing conditions were determined as air curing, moisture curing, removing the sample from the water curing 24 hours before the start of the experiment (water cure I) and less than 10 hours (water cure II). For each curing condition, 14 cylinders (Ø100×200 mm) and 2 cubes (150×150×150 mm) samples were produced. Unit weight, slump, axial compression and ultrasound pulse velocity (UPV) tests were performed. The strength developments of the capping materials were determined and the failures patterns of the samples were observed. G was done manually (manual grinding) using a sanding machine.

Findings: The capping material of SSM had the highest compressive strength (35 MPa). Those with the shortest capping time (7-8 min.) were C, S and SSM. Compared to those cured in air, the UPV values of concretes cured to moisture, water cure I and water cure II increased by 10.2%, 12.7% and 18.8%, respectively. UPV values generally increased after capping. The maximum (100%) UPV increase was obtained by capping the air-cured samples with S. Compared to the strength of uncapped concrete, capping increased the strength of the samples in all curing conditions, except for manual grinding. The highest increase in strength was observed in the moisture cure. While 50% of the cylinders capped with the SB were satisfactory, the failure patterns of the samples with other capping methods were generally unsatisfactory.

Results: Since it was determined that manual grinding generally reduces the compressive strength, it was recommended to grind the concrete with automatic grinding devices. It was observed that the type of the capping had a significant effect on the failure pattern of the samples. The capping performance was the highest SB, then C. The findings confirmed the research hypothesis.

Keywords: concrete, capping, curing condition, compressive strength, TS EN 12390-3, failure pattern

March 2022, 132 pages

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xiii
GİRİŞ.....	1
Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
Araştırmanın Hipotezi	4
KURUMSAL TEMELLER.....	5
Betonun Basınç Dayanımına Etki Eden Faktörler	5
Çimento ile ilgili faktörler.....	6
Su/Çimento oranı ile ilgili faktörler	7
Agrega ile ilgili faktörler.....	8
Sıkıştırma düzeyinin etkisi	9
Deney yaşının etkisi	9
Deney ortamının sıcaklığının etkisi	9
Numunenin nem içeriğinin etkisi	10
Kür koşullarının etkisi.....	10
Numunenin boyutu ve biçiminin etkisi	11
Yükleme hızının etkisi	12
Kalıplanma ve yükleme doğrultusunun etkisi.....	13
Numune ile basınç tablası arasındaki temasın etkisi.....	13
Yükleme bloğu ve eksantrisitenin basınç dayanımına etkisi	13
Cidar etkisi	14
Kompasitenin etkisi.....	15
Katkı maddelerinin etkisi	15
Numune uç yüzeyinin hazırlanma şeklinin etkisi	15
Kalıp tipinin etkisi.....	16
Karma suyunun kalitesinin etkisi	16

Geçmişten Günümüze Beton Numuneleri Başlıklama Yöntemleri	16
Silindir Numunelerin Başlıklanmasında Kullanılan Yöntemler	24
Bağlanmış başlıklama yöntemleri	24
Bağlanmamış başlıklama yöntemleri	29
Mekanik aşındırma sistemleri ile başlıklama yöntemleri.....	33
Basınç Dayanımı Testinde Beton Örneklerinde Görülen Kırılma Şekilleri.....	35
MATERYAL ve METOD	40
Çimento	40
Agrega	41
Süper Akışkanlaştırıcı (SA)	41
Silis kumu	42
Kükürt	42
Parafin	42
Metot	43
Numune sayısı, parametreler ve kodlama	43
Agrega deneyleri	44
Beton karışım hesapları, ön deneyler ve numunelerin üretimi	44
Taze beton deneyleri	47
Numuneleri başlıklama yöntemleri	49
Sertleşmiş beton deneyleri	56
ARAŞTIRMA BULGULARI ve DEĞERLENDİRME.....	59
Elek Analizi Sonuçları ve Granülometri Eğrisi	59
Taze Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi	60
Birim ağırlık deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi	60
Çökme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi.....	61
Başlıklama İşlemlerinde Karşılaşılan Sorunlar.....	61
Manuel öğütme ile başlıklama	61
Elmas testere ile keserek başlıklama.....	62
Kükürt ile başlıklama	63
Kükürt + silis kumu ile başlıklama	63
Kum kutusu ile başlıklama.....	64
Kalsiyum alüminat çimentosu ile başlıklama	64
Başlıklama Sürelerinin Değerlendirilmesi	64
Sertleşmiş Beton Deneyleri Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	68
Ultrasonik Dalga Hızı (UPV) Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	69

Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları ve Değerlendirmeler	75
Kırılma Biçimlerinin Değerlendirilmesi	85
Başlıklama yöntemlerinin kırılma biçimine etkisi	85
Kür yöntemlerinin kırılma biçimine etkisi	96
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	108
KAYNAKÇA	112
ÖZGEÇMİŞ	117



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Bazı Faktörlerin Basınç Dayanımı Değişikliğine Etkisi	5
Tablo 2. Alçı, Saf Kükürt, Neopren Ped Başlıklarının Karşılaştırması	27
Tablo 3. Neopren Ped Kullanımı İçin Gereksinimler	30
Tablo 4. CEM II/A-LL 42,5 R ve Kalsiyum Alüminat Çimentosu Özellikleri	40
Tablo 5. Süper Akışkanlaştırıcı Teknik Özellikleri	41
Tablo 6. Parametreler, Seviyeleri ve Kodlama	44
Tablo 7. Ön Deneme Karışımları ve Gözlemler	45
Tablo 8. Ana Deneyler İçin Kullanılan Karışım Oranları	46
Tablo 9. Numunelere Uygulanan Kür Süreleri ve Yöntemleri	48
Tablo 10. Kür Ortamlarının Sıcaklık ve Nem Değerleri	48
Tablo 11. Elek Analizi Sonuçları	59
Tablo 12. Taze Beton Birim Ağırlık ve Çökme Deneyi Sonuçları	60
Tablo 13. Başlık Çeşidine Göre Başlıklama Süreleri	65
Tablo 14. Başlıklama ve Basınç Dayanımı Deneyine Kadar Geçen Süreler	66
Tablo 15. Başlıklama Yönteminde Göre Başlık Kalınlıkları	67
Tablo 16. Başlık Malzemelerinin Basınç Dayanımı Sonuçları	68
Tablo 17. Başlıklama Öncesi ve Sonrasına Ait UPV Verileri	69
Tablo 18. Ultra Ses Hızı ve Beton Kalitesi İlişkisi	73
Tablo 19. Farklı Kür Koşullarında Elde Edilen Ultrases Hızı Değerleri	73
Tablo 20. Başlıklanan Silindir Örneklerin UPV Değerlerinde Ölçülen Değişim (%)	74
Tablo 21. Basınç Dayanım Sonuçları ve Silindir/Küp ile Silindir/Başlıksız Oranları	75
Tablo 22. Başlıksız Örneklerin Dayanımına Oranla Başlıklananların Dayanımındaki Değişim (%)	78
Tablo 23. Havada Kür Edilmiş Örneklerin Basınç Dayanımlarına Oranla Diğer Kür Ortamlarında Saklanan Numunelerin Dayanımlarındaki Değişim (%)	79
Tablo 24. Başlıklama Yöntemi ve Kür Koşuluna Göre Ortalama Basınç Dayanımı Sıralaması	84
Tablo 25. TS EN 12390-3'e (Anonim 2019a) Göre Numunelerde Görülen Kırılma Şekilleri	107

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Küp ve silindir numunelerin basınç dayanımı etki alanları.	36
Şekil 2. Küp ve silindir numunelerde kırılma şekilleri a, b ve c	36
Şekil 3. Silindir numunelerde normal kırılmalar	37
Şekil 4. Küp numunelerde tatmin edici kırılma şekilleri.....	37
Şekil 5. Küp numunelerde tatmin edici olmayan bazı kırılma şekilleri (T = Çekme gerilmesi nedeniyle oluşan çatlak).....	38
Şekil 6. Silindir numunelerde tatmin edici kırılma şekilleri.	38
Şekil 7. Silindir numunelerde tatmin edici olmayan bazı kırılma şekilleri	39
Şekil 8. Numune üretiminde kullanılan malzemeler.	41
Şekil 9. Silis kumu (a: elenmemiş, b: 250 µm elekten geçen 125 µm elek üzerinde kalan)....	42
Şekil 10. Kükürt ve kükürtlü karışım (a: Kükürt ve b: Kükürt + Silis Kumu).....	42
Şekil 11. Başlıklamada kullanılan parafin.....	43
Şekil 12. Beton üretiminde kullanılan mikser	46
Şekil 13. Taze betonda çökme miktarı ölçümü	47
Şekil 14. Suda ve havada bekletilen numunelerin basınç dayanımı gelişimi.....	48
Şekil 15. Hava kürü (a:3 günlük nem kürü, b:laborauvar ortamı).	49
Şekil 16. Nem kürü (a ve b: ıslak telis bezi içindeki örnekler, c: sıcaklık ve nem ölçümü). ...	49
Şekil 17. Kür havuzunda saklanan numunelere ait fotoğraflar.	49
Şekil 18. Başlıksız numunelere ait fotoğraf	50
Şekil 19. Manuel öğütme yöntemine ait fotoğraflar.....	51
Şekil 20. Elmas testere ile kesme yöntemine ait fotoğraflar.	52
Şekil 21. Kükürt yöntemi ile başlıklamaya ait fotoğraflar.	53
Şekil 22. Kükürt + silis kumu yöntemi ile başlıklamaya ait fotoğraflar.	54
Şekil 23. Kum kutusu ile başlıklama yöntemine ait fotoğraflar.....	55
Şekil 24. Kalsiyum Alüminat Çimentosu yöntemi ile başlıklamaya ait fotoğraflar.	56
Şekil 25. UPV cihazına ait fotoğraflar (a: üretici firmadan alınan, b:deney esnasından alınan).....	57
Şekil 26. Beton presine ait fotoğraf.....	57
Şekil 27. Başlık malzemelerinin basınç dayanımlarının belirlenmesi için üretilen numuneler ve pres (a: kükürt, b: kükürt + silis kumu, c: kalsiyum alüminatlı çimento harcı, d: deformasyon kontrollü pres)	58
Şekil 28. D=16 mm için standart eğriler ve karışımının granülometri eğrisi.....	59
Şekil 29. Farklı kür ortamları için üretilen betonların birim ağırlıkları.	60

Şekil 30. Farklı kür ortamında üretilen numunelerde çökme değerleri.....	61
Şekil 31. Manuel öğütme yöntemi ile başlıklamada düzlük kontrolü.....	62
Şekil 32. Testere ile kesim sonucu numuneden parça kopması.	63
Şekil 33. Kalsiyum alüminatlı çimento başlığının numuneden ayrılması.....	64
Şekil 34. Başlıklama yöntemine göre ortalama başlıklama süreleri.	65
Şekil 35. Başlıklama ve basınç dayanımına kadar geçen toplam bekleme süresi.....	66
Şekil 36. Hava kürü numunelerinin başlıklamadan önce ve sonra ölçülen UPV.....	71
Şekil 37. Ortalama basınç dayanımlarının kür ortamı ve başlıklama yöntemine göre değişimi.....	77
Şekil 38. Başlıksız ve başlıklı numunelerin dayanım oranının başlıklama yöntemi ve kür ortamına göre değişimi.....	81
Şekil 39. Silindir ve küp örneklerin basınç dayanımları oranının başlıklama yöntemi ve kür ortamına göre değişimi.....	82
Şekil 40. A-WC-1 (a ve b) ve A-WC-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli	85
Şekil 41. A-G-1 (a ve b) ve A-G-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli	86
Şekil 42. A-C-1 (a ve b) ve A-C-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli	86
Şekil 43. A-SB-1 (a ve b) ve A-SB-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.....	86
Şekil 44. A-S-1 (a ve b) ve A-S-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.....	87
Şekil 45. A-SSM-1 (a ve b) ve A-SSM-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli	87
Şekil 47. H-WC-1 (a ve b) ve H-WC-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli	88
Şekil 48. H-G-1 (a ve b) ve H-G-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli	88
Şekil 49. H-C-1 (a ve b) ve H-C-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli	89
Şekil 50. H-SB-1 (a ve b) ve H-SB-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.....	89
Şekil 51. H-S-1 (a ve b) ve H-S-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.....	90
Şekil 52. H-SSM-1 (a ve b) ve H-SSM-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli	90
Şekil 53. H-CM-1 (a ve b) ve H-CM-2(c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.....	90
Şekil 54. WI-WC-1 (a ve b) ve WI-WC-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.....	91
Şekil 55. WI-G-1 (a ve b) ve WI-G-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli	91
Şekil 56. WI-C-1 (a ve b) ve WI-C-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.....	92
Şekil 57. WI-SB-1 (a ve b) ve WI-SB-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli	92
Şekil 58. WI-S-1 (a ve b) ve WI-S-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli	92
Şekil 59. WI-SSM-1 (a ve b) ve WI-SSM-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.....	93
Şekil 60. WI-CM-1 (a ve b) ve WI-CM-2(c ve d) numunelerine ait kırılma şekli	93
Şekil 61. WII-WC-1 (a ve b) ve WII-WC-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli	94
Şekil 62. WII-G-1 (a ve b) ve WII-G-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli	94

Şekil 63. WII-C-1 (a ve b) ve WII-C-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli	94
Şekil 64. WII-SB-1 (a ve b) ve WII-SB-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli	95
Şekil 65. WII-S-1 (a ve b) ve WII-S-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.....	95
Şekil 66. WII-SSM-1 (a ve b) ve WII-SSM-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli	95
Şekil 67. WII-CM-1 (a ve b) ve WII-CM-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.....	96
Şekil 68. A-R-1 (a ve b), A-R-2 (c ve d), H-R-1 (e ve f), H-R-2 (g ve h), WI-R-1 (ı ve i), WI-R-2 (j ve k), WII-R-1 (l ve m) ve WII-R-2 (n ve o) numunelerine ait kırılma şekilleri (Aynı kodlu numunelerden sağdaki, soldakinin çatlaklarının kalemle belirginleştirilmiş halidir)	97
Şekil 69. A-WC-1 (a ve b), A-WC-2 (c ve d), H-WC-1 (e ve f), H-WC-2(g ve h), WI-WC-1 (ı ve i), WI-WC-2 (j ve k), WII-WC-1 (l ve m) ve WII-WC-2 (n ve o) numunelerine ait kırılma şekilleri (Aynı kodlu numunelerden sağdaki, soldakinin çatlaklarının kalemle belirginleştirilmiş halidir).	98
Şekil 70. A-G-1 (a ve b), A-G-2 (c ve d), H-G-1 (e ve f), H-G-2 (g ve h), WI-G-1 (ı ve i), WI-G-2 (j ve k), WII-G-1 (l ve m) ve WII-G-2 (n ve o) numunelerine ait kırılma şekilleri	99
Şekil 71. A-C-1 (a ve b), A-C-2 (c ve d), H-C-1 (e ve f), H-C-2 (g ve h), WI-C-1 (ı ve i), WI-C-2 (j ve k), WII-C-1 (l ve m) ve WII-C-2 (n ve o) numunelerine ait kırılma şekilleri	101
Şekil 72. A-SB-1 (a ve b), A-SB-2 (c ve d), H-SB-1 (e ve f), H-SB-2 (g ve h), WI-SB-1 (ı ve i), WI-SB-2 (j ve k), WII-SB-1 (l ve m) ve WII-SB-2 (n ve o) numunelerine ait kırılma şekilleri.	102
Şekil 73. A-S-1 (a ve b), A-S-2 (c ve d), H-S-1 (e ve f), H-S-2 (g ve h), WI-S-1 (ı ve i), WI-S-2 (j ve k), WII-S-1 (l ve m) ve WII-S-2 (n ve o) numunelerine ait kırılma şekilleri	104
Şekil 74. A-SSM-1 (a ve b), A-SSM-2 (c ve d), H-SSM-1 (e ve f), H-SSM-2 (g ve h), WI-SSM-1 (ı ve i), WI-SSM-2 (j ve k), WII-SSM-1 (l ve m) ve WII-SSM-2 (n ve o) numunelerine ait kırılma şekilleri.....	105
Şekil 75. A-CM-1 (a ve b), A-CM-2 (c ve d), H-CM-1 (e ve f), H-CM-2 (g ve h), WI-CM-1 (ı ve i), WI-CM-2 (j ve k), WII-CM-1 (l ve m) ve WII-CM-2 (n ve o) numunelerine ait kırılma şekli	106

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

μs	: Mikrosaniye
AASHO	: American Association of State Highway Officials
ASTM	: American Society For Testing and Materials
C₂S	: Dikalsiyum Silikat
C₃A	: Trikalsiyum Alüminat
C₃S	: Trikalsiyum Silikat
C₄AF	: Tetrakalsiyum Alüminoferrit
L_ö	: Başlıklamadan Önce Numune Boy Ortalaması
L_s	: Başlıklamadan Sonra Numune Boy Ortalaması
PÇ	: Portland Çimentosu
S/Ç	: Su/Çimento Oranı
SA	: Süper Akışkanlaştırıcı
T_ö	: Başlıklamadan Önce Dalga Geçiş Süresi
T_s	: Başlıklamadan Sonra Dalga Geçiş Süresi
UPV	: Ultrasonik Dalga Hızı Deneyi
V	: Ultrases Dalga Hızı
δ	: Özgül Ağırlık

GİRİŞ

Betonun sahip olduğu mekanik özelliklerinden en önemli ve belirleyici olanı basınç dayanımıdır. Diğer mekanik özellikleri doğrudan etkilemesi, belirlenmesinin diğer dayanım türlerine göre daha kolay olması, taşıma gücü ve beton kesit alanlarının hesaplarında önemli parametrelerden biri olması ve beton sınıflarının oluşturulmasında temel parametre olarak alınması gibi nedenler bu özelliğin öne çıkmasını sağlamıştır (Çankaya vd 2013).

Betonun basınç dayanımı, yapıda kullanılacak olan betonun kalitesi hakkında fikir vermektedir. Betonarmede taşıma gücünün hesaplanmasında kullanılan en önemli parametrelerden biridir. Bu yüzden taze betondan farklı boyutlarda küp ve silindir beton numuneler kullanılarak beton basınç dayanımı belirlenmektedir (Baylavlı ve Gödek 2019).

Betonun basınç dayanımı, bileşenlerin türü ve oranları ile ilgili esaslara uyularak saptansa da bileşimin dışında da bir takım faktörlerin etkisi altında bulunmaktadır (Türkel 2006). Beton karmaşık bir yapı malzemesi olduğundan basınç dayanımı; çimento, agrega, s/ç oranı, sıcaklık, nem, numune boyutu, yükleme hızı, katkı maddeleri, kür koşulları ve numune uç yüzeyinin hazırlanma şekli gibi birçok faktörden önemli ölçüde etkilenmektedir (İstanbuluoğlu 1988; Çankaya vd 2013; Ararat 2015).

Üretiminden hemen sonra betona yeterli bakım yapıldığında betonun, servis ömrü boyunca mukavemetinin arttığı belirtilmiştir. Bazı araştırmalarda taze betonun ilk 7 gün içerisinde küre tabi tutulmaz ise basınç dayanımının %50'ye kadar düşebildiği belirtilmiştir (Binici 2000).

Tezin ilerleyen kısımlarında 'Geçmişten günümüze beton başlıklama yöntemleri' başlığı altında da belirtildiği üzere beton numunelerin basınç dayanımı, silindir formdaki numunelerin kullanılması ile belirlenirken numuneye uygulanan yükün numune yüzeyine eşit ve homojen dağılmasını sağlamak için numunelerin özellikle üst (perdah) yüzeyleri farklı malzeme ve yöntemler kullanılarak başlıklanmaktadır. Bu yöntemleri; bağlanmış (bağ yapan) başlıklama yöntemleri (kükürt, күкүрт bileşigi, çimento hamuru, çimento harcı, alçı vb.), bağlanmamış (bağ yapmayan) başlıklama yöntemleri (neopren ped, kum kutusu vb.) ve mekanik aşınma yöntemleri (öğütme ve elmas testere ile kesme) olarak üç farklı kategoride toplamak mümkündür. Baylavlı ve Gödek (2019), 1980'li yıllardan günümüze kadar özellikle laboratuvarlarda en çok tercih edilen başlıklama yönteminin күкүрт + grafit tozu

karışımı olduğu ve bu başlıklama yönteminin tercih nedenin çok hızlı bir şekilde sertleşerek yeterli basınç mukavemetine ulaşmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Silindir beton örneklerini başlıklama yönteminin betonun basınç dayanımı üzerindeki etkileri bir takım araştırmalara konu olmuştur. Ancak, uygulama kolaylığı ve ekonomiklik gibi kriterler de göz önünde bulundurularak yapılan bu karşılaştırmalı çalışmalarda birbirinden farklı sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin, Park and Suh (2008) tarafından yapılan bir çalışmada kum, neopren ve kükürt ile başlıklama yöntemleri karşılaştırılmış, kum ile başlıklama yönteminin hem düşük hem de yüksek dayanımlı beton numunelerin basınç dayanımını belirlemede diğer yöntemlere göre daha güvenilir olduğu belirtilmiştir. Chowhury *et al.* (2013) tarafından yapılan çalışmada ise Ø150×300 mm silindir numunelerde kükürt başlıklama yönteminin, kum başlıklama yönteminden 7 günlük dayanım sonuçlarında %34, 28 günlük dayanım sonuçlarında %19 oranında daha yüksek dayanım sonuçları verdiği belirtilmiştir. (Bu oranlar Ø100×200 mm boyutlarındaki silindir numunelerde ise 7 günlükler için %29, 28 günlükler için %17'dir.) Eggers and Torres (2006) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise öğütme ile başlıklama yöntemi ve neopren ped ile başlıklama yöntemi karşılaştırılmıştır. 55 MPa'lık dayanıma sahip beton numunelerde öğütme ile başlıklamanın, neopren ped ile başlıklamadan önemli derecede daha düşük, 80 MPa'lık dayanıma sahip beton numunelerde ise öğütme ile başlıklama yönteminin, neopren ped ile başlıklama yönteminden daha yüksek dayanımlar verdiği belirtilmiştir. Yine, Dumitru *et al.* (2014) tarafından yapılan bir çalışmada; 45 MPa dayanım sınıfına sahip silindir numunelerde kükürt başlıklama ve öğütme ile başlıklama yöntemlerinin hemen hemen aynı, yüksek dayanımlı betonlarda ise öğütme ile başlıklama yönteminin kükürt başlıklama yönteminden % 1-3 arasında daha yüksek dayanım değerleri verdiği belirtilmiştir. Aynı çalışmada kükürt ile başlıklanan örneklerin basınç dayanımları kauçuk ped ile başlıklanan numunelerden C60 sınıfındaki betonlarda %2, C110 dayanım sınıfında ise % 7 oranında yüksek çıktığı rapor edilmiştir.

Yukarıda özetlenen birkaç çalışmadan da anlaşılacağı üzere literatürde yaş, numune boyutu, dayanım değeri gibi faktörlere de bağlı olarak başlıklama yönteminin betonun basınç dayanımı üzerinde belirleyici bir etkisi olduğuna dair bulgular söz konusudur. Literatüre katkı sağlamasının yanında hem araştırmacılar hem de uygulamacılar bakımından önem arz ettiği de göz önünde bulundurularak konunun yeniden ve ayrıntılı bir şekilde ele alınmasının gerekli olduğu değerlendirilmiştir.

TS EN 12390-3: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini (Anonim 2019a) standardında silindir numune başlıklama

yöntemleri; öğütme (grinding), kalsiyum alüminatlı çimento harcı (calcium aluminate cement mortar), kükürt karışımı (sulfur mixture) ve kum kutusu (sand box) olarak belirtilmiştir. Bu yöntemlerden öğütme ve kum kutusunun tüm beton sınıfları için uygulanabileceği belirtilmiş iken diğer iki yöntemin ise yaklaşık 50 MPa dayanıma kadar olan betonlar için uygun olduğu bildirilmiştir. Söz konusu standartta bu “(beklenen) ölçülen dayanıma dayalı kısıtlama” dan başka bir sınırlama söz konusu değildir. Bu durum; nerede, hangi başlıklama yöntemin, niçin tercih edilmesi gerektiğine dair soruları da beraberinde getirmektedir. Bu çalışmanın temel amacı, TS EN 12390-3’de belirtilen başlıklama yöntemlerinin silindir örneklerin basınç dayanımı üzerindeki etkisini mukayeseli olarak inceleyerek ortaya net sonuçlar koymak suretiyle araştırmacı ve uygulamacılara yol göstermektir.

Kür ortamının sertleşen ve sertleşmiş betonların performansı üzerindeki etkisi beton teknolojisinde iyi bilinen bir husustur. Bu çalışmanın amaçlarından biri de örneklerin deneye tabi tutulmadan önceki saklama koşullarının (kür ortamı) betonların dayanımları üzerindeki etkisinin başlıklama tipine bağlı olarak nasıl değiştiğinin araştırılmasıdır.

Diğer taraftan, TS EN 12390-3’de (Anonim 2019a) deneyden önceki aşama için “*Kür işleminden çıkarılmasından sonra, numuneler mümkün olan en kısa sürede, ancak 10 saat içinde, dayanım testine tabi tutulmalıdır. ... Numuneler, test tesisinde 4 saatten fazla saklanacaksa, ıslak çuval veya geçirimsiz membran ile kaplanarak nem kaybından korunmalıdır*” denilmektedir. Konuyla ilgili yürürlükten kaldırılmış bir standart olan TS 3068/Mart1978: Laboratuvar da beton deney numunelerinin hazırlanması ve bakımı (Anonim 1978) de ise “*Hazırlanmalarından itibaren ve deney anına kadar numuneler 23°C ± 2°C sıcaklıkta, nemli bir ortamda ve bütün yüzeylerine serbest su bulunacak şekilde bakıma tabi tutulur. Böyle bir ortam numunenin kireçli su içine batırılması veya özel bakım odasında muhafazası ile sağlanabilir*” denilmektedir¹. Bu standardın güncel versiyonu olan TS EN 12390-2: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması (Anonim 2019c)’da ise “*Deney numuneleri, kalıptan çıkartıldıktan sonra, deney anına kadar, ilgili standartta verilen işleme göre, (20 ± 2) °C sıcaklıktaki su içerisinde veya sıcaklığı (20 ± 2) °C ve bağıl nemi ≥% 95 olan kür odasında küre tabi tutulur.*” ifadesi geçmektedir. Görüldüğü gibi yürürlükten kalkmış-güncel (eski-yeni) tüm standartlarda beton örneklerin deney anına kadar kür edilmesi gerektiği belirtilmesine rağmen laboratuvar çalışmalarında bu kuralın zaman zaman göz ardı

¹ Yine TS 3502/Mart 1981: Betonda statik elastisite modülü ve poisson oranı tayini (Anonim 1981) standardında “*Beton deney numuneleri TS 3068’e uygun olarak deneye başlamadan 1 saat önce bakım odasından çıkarılarak başlıklanmalıdır*” denilmek suretiyle net bir şekilde örneklerin deney anına yakın zamana kadar kür edilmesi gerektiği belirtilmiştir.

edilerek bazen 24 saat öncesinden bile örneklerin su kürü havuzundan çıkarılıp laboratuvar ortamında kurumaya bırakıldığına, ondan sonra deneye tabi tutulduğuna rastlanılmaktadır. Bu çalışmanın amaçlarından biri de 10 saatten daha önce (örneğin 24 saat) kür ortamından çıkarılıp kurutmanın örneklerin basınç dayanımı üzerinde etkisi olup olmadığı, varsa, bunun başlıklama şekline bağlı olarak değişip değişmediğini araştırmaktır.

Farklı kür koşullarında saklanan aynı dayanım sınıfındaki silindir beton numunelerin kırılma biçimleri üzerinde standart başlıklama yöntemlerinin etkilerinin araştırılması da çalışmanın bir başka amacını oluşturmaktadır.

Çalışmada 4 farklı kür yöntemi (hava kürü, nem kürü, su kürü I (24 saat önceden sudan çıkarma) ve su kürü II (10 saatten kısa sürede sudan çıkarma) kullanılmıştır. Her bir kür koşulunda saklanan silindir örnekler; (manuel)² öğütme, kalsiyum alüminatlı çimento harcı, kükürt + silis kumu, kum kutusu, kükürt ve elmas testere ile kesme yöntemleriyle başlıklararak basınç dayanımı ve ultrases hızı deneylerine tabi tutulmuştur. İsmi geçen başlıklama yöntemlerinden ilk dördü TS EN 12390-3'de (Anonim 2019a) belirtilen yöntemlerdir. Diğer yöntemlerden kükürt ve elmas testere ile kesme standartta geçmemesine rağmen literatürden bazı yerlerde başvuru başlıklama yöntemlerinden biri olduğu bilgisi edinildiği için çalışmaya dâhil edilmiştir. Elde edilen sonuçlar küp örnekler ve başlıksız silindirik örneklerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Araştırmanın Hipotezi

Çalışmanın hipotezi şudur: Kür ortamına bağlı olarak silindirik beton örneklerin basınç dayanımı ve kırılma biçimi üzerinde başlıklama yönteminin etkisi vardır.

² TS EN 12390-3'de (Anonim 2019a) “manuel” kelimesi geçmemekte olup yöntemin adı yalnızca “öğütme (grinding)” kelimesi ile ifade edilmiştir. Bu amaç için geliştirilmiş olan özel (otomatik) öğütme cihazları temin edilemediğinden bu çalışmada öğütme işlemi el ile yapılmıştır. Bu farklılığı ifade etmek için de “manuel öğütme” teriminin kullanılması tercih edilmiştir.

KURUMSAL TEMELLER

Basınç dayanımı, betonun en çok önemsenen ve araştırılan dayanım türüdür. Bu durum, onun diğer dayanım türlerinin bulunması için uygulanan yöntemlerden daha basit yöntemle belirlenmesi ve yapı tasarımında kullanılmasının yanında betonun diğer özellikleri hakkında bilgi vermesinden kaynaklanmaktadır. Nitekim basınç dayanımı yüksek olan betonun su geçirimsizliğinin düşük, kompazitesinin ise yüksek olduğu söylenebilir. Bu özelliklere sahip olması o betonun dayanıklılığının da yüksek olmasına yol açacaktır (Ararat 2015). Yine, betonun basınç dayanımı ile eğilme, kesme ve çekme dayanımı arasında ilişkiler olduğu belirtilmiştir (Küden 2011; Anonim 2020). Nitekim betonun çekme dayanımı basınç dayanımının yaklaşık %10'u kadardır, bu nedenle de, yapısal hesaplamalarda çekme dayanımı ihmal edilir ve betonun sadece basınca çalışan bir malzeme olduğu kabul edilir (Çankaya vd 2013).

Beton basınç dayanımı standartlarda belirtilen yöntemler doğrultusunda, silindir ve küp beton numuneleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda bulunabilmektedir (Ararat 2015). Betonun basınç dayanımı betonun bileşenleri doğru esaslara uyularak saptansa da bunun dışında birçok değişik faktörün etkisi altında olduğu belirtilmiştir (Türkel 2006). Bu faktörler aşağıdaki başlıkta ele alınmıştır.

Betonun Basınç Dayanımına Etki Eden Faktörler

Binici vd (2000), betonun basınç dayanımına etki eden faktörleri ve etki oranlarını Tablo 1'de gösterildiği gibi olduğunu belirtmiştir. Ancak, literatürde Tablo 1'de belirtilenlere ilaveten başka birçok faktörün de (örneğin su/çimento oranı) betonların basınç dayanımları üzerinde etkisi olduğu rapor edilmiştir. Aşağıdaki alt başlıklarda bu faktörler detaylandırılmıştır.

Tablo 1. Bazı Faktörlerin Basınç Dayanımı Değişikliğine Etkisi (Binici vd 2000)

Faktörler	Faktörün dayanım değişikliğine etkisi (%)
Çimento Türünün Etkisi	10
Granülometrinin Etkisi	11
Beton Üretim Şeklinin Etkisi	21
Betonun Kompaksiyonunun Etkisi	26
Betonun Kürünün Etkisi	32

Çimento ile ilgili faktörler

Çimento, su ile bağlayıcı hamur oluşturarak agrega taneciklerini birbirine bağlamaktadır. Beton için kullanılan agregaların yeterli dayanımda oldukları varsayılır ise, çimento hamurunun agrega tanecikleri arasındaki boşlukları dolduracak yeterlilik ve sağlamlıkta olması beton dayanımı üzerindeki etkisini ortaya koyar (İstanbuluoğlu 1988; Küden 2011). Agrega tanelerini birbirine bağlayan çimento hamurunun mukavemetinin kaybolmasının betonun mukavemetinin de kaybolmasına sebep olacağı belirtilmiştir (Türkel 2006; Baradan vd 2015).

Çimento miktarı (dozaj), betonun mukavemetinin değişimine neden olmaktadır. Çimento miktarı, 1 m³ beton karışımındaki çimentonun ağırlık cinsinden değeridir. Belirli bir kritik değere kadar beton karışımı içerisindeki çimento miktarı arttıkça beton dayanımının da arttığı belirtilmiştir. Çimento miktarı daha çok s/ç oranını belirleyip, betonun basınç dayanımını dolaylı olarak etkiler (Türkel 2006). 1 m³ beton içerisindeki en az çimento miktarı ise üretilen betonun türü, kullanım alanı, agregası, s/ç oranı, kıvamı gibi birçok etkene bağlı olarak değişiklik gösterir (İstanbuluoğlu 1988). Bunla birlikte, çimento miktarının çok fazla olması belirli bir değerden sonra rötreye neden olmakta, bu nedenle oluşan çatlaklar çekme dayanımını düşürmekte, çimento miktarı iri agregaların birbiriyle olan temasını ve yük aktarımını azaltarak beton dayanımında düşüşlere neden olabilmektedir (Baradan vd 2015).

Çimentonun kalitesi de betonun basınç dayanımını etkilemektedir. Farklı çimento fabrikalarında kullanılan kalker, kum, kil, alçı taşı ve puzolanik maddeler ayrı yerlerden temin edilmektedir. Buna ilaveten, farklı üretim yöntemi ve farklı kalite kontrolü gibi etkenler de göz önüne alındığında çimento fabrikalarında üretilen aynı sınıf çimentoların farklı kalitede olabileceği söylenebilir. Nitekim 3 farklı fabrikadan temin edilen aynı çimento tipi ile üretilen betonların basınç dayanımı değerleri, diğer tüm parametreler sabit olmasına rağmen, birbirinden farklı çıkmıştır (İstanbuluoğlu 1988).

Çimentoların inceliği ve kimyasal bileşimi de betonun basınç dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin; yüksek dayanımlı Portland Çimentosu (CEM I 52,5) ile üretilen betonun basınç dayanımı, CEM I 42,5 ve CEM I 32,5 ile üretilen betonlardan daha yüksek olacağı açıktır. Yine, çimentoların hidrasyon hızlarına bağlı olarak betonların basınç dayanımları zaman içerisinde farklı oranlarda artabilmektedir. Çimentonun 4 ana bileşenlerinden (C₃S, C₂S, C₃A ve C₄AF) C₃S oranı yüksek çimento ile yapılan beton ilk yaşlarda daha hızlı dayanım kazanırken, C₂S oranı yüksek çimento ile yapılan betonlar ileri yaşlarda dayanımını kazanırlar (Ararat 2015).

Çimentonun türü de basınç dayanımını etkilemektedir. Yapılan bir çalışmada Portland Çimentosu (CEM I) ile üretilen betonların basınç dayanımının ilk günlerde daha yüksek çıktığı, katkılı çimentolarla üretilen betonların ise uzun süre sonraki basınç dayanımlarının PÇ ile üretilen betonların basınç dayanımlarına yakın sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Binici vd 2000).

Betonların sahip olabilecekleri minimum çimento dozajları ile ilgili eski kaynaklarda bir takım önerilere rastlanılsa da (örneğin min. 300 doz gibi), kimyasal ve mineral katkıların beton teknolojisinde kullanımın yaygınlaşmasıyla birlikte günümüzde daha çok çevresel etkilere bağlı olarak önerilerde bulunmaktadır. Ülkemizde TS EN 206+A2: Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk (Anonim 2021c) standardında minimum çimento dozajları ile ilgili miktarlar belirtilmiştir.

Su/Çimento oranı ile ilgili faktörler

Betonun basınç dayanımını etkileyen en önemli parametrenin su/çimento oranı olduğu ve bu oranın betonun işlenebilirliği açısından da önemli olduğu belirtilmiştir (Türkel 2006). Su, çimentonun hidratasyon reaksiyonlarını başlatarak bağlayıcı özellik kazanmasını ve ince agrega ile iri agrega tanelerini ıslatarak betonun işlenebilir olmasını sağlar (Ararat 2015). Bununla birlikte, beton üretiminde kullanılan suyun hidratasyon için gerekli olandan fazla olması durumunda, sertleşen ve sertleşmiş beton aşamalarında, buharlaşma nedeniyle boşluk oluşumuna yol açtığı, bu yüzden de betonun dayanımını düşürdüğü belirtilmiştir (İstanbuluoğlu 1988; Türkel 2006). Çimentonun hidratasyonu için gerekli olan suyun, çimento ağırlığının yaklaşık %14'ü kadar olduğu ve hidrate çimento tanelerinin (C-S-H) arasındaki adsorplanmış jel suyunun da hesaba katılmasıyla gerekli suyun %20-25 olacağı belirtilmiştir (Baradan vd 2015). Uygulamada işlenebilirliği sağlamak için betona katılan ek su nedeniyle su/çimento oranı %55 gibi nispeten yüksek değerlere çıkmaktadır. Ancak, akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin kullanılmasıyla işlenebilirliği azaltmadan su/çimento oranının düşürülebileceği günümüz beton teknolojisinde iyi bilinen ve sıkça başvuru bir yöntemdir (Sert 2011).

Beton karışımına gerekenden %20 fazla su konulması beton dayanımını %30, %20 eksik su konulması ise dayanımı %60 oranında düşünebileceği yapılan çalışmalarda görülmüştür. Bu yüzden su miktarının ayarlanmasının betonun üretiminin en önemli ve hassas noktası olduğu söylenebilir (Ararat 2015).

Agrega ile ilgili faktörler

Betonun basınç dayanımını etkileyen diğer bir faktör agregaların özellikleridir. Agregaların basınç dayanımını ilgilendiren en önemli özellikleri; granülometrisi, en büyük tane boyutu, tane şekli, yüzey dokusu, dayanımı ve içerdiği zararlı maddelerin miktarıdır (Ararat 2015; Sert 2011).

Agregalar genellikle doğal oluşumlu çakıl veya kayaların kırılması ile elde edilen kırma taş olarak kullanılır. Doğal olarak elde edilen agregalar daha düzgün yüzeyli iken kırma taş olarak elde edilen agregalar pürüzlü ve köşeli yapıdadır. Kırma taş agregaların düşük su/çimento oranlarında çimento hamuru ile daha iyi kenetlenmesi (aderansı) nedeniyle daha yüksek beton basınç dayanımı verdiği, ancak, su/çimento oranı arttıkça kenetlenme etkisinin azaldığı belirtilmiştir. Doğal agregaların beton üretiminde kullanılması ise su ihtiyacını düşürerek ve su/çimento oranını azaltarak kırma taş agregalarına göre dezavantajı olan kenetlenme etkisini dengeleyebildiği bildirilmiştir (Ararat 2015).

Agrega granülometrisi, mümkün olduğu kadar yığının az boşluklu olmasını sağlamalı ve toplam tane yüzey alanını azaltmalıdır. Toplam tane yüzeyini azaltmak için belli sınırlar içerisinde kalmak koşulu ile maksimum tane çapının en büyük seçilmesi ve diğer agrega çaplarının da buna oranla büyümesi ile sağlanabileceği belirtilmiştir. Agregalar arasındaki boşlukları azaltmak için büyük agregalar arasını sürekli daha küçük agregaların alması ile iyi bir agrega granülometrisi de elde edilebilir (İstanbuluoğlu 1988).

Beton dayanımı için agregalarda aranan bazı özellikler aşağıda verilmiştir (İstanbuluoğlu 1988):

- Betonda kullanılacak olan agregalar sıcaklık ve nem altında hacimsel değişiklik göstermemeli (hacim değişimi betonda çatlak oluşturur),
- Agregaların su emme kabiliyetlerinin fazla olmaması gerekir (fazla su emme dona karşı olan dirençlerini azaltır),
- Agregaların hacim değişikliği yaratacak bir kimyasal reaksiyona girmemesi gerekir,
- Kil, silt, organik maddeler, kimyasal tuzlar vb. içermemeli (bunlar betonun basınç dayanımını düşürür).

Beton üzerinde yapılan araştırmalarda çimento hamuru ve agregaların dayanımlarının karşılaştırılmasına dayalı olarak beton dayanımları ile ilgili teorik ve deneysel değerlendirmeler yapılmaktadır. Bu değerlendirmelerde normal betonlara³ göre hafif beton⁴

³ *Normal beton*: Etüv kurusu durumdaki birim hacim kütlesi en az 2000 kg/m³, en fazla 2600 kg/m³ olan beton (TS EN 206+A2, Anonim 2021c).

ve yüksek dayanımlı betonlarda⁵ agreganın dayanımının beton dayanımı üzerinde çok daha fazla belirleyici olduğu tespit edilmiştir (Türkel 2006; Baradan vd 2015).

Sıkıştırma düzeyinin etkisi

Betonun basınç dayanımını etkileyen bir diğer özellik ise sıkıştırma düzeyidir. Beton, içerisindeki boşluk miktarının mümkün olduğu kadar az düzeyde olması amacıyla sıkıştırılır. İyi sıkıştırılmış, boşluk ve gözenek miktarları az olan betonların dayanımlarının, iyi sıkıştırılmamış betonlara göre daha yüksek çıktığı rapor edilmiştir (Türkel 2006). Kendiliğinden yerleşen beton hariç, normal betonlar vibratör kullanılarak sıkıştırılır. Betonun içerisindeki boşluk miktarının en düşük seviyeye inecek şekilde sıkıştırılması gerektiği, aksi takdirde beton içerisinde hava kalacağı, hava miktarının artması ile de beton dayanımının düşeceği belirtilmiştir (Ararat 2015). Ayrıca bu boşlukların agrega ve çimento hamuru ara yüzeyinde daha çok oluştuğu ve aderansı azaltacağı bildirilmiştir (Türkel 2006). %10 sıkışmış hava içeren betonların dayanımının %30-40 aralığında düşebileceği belirtilmiştir (Anonim 2021a).

Deney yaşının etkisi

Betonun, dökümü sonrasında zamanla mukavemet kazanmakta olduğu, %100 mukavemet kazanmasının çok zaman aldığı ve bu zamanın kesin olarak bilinmediği belirtilmiştir. İlk 28 günü boyunca basınç dayanımının sürekli arttığı ve yaklaşık olarak betonun, 1 günde %16, 3 günde %40, 7 günde %65, 14 günde %90 ve 28 günde %99 oranında basınç dayanımı kazandığı yapılan araştırmalarda tespit edilmiştir. 28. günden sonra betonun mukavemet kazanma hızı oldukça düşmektedir (Akkan 2018).

Deney ortamının sıcaklığının etkisi

Deney ortamının sıcaklığı basınç dayanımını etkileyen bir diğer etkidir. Deneyin yapıldığı ortamın sıcaklığı yükseldikçe dayanımın düşeceği ve deney sırasında kullanılacak olan malzemelerin deney ortamının sıcaklığına duyarlılığının da dayanım için önem taşıdığı belirtilmiştir (Türkel 2006). Deney ortamının sıcaklığında bir azalma olması taze betonun içerisindeki çimentonun kimyasal reaksiyonlarını yavaşlatarak bağlayıcı hamurun sertleşme

⁴ *Hafif beton*: Etüvde kurutulmuş durumdaki birim hacim kütlesi en az 800 kg/m³, en fazla 2000 kg/m³ olan beton (TS EN 206+A2, Anonim 2021c).

⁵ *Yüksek dayanımlı beton* (Anonim 2022d): Çimento hamuru boşluk yapısı, agrega özellikleri ve agrega-çimento hamuru geçiş bölgesi özellikleri geleneksel malzemeler ve yöntemlerle üretilmiş betona göre daha gelişmiş olmasından dolayı yüksek basınç dayanıma sahip olan beton türü için kullanılan genel tanımlama.

Türk Standartlarında (TS 13515 – Şubat 2014) basınç dayanım sınıfı C50/60'den daha yüksek olan normal veya ağır beton ve basınç dayanım sınıfı LC50/55'den daha yüksek hafif beton.

Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) tanımına göre 55 MPa (8000 psi) veya daha yüksek basınç mukavemetine sahip beton.

zamanını da uzattığı ve böylece betonun yeterli dayanım kazanmasının uzun zaman aldığı tespit edilmiştir. Ortam sıcaklığının 0°C'nin altına düşmesi sonucu taze beton içerisindeki suyun donacağı ve hacim genişlemesiyle çatlaklar ve bozulmalar meydana geleceği belirtilmiştir. Buna karşın, yüksek sıcaklık, taze beton içerisindeki suyu buharlaştırarak çimentonun hidratasyonun devamlılığı için gerekli su miktarını azaltmak suretiyle hidratasyonu yavaşlatacaktır. Sıcak bir ortamda sertleşmekte olan beton, ortam sıcaklığı değişip soğuyacak olur ise termal büzölmeler ve yüzeyde çatlaklar oluşabileceği ve bunun da beton dayanımının düşmesine neden olacağı bildirilmiştir (İstanbuluoğlu 1988). Çimentonun hidratasyonu sıcaklığın 10-15 °C olması durumunda ideal olarak geliştiğini dolayısıyla beton dökümü için en uygun hava sıcaklığının gölgede 10-15 °C olması gerektiği önerilmiştir (Baradan vd 2015).

Hidratasyon reaksiyonlarının hızının sıcaklığa bağlı olduğu, sıcaklığın artması ile tepkimenin de artacağı, bu nedenle, daha yüksek sıcaklıkta tutulan betonun, daha düşük sıcaklıkta tutulan betona göre daha hızlı dayanım kazanacağı belirtilmiştir. Fakat daha yüksek sıcaklıkta tutulan betonun nihai dayanımının daha düşük olacağı, bunun nedeninin, sertleşmiş çimento hamurunun fiziksel formunun, hidratasyon hızlı ilerlediğinde daha az iyi yapılandırılmış ve daha gözenekli olmasından kaynaklandığı bildirilmiştir (Anonim 2021a)

Numunenin nem içeriğinin etkisi

Taze beton ilk hazırlandığı zaman bünyesindeki suyun hidratasyon için gerekli olan sudan fazla olduğu bilinmektedir. Buharlaşma veya başka bir nedenle betonun bünyesindeki suyun önemli ölçüde azalması, tam hidratasyonu geciktirebilir veya hidratasyonun durmasına neden olabilir. Bu durum ise betonun basınç dayanımının düşmesine yol açabilir. Bu yüzden tam hidratasyon için gereken suyun kaybının engellenmesi ya da olabilecek su kayıplarının yerinin doldurması gerektiği belirtilmiştir (İstanbuluoğlu 1988).

Yapılan çalışmalar hidratasyonun devam etmesi için beton içerisindeki nemin %80'in altına düşmesinin engellenmesini ortaya çıkarmıştır. Havanın nem değerinin %80'in üzerinde olması (rüzgâr hızının yüksek, hava sıcaklığının yüksek ve beton ile hava sıcaklığı arasındaki farkın olmadığı) durumlarda ekstra kür işlemine gerek kalmayacağı ileri sürülmüştür (Baradan vd 2015).

Kür koşullarının etkisi

Betonun basınç dayanımının doğru ve yeterli sürede kür edilmesi ile tam olarak gelişebildiği belirtilmektedir. Yukarıdaki paragrafta da belirtildiği gibi bağıl nemin %80'in altına düşmesi ile hidratasyonun büyük oranda azalması söz konusudur (Baradan vd 2015).

Beton numunenin düşük sıcaklık ve düşük neme maruz kalması, çimentonun hidratasyonunu yavaşlatmakta ve özellikle betonun ilk günlerdeki basınç dayanımlarında azalmaya yol açmaktadır. Buna karşın, yüksek sıcaklık ve yüksek nemde hidratasyon hızının arttığı ve betonun ilk günlerde daha fazla dayanım kazandığı belirtilmiştir (Ararat 2015).

Standart kür koşullarına göre beton numunelerin kalıptan çıkarıldıktan sonra 20 ± 2 °C sıcaklıktaki kür havuzunda bekletildiği ve üretimden 28 gün sonra basınç dayanım testine tabi tutulduğu belirtilmiştir (Kaymak 2015). Kötü kür koşullarındaki numunelerde basınç dayanımı, normal kür yapılmış numunelere göre ilk günlerde (2-7 gün) %50'ye, 28 günde %49'a, 90 günde ise %40'a kadar düşük sonuçlar verebildiği belirtilmiştir (Binici vd 2000).

Beton numunelerin kürlenmesi için çeşitli işlemler, yöntemler ve malzemeler mevcuttur. Aslında tüm bu işlem, yöntem ve malzemelerin temel amaçları, betonun özelliklerinin gelişmesi için yeterli nem içeriğinin ve sıcaklığın sağlanmasıdır. Betonun kürlenmesi işleminde suyun doğrudan püskürtme yöntemi ile betona uygulanması, beton numunenin su içerisine daldırması, nem tutan kumaşların suya doymun hale getirip beton yüzeyine serilmesi, beton yüzeyine toprak kum gibi malzemelerin ıslatılarak serilmesi, yüzey kaplama malzemelerinin kullanılması vb. gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler; kür malzemesinin temin edilebilirliği, beton elemanların şekli ve büyüklüğü, üretim kolaylığı, ekonomik olması gibi etkenlere bağlı olarak seçilmektedir (Baradan vd 2015).

Özellikle laboratuvar ortamında beton numunelerin basınç dayanımlarının belirlenmesinde hiçbir kür işlemine tabi tutulmadan hava ortamına bırakılan numunelerle ilgili çalışmalar da yapılmıştır. Alyamaç ve İnce (2007) tarafından yapılan bir çalışmada su kürüne tabi tutulan numunelerin hava kürü numunelerinden yaklaşık %18 daha fazla dayanım sonuçları verdiği belirtilmiş ve laboratuvardaki kür yönteminin su kürü yöntemine yakın sonuçlar veren bir yöntem olması gerektiği belirtilmiştir. Yapılan çoğu araştırmada 28 günden daha az süre su kürüne tabi tutulan beton numunelerin dayanımının, 28 gün küre tabi tutulan numunelere oranla daha düşük dayanımda olduğu tespit edilmiştir. Kür koşulları ile ilgili standartların genel görüşü beton numunelerin suya doymun olarak basınç dayanımı deneyine tabi tutulmasıdır. Bunun nedeni, numuneleri suya doymun hale getirmenin kolay olması ve hava ortamında bekletilen numunelerin hava kurusu olma derecesinin net olarak tespit edilememesinden kaynaklandığı belirtilmiştir (Kaymak 2015).

Numunenin boyutu ve biçiminin etkisi

Boyut etkisi genellikle beton içerisinde bulunan boşluk ve kusur miktarının değerlendirilmesi ile açıklanmaktadır. Yapılan çoğu çalışmada beton numunelerinin

boyutunun artması ile betonun dayanımında düşüş olduğu, bunun küçük numunelerin kesit alanları ve hacimlerinin düşük olmasından dolayı daha büyük boyutlardaki numunelere göre kusur miktarlarının az olmasından kaynaklandığı, bu yüzden de beton dayanımlarının daha yüksek çıktığı belirtilmiştir. Ayrıca, küp numuneler üzerinde elde edilen basınç dayanımı değeri silindir numuneler ile elde edilen basınç dayanımı değerinden daha yüksektir. Bunun nedeninin; yükleme makinesi ile numune arasındaki sürtünme kuvvetinin küp numunelerde daha etkili olması, betonun döküm ve kırım yönlerinin farklı olması, silindir numunede gerilme yoğunluğu daha uniform dağılırken küp numunelerde köşelerde daha fazla olması gibi farklılıklar olduğu ileri sürülmektedir (Şanal ve Sarılioğlu 2017).

Betonun basınç dayanımı numune biçimine bağlı olarak farklı değerler aldığı ve bu farklılığın numune yüzeyleri ile yükleme makinesi arasındaki sürtünme kuvvetine bağlı olduğu belirtilmiştir. Numunelerin narinlik oranları⁶ azaldığı zaman sürtünme kuvvetlerinin numunelerin tüm yüksekliği boyunca etkili olduğu ve yanal genişlemeyi önleyerek basınç dayanımını arttırdığı değerlendirilmektedir. Narinlik oranı artışı ile yanal genişlemenin serbestçe oluştuğu ve basınç dayanımını azalttığı belirtilmektedir (Türkel 2006).

1993 yılında French and Moktarzadeh (1993) tarafından yapılan çalışmadan günümüze kadar yapılan çoğu çalışmada Ø100×200 mm boyutlarındaki silindir numunelerin basınç dayanımlarının Ø150×300 mm boyutlarındaki silindir numunelerden genel olarak daha yüksek (%6 civarında) sonuçlar verdiği tespit edilmiştir (Zia *et al.* 1994; Chowdhury *et al.* 2013). Beton dayanımları arttıkça farkın azaldığını gösteren çalışmaların yanında Ø100x200 mm boyutlarındaki silindir numunelerin basınç dayanımlarının Ø150×300 mm boyutlarındaki silindir numunelerden daha düşük olduğunu gösteren çalışmaların da olduğu ileri sürülmektedir (Zia *et al.* 1994).

Yükleme hızının etkisi

Betonun zamana bağlı deformasyon gösteren bir malzeme olması, yükleme hızının betonun dayanımını etkileyen önemli faktörlerden biri olmasına neden olmuştur (Kolcu 2008; Küden 2011).

Beton numunelere uygulanan yükleme hızının azalması (yükün daha uzun süre uygulanması) ile beton numunelerin daha küçük gerilmelerde kırıldığını ve elde edilen dayanımların daha az olduğu, yükleme hızının artması (yükün daha kısa süre uygulanması) ile beton numunelerin daha büyük gerilmelerde kırıldığı ve elde edilen dayanımların daha fazla olduğu belirtilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda yükleme

⁶ Narinlik oranı: Bir yapı elemanının uzunluk ya da boyunun enine, kalınlığına ya da en küçük eylemsizlik yarıçapına oranı (Anonim 2022a).

hızının 0,02-0,18 kgf/cm²/sn, yükleme süresinin 24-30 dakika sürdüğü beton numunelerin basınç dayanımlarının, yükleme hızının 2,1 kgf/cm²/sn. olarak alındığı numunelerin basınç dayanımlarından yaklaşık %15 daha az çıktığı belirlenmiştir. Yükleme hızı 70 kgf/cm²/sn. olarak alınan numunelerin basınç dayanımları ise 2,1 kgf/cm²/sn. yükleme hızı olan numunelerden %10 daha yüksek çıkmıştır. Bu nedenle, deneylerde elde edilen sonuçların birbirleri ile karşılaştırılabilir nitelikte olmaları için yükleme hızlarına standartlarla belli sınırlamalar getirilmiştir (Felekoğlu ve Türkel 2004; Ararat 2011). Örneğin, TS EN 12390-3'de (Anonim 2019a) yükleme hızı 0,6±0,2 MPa/s olarak önerilmektedir.

Yükleme hızının etkisinin hasar oluşumu ile ilişkili olabileceği, düşük yükleme hızlarında betonda sünme etkisi ve mikro çatlakların artışı ile dayanımın düşeceği, yüksek yükleme hızlarında betonun dayanımında görülen artışa çatlakların ilerlemesinin kısıtlanmasının yol açtığı değerlendirilmektedir (Kolcu 2008).

Kalıplanma ve yükleme doğrultusunun etkisi

Türkel (2006)'de belirtildiğine göre kalıplama doğrultusu ile ilgili yapılan çalışmalarda aynı boyutlardaki yatay ve dikey kalıplanan numuneler karşılaştırılmıştır. Dikey kalıplanan numuneler yatay kalıplanan numunelere göre daha yüksek süneklik göstermiştir. Çünkü yatay kalıplanan numunelerde kaba agregaların uzun kısımlarının çoğunlukla yükleme doğrultusuna paralel dizilmesi nedeniyle kırılma, geciken gerilmelerin büyümesinden etkilenmektedir. Yatay kalıplanan numune dikey kalıpların numuneye göre daha düşük gerilmeye maruz kalmaktadır. Bu nedenle de normal dayanımlı betonlarda, numune kalıplama doğrultusuna paralel olarak yüklendiğinde, kalıplama doğrultusuna dik olarak yükleme yapılan numuneye göre, daha düşük dayanım sonuçları elde edilmektedir.

Numune ile basınç tablası arasındaki temasın etkisi

Eksenel basınç altında numunelerin kırılmasının nedeninin pres tablası ile numuneler arasındaki sürtünmeden kaynaklı oluşan ve yük eksenine dik olan kesme kuvvetlerinden kaynaklandığı, kesme kuvvetinin etkisinin temas yüzeyinden uzaklaşıldıkça azalmakta olduğu, bu nedenle de numune yüksekliğinin kesit boyutuna oranı arttıkça sürtünme etkisinin kırılmayı daha az etkilediği belirtilmiştir. Test yapılacak olan makinenin türü ve yükleme yüzeyinin sertliğinin de test sonuçlarını etkilediği belirtilmiştir (Türkel 2006; Ararat 2015).

Yükleme bloğu ve eksantrisitenin basınç dayanımına etkisi

Basınç dayanımına etki eden diğer bir faktör ise yükleme tablasının oluşturduğu bloğun çapı ve numunenin yükleme eksenine olan dış merkezlik (eksantrisite) etkisidir

(Ararat 2015). Türkel (2006) ve Ararat (2015)'te belirtildiğine göre Lessard, Chaallal ve Aitcin (1993) tarafından yapılan çalışmalarda numune boyutlarının değişimine göre yükleme bloğunun oturduğu küresel bloğun çapının da numune boyutuna uygun olması gerektiği belirlenmiştir. Bu çalışmada Ø150×300 mm boyutundaki silindirik numunelere 152 mm ve 102 mm'lik yük blokları kullanılmış ve 102 mm yük bloğu kullanımında kırılmanın %17 daha düşük bir dayanım değerinde gerçekleştiği belirlenmiştir.

Dış merkezlik için yapılan çalışmalarda ise normal dayanımlı betonlarda dış merkezliğin 4-6 mm arasında olmasının mükemmel yerleştirilmiş bir numuneye göre dayanımda çok önemli bir fark oluşturmadığı, yüksek dayanımlı betonlarda ise 6 mm'lik dış merkezliğin dayanımda önemli farklar oluşturduğu rapor edilmiştir. Yüksek dayanımlı betonlar için 4 mm, normal dayanımlı betonlar için ise 6 mm'lik dış merkezlik değerinin aşılmaması durumunda dayanımda olumsuz bir etki oluşmadığı söylenebilir (Türkel 2006).

Noguchi (1997) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise eksen kaymasının 13 mm olduğu durumda dayanımda %10 kayıp olduğu belirlenmiştir.

Cidar etkisi

Basınç dayanımını etkileyen diğer bir faktörün beton numunenin kalıp yüzeyi cidarında farklı bir bileşime sahip olmasından dolayı ortaya çıktığı belirtilmiştir. Betonun dayanımı bu bölgede iç kısımlardan farklı olup, kalıp yüzeyindeki bu tabakanın kalınlığı ortalama 1 agrega boyutu kadardır. Bu olaya cidar etkisi denilmektedir. Boyutları küçük numunelerde cidar etkisi boyutları büyük numunelerden daha büyük olmaktadır. Bunun sebebi, bu katmanın kalınlığının numune boyutundan bağımsız olması ve çok ince bir enine kesit için önemsenmemesidir. Agrega granülometrisinde sınırlamaların ortaya çıkmasının sebebinin bu cidar etkisi olduğu ve bu etkinin de betonun şekillendirilmesinde önemli olduğu bildirilmiştir (Ararat 2015).

Literatürde numune boyutundaki artışın dayanımı düşürdüğü ve bu yüzden boyutu küçük olan numunelerin dayanımının daha fazla çıktığı genellemesi vardır. Diğer yandan en küçük boyutlu numunelerin en yüksek dayanımı vermesi beklenirken, bu durumun tersi bir durumla karşılaşılabilir. Küçük numunelerde oluşan bu zıtlığın sebebi cidar etkisidir. İri agrega ile kalıp yüzeyi arasındaki boşluğu doldurmak için gereken çimento hamuru, numunenin merkezindeki çimento hamurundan daha fazladır. Numunenin işlenebilirliğindeki bu etkinin, yüzey alanı / hacim oranı büyük olan numunelerde daha önemli olduğu belirtilmiştir (Türkel 2006).

Yine Türkel (2006)'da belirtildiğine göre, yapılan bir çalışmada beton numuneler kırılmaya kadar yüklendiğinde, agregaların yoğunluğunun kırılan yüzeyde sürtünme boyunu yönlendirdiği ve bu yüzden betondaki kırılma enerjisinin agreganın dağılımı ile ilişkili olduğu rapor edilmiştir. Betonun sınır yüzeyinde agreganın parçacıklarının ve yoğunluğunun uniform olmadığı, ancak sınırdan uzaklaştıkça bu dağılımın değiştiği ileri sürülmüştür.

Kompasitenin etkisi

Kompasite (doluluk oranı); doğal taşlar, beton, pişmiş toprak ürünleri gibi boşluklu, agregalar gibi taneli cisimlerde som (dolu) kısmın hacminin (V_d) toplam hacme (V_t) oranını ya da $100 \cdot V_d / V_t$ olarak yüzdesini ifade eden büyüklük olarak tanımlanabilmektedir (Anonim 2022a). İyi bir betonda kompasitenin $\geq \%80$ olması gerektiği belirtilmiştir. Kompasitesi yüksek dolu bir betonun basınç dayanımının da yüksek olacağı, düşük kompasiteli betonun boşluk miktarının fazla olmasından dolayı dayanımının düşük olacağı beklenir. Kompasitenin yüksek olmasının agreganın kompasitesinin yükseltilmesiyle mümkün olacağı belirtilmiştir (Başka 2006). İstanbulluoğlu (1988) betonun kompasitesinin; agregaların cinsine ve granülometrisine, çimento miktarına, kıvama, sıkıştırma şekline, maksimum tane büyüklüğü gibi değişkenlere bağlı olarak değişen dolaylı bir faktör olduğunu ileri sürmüştür.

Katkı maddelerinin etkisi

Normal betonlarda uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıları kullanılmaktadır. Mineral katkıları genellikle uzun vadede dayanımları artırırken başlangıç dağılımlarını ve dayanım kazanma hızını azaltabilmektedir. Diğer taraftan, betona bir takım özelliklerinin kazandırılması amacıyla taze beton karışımlarına çoğunlukla az miktarda organik veya inorganik kimyasal maddeler katılmaktadır. Bu katkı maddelerinin betonun s/ç oranını arttırmadan betonun işlenebilir olmasında, priz süresinin ayarlanmasında, erken yaş dayanım hızının artmasında ve dış koşullara karşı dayanıklılığının artmasına neden olduğu kanıtlanmıştır (Baradan vd 2015).

Numune uç yüzeyinin hazırlanma şeklinin etkisi

Betonun basınç dayanımının belirlenmesi için üretilen silindirik numunelerin uç yüzeylerinin farklı başlıklama malzemeleri ve yöntemleri ile başlıklanması önerilmektedir. Birçok araştırmacı gibi Ararat (2015) da yaptığı çalışmada, başlıklama yapılan numunelerin dayanımlarının başlıksız numunelerin dayanımlarından yüksek çıktığını belirtmiştir. Türkel (2006) ise başlıklamada yüksek dayanımlı malzemelerin kullanılması, aksi takdirde malzemenin mukavemetinin yetersiz kalacağı belirtilmektedir.

Numune uç yüzeylerinin başlıklanması, başlıklamada kullanılan farklı yöntemler ve basınç dayanımına etkileri aşağıdaki ‘Geçmişten Günümüze Başlıklama ve Silindir Numunelerin Başlıklanmasında Kullanılan Yöntemler’ başlığı altında ayrıntılı incelenmiştir.

Kalıp tipinin etkisi

ABD Ulaştırma Bakanlığı Federal Otoyol İdaresi tarafından yayınlanan bir raporda (Zia *et al.* 1994) Carrasquillo *et al.* (1988) tarafından yapılan bir çalışmada Ø150×300 mm boyutundaki kalıpların kullanıldığı numunelerde plastik kalıpların çelik kalıplara göre biraz daha düşük dayanımlar verdiği belirtilmiştir. Ø100×200 mm boyutundaki kalıpların kullanıldığı numunelerde ise plastik ve çelik kalıplar arasında basınç dayanımlarında önemsiz farkların olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, betonu yerleştirmek için manuel şişleme işleminin yapılması ile basınç dayanımında kalıp tipinin önemsiz olduğu bildirilmiştir. French ve Moktarzadeh (1993) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise Ø150×300 mm boyutundaki kalıpların kullanıldığı numunelerde çelik kalıpların, plastik kalıplardan %2,5 daha yüksek dayanımlar verdiği belirtilmiştir.

Karma suyunun kalitesinin etkisi

Karma suyu, taze beton içerisindeki agregaların yüzeylerini ıslatır, betonun işlenebilirliğini sağlayarak yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerinin kolaylaşmasını sağlar ve betonun dayanım ve dayanıklılığını etkiler. Karma suyu çok temiz olmalı ve içerisinde betonun özelliklerini olumsuz yönde etkileyecek kil, şist, asit, sülfat vb. zararlı maddeler bulunmamalıdır (Sert 2011). Magnezyum sülfat oranı fazla olan suların karışımında kullanılması sonucu çimentonun serbest kireci ile alçı taşı oluşumuna yol açması nedeniyle zararlı olduğu bildirilmiş ve %1’den daha fazla sülfat (SO₃) ile %3’den daha fazla sodyum klorür (NaCl) içeren suların kullanılmaması önerilmiştir (Anonim 2021b).

En genel ifadeyle beton karışım suyunun basınç dayanımı üzerindeki olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için TS EN 1008: Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları (Anonim 2003)’de belirtilen kriterlerin gözetilmesi gerektiği değerlendirilmektedir.

Geçmişten Günümüze Beton Numuneleri Başlıklama Yöntemleri

Carino *et al.* (1994) ve Eggers and Torres (2006)’in bildirdiklerine göre beton numunelerin başlıklanması ile ilgili en erken çalışmalardan biri Gonnerman tarafından 1924 yılında yapılmıştır. O zamanlar beton numunelerin başlıklanması için çimento hamuru

kullanımının standart bir başlıklama yöntemi olduğu belirtilmiştir. Çimento hamuru hazırlandıktan ve 2-6 saat arası bekletildikten sonra dökme demir bir plaka ile çimento hamuru demir plaka kalıp yüzeyine oturuncaya kadar yerleştirilerek başlıklama işlemi yapılırdı. Çimento hamuruna alternatif olarak alçı ve alçı + Portland çimentosu karışımı, bağlanmamış (duvar panosu, mantar levha, kurutma kâğıdı, deri, kurşun levha, karton, çam tahtası, kauçuk) gibi malzemelerin başlıklamaya etkisi de araştırılmıştır. Çalışmada Ø150×300 mm boyutunda ve 7-38 MPa dayanıma sahip beton numuneler kullanıldığı ve sonuç olarak; alçı başlıklar ve alçı + Portland çimentosu karışımı başlıkların, Portland çimentosu başlıklarına benzer dayanım sonuçları verdiği belirtilmiştir. Bağlanmamış malzemeler ile yapılan başlıklamalarda ise daha düşük dayanım sonuçları elde edildiği ve beton dayanımı arttıkça dayanımdaki azalmanın daha fazla olduğu görülmüştür. Portland çimentosu hamuru ile başlıklama uzun süre aldığından çoğu araştırmacı tarafından başka yöntemler de incelenmiştir. McCormick ve Purrington tarafından 1926 yılında yapılan bir çalışmada bağlanmış başlıklama ihtiyacına bir alternatif olarak kum yastığı yöntemi ile 165 mm iç çapa sahip bir kap içerisine kumu yerleştirmiş ve numunenin başlıklanacak kısmını kap içerisindeki kuma yerleştirerek başlıklama yapmışlardır. 14-21 MPa arası dayanıma sahip olan beton numunelerde yapılan bu çalışmada kum yastığı yöntemi ile başlıklanan numunelerin dayanımlarının çimento hamuru ile başlıklanan numunelerin dayanımları ile benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.

Carino *et al.* (1994) ise Adams tarafından 1927 yılında alüminli çimento ve ince kum harcı ile silindir numunelere başlıklama yapılmıştır. Silindir numunelerin baş kısımlarına bir yaka yerleştirerek yakaların içerisine alüminli çimento harcı doldurmuş ve bir cam levha ile bastırarak fazla harç çıkarılmıştır. 19-24 saat arası bekletildikten sonra yakalar çıkarılmış ve basınç dayanımı testinden önce silindir numuneler 48 saat su küründe bekletilmiştir.

Yine Carino *et al.* (1994) ve Eggers and Torres (2006)'in bildirdiğine göre, Freeman tarafından 1928 yılında yapılan bir çalışmada silindir numunelerin başlıklanmasında kükürt harcının kullanımı hakkında bilgi verilmiştir. Silindir numuneleri yatay konumda başlıklama yapmak için bir cihaz kullanmış ve silindir numune uçlarına esnek bantlar yerleştirerek başlık için boşluk bırakmıştır. Bu boşluğa erimiş kükürt harcı dökerek kükürt sertleştikten sonra bantları çıkartmış ve böylece başlıklama işlemini yaptığını belirtmiştir. Kükürt harcının Ø50×100 mm boyutundaki silindirler halinde kalıplandığında 55 MPa basınç dayanımına ulaştığını bildirmiştir. Freeman tarafından 1930 yılında yapılan başka bir çalışmada ise silindir numunelerin başlıklanmasında kullanılan kükürt harcının diğer başlıklama

yöntemlerine göre daha iyi sonuç verdiği bildirilmiştir. Timms 'in 1939 yılında yayınladığı laboratuvar çalışmasında da kükürt harcının silindir numuneleri başlıklamak için kullanıldığı tespit edilmiştir.

Carino *et al.* (1994) beton başlıklama yöntemlerinin tarihçesi ile ilgili detaylı araştırma yapmış ve aşağıdaki paragrafta verilen bilgileri derlemiştir.

1940'ların başında yaklaşık 50-60 MPa arasında basınç dayanımı olan beton silindirlere farklı malzemeler kullanılarak başlıklar yapılmıştır. Kükürt-silika bileşiği ve Paris alçısı⁷ kullanılarak beton numunelere başlıklar yapılmış ve kükürt-silika bileşiği ile yapılan başlıkların daha yüksek mukavemet artışı sağladığı, Paris sıvası kullanılarak başlık yapılan numunelerde de hafif bir mukavemet artışı gözlemlenmiştir. Beton silindirlerin başlıklamadan önceki koşulları da incelenmiştir. Troxell (1941) taraftan Ø75×150 mm boyutundaki silindir numunelerde yapılan bir çalışmada Paris alçısı, yüksek mukavemetli alçı, kükürt-silika malzemeleri kullanılarak silindir beton numunelere farklı başlıklamalar yapılmıştır. Yüksek mukavemetli alçı ile yapılan başlıklamanın en yüksek dayanımı verdiğini, kükürt-silika ile yapılan başlıklamanın ise Paris alçısına göre daha yüksek dayanım sonuçları verdiğini belirtmiştir. Collins (1941) tarafından yapılan bir çalışmada kükürt harcının silindir numunelerin başlıklanması için eşit derecede uygun olmadığını belirtilmiştir. Saf kükürt malzemesinin sadece 16 MPa, %60 kükürt + %30 kum + %10 uçucu kül karışımının ise 52 MPa basınç dayanımı sonucunu verdiğini belirterek saf kükürt malzemesinin başlıklama için uygun olmadığını belirtmiştir. 1944 yılında yapılan bir çalışma sonucunda ise kükürt bileşiği ile yapılan başlıklama testlerinin bir takım kısıtlamalarının olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada kükürt bileşiği ile başlıklanan numunelerin aynı gün ve ertesi gün testleri yapılmış ve başlıkların kürlenmesi nedeniyle silindirlerin tam güç potansiyellerinin gelişmedikleri belirlenmiştir. Kükürt bileşiği ile yapılan başlıkların kalınlığının yaklaşık 6,35 mm olduğu ölçülmüştür. Daha ince başlıklama yapılan numunelerin basınç kuvvetini arttırdığı gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgulara dayanarak kükürt ile yapılan numune başlıklarının olabildiğince ince olması gerektiği önerilmiştir. Kennedy (1944) tarafından yapılan bir çalışmada iki kükürt-silika bileşiği ve iki alçı bileşiği (biri orta dayanımda diğeri yüksek dayanımda) kullanılarak 20-50 MPa dayanıma sahip Ø150×300 mm silindir numunelere başlıklar yapılmıştır. Kükürt başlıklar 6 mm, alçı başlıklar 1,5 mm kalınlığında yapılmıştır. Kükürt-silika bileşiğinin biri 1 saat sonra yeterli dayanıma ulaştığı, diğer kükürt-silika bileşiğinin ise 40 saate kadar dayanım artışının devam ettiği

⁷ Paris alçısı: 1666 yılındaki Londra yangını alçı kullanımının geniş kitlelerce benimsenmesi bakımından bir dönüm noktası sayılabilir. Bu felaket sırasında ahşap yapıları koruduğu gözlenen alçının kullanımı Paris' te zorunlu hale getirilmiş, bu vesile ile sıva alçısına da "Paris alçısı" lakabı takılmıştır (Anonim 2022b).

belirtilmiştir. 38 MPa'a kadar olan basınç dayanımları, bir saatte yeterli dayanıma ulaşan kükürt-silika ve iki alçı bileşiğinin de yaklaşık olarak eşit sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Kükürt başlıklama için 1 saat, alçı başlıklama için 3 saat sertleşmesi için bekletilmelerini ve yapılan başlıkların mümkün olduğu kadar ince yapılmasını önerilmiştir. Masters ve Loewer (1952) ise kükürt başlıklama bileşiğinin karşılaştırılmasını yapmışlardır. Yaş ve başlık kalınlıklarının 150 mm'lik silindir numuneler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. 20-40 MPa dayanıma sahip beton numunelerde daha düşük dayanıma sahip beton numuneler için başlıklar 12-40 saat arasındaki yaşlarda benzer dayanım sonuçları verdiği, daha yüksek dayanımlı beton numunelerin başlıklanmasında 2 saati aşan yaşların etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu belirtmişlerdir. Daha yüksek dayanımlı beton numuneler için başlık kalınlığı 3-13 mm arasında incelenmiş ve 3 mm başlık kalınlığında en yüksek dayanım sonuçları elde edilmiştir. Werner (1949) tarafından yapılan bir çalışmada silindir numune uç yüzeylerinde kusurların etkisini araştırmak için numune uç yüzeylerine girintiler yapılarak dayanım sonuçları incelenmiştir. Pürüzlü uçlu yüksek dayanımlı beton numunelerin, pürüzlü uçlu düşük dayanımlı beton numunelere kıyasla dayanımdaki düşüşün daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Werner (1953) tarafından yapılan başka bir çalışmada farklı başlıklama malzemeleri (alüminli çimento macunu, Paris alçısı, Portland çimentosu, yüksek mukavemetli alçı) ile başlık yapılan silindir numunelerde, farklı başlıklar arasında alüminli çimento başlıklarının hemen hemen tüm başlıklama türleri arasında en yüksek dayanım sonuçlarını verdiği ileri sürülmüştür. Yapılan başlıklamaların düşük dayanımlı betondan ziyade yüksek dayanımlı beton numuneler üzerinde daha büyük etkilere sahip olduğu rapor edilmiştir. Aynı araştırmacının (Werner) 1956 yılında yayınladığı bir diğer çalışmada ise kükürt başlıklama için yatay ve dikey başlıklama yöntemi kullandığını belirtmiştir. Yatay başlıklama cihazı ile başlıklanan ve daha kalın olan kükürt başlıklar %5 daha düşük dayanımlarla sonuçlanmıştır. Werner (1958) tarafından yapılan başka bir çalışma sonucunda başlıklama malzemelerinin, yüksek dayanımlı betonlar üzerinde düşük dayanımlı betonlara göre daha büyük etkilere sahip olduğu belirlenmiştir. Pürüzlü uçlu yüksek dayanımlı silindirlerin, düz uçlu silindirlere göre daha düşük dayanımlar verdiği ifade edilmiştir. Düşük dayanımlı betonlar üzerinde yüzeyin durumunun etkisinin daha az veya ihmal edilebilir düzeyde olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, daha kalın yapılan kükürt başlıkların dayanımda %5'lik bir azalmaya yol açabileceği sonucuna ulaşılmıştır. 1960 yıllarında silindir beton numunelerin başlıklanması üzerinde fazla bir çalışmanın yapılmadığı tespit edilmiştir. 1970 yılına gelindiğinde ise neopren⁸ ped ile başlıklama yöntemine olan ilgi atmış ve silindirlerin çaplarından biraz daha

⁸ Neopren: 2-klorobuta-1, 2-dienin polimerleşmesiyle üretilen yapay kauçuk (Anonim 2022a)

büyük çapta metal başlık aparatı ve kauçuk pedler kullanılmıştır. Kauçuk pedlerin yanal genişlemesi, metal başlık aparatı tarafından önlenerek silindir numunelerin basınç dayanım testi yapıldığı anlaşılmaktadır. Saucier (1972) tarafından yapılan bir çalışmada Ø150×300 mm boyutlarına sahip numuneler üzerinde başlıklamanın etkisi incelenmiş ve 14 MPa dayanımında düşük dayanımlı alçının, 36 MPa dayanımında ise yüksek dayanımlı alçı malzemelerin kullanıldığı belirtilmiştir. 17 MPa dayanıma sahip silindir numunelerde ise bu iki malzemede dayanımı etkilememiştir. 45 MPa dayanıma sahip beton numunelerde düşük dayanımlı alçı ile yapılan başlıkların daha düşük dayanım değerleri verdiği tespit edilmiştir. 50 MPa küp dayanımına sahip olan kükürdün, 110 MPa dayanımına kadar olan silindir beton numunelerin başlıklanması için kullanılabileceği belirtilmiştir.

Eggers and Torres (2006)'in bildirdiğine göre Grygiel ve Amsler (1977) tarafından yapılan bir çalışmada neopren pedler ile yapılan başlıklar ve kükürt bileşiği ile yapılan başlıklar karşılaştırmıştır. Neopren perdelerle yapılan başlıkların dayanımları ihmal edilebilir düzeyde olsa da kükürt bileşiği ile yapılan başlıklardan daha yüksek dayanımda çıktığı ileri sürülmüştür. Neopren pedlerin belli bir dereceye kadar sürekli olarak kullanılabilir olması, kükürt bileşiğine göre daha az maliyetli olması, daha az zaman alması ve zararlı buhar salınımının olmaması nedeniyle daha avantajlı olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada kullanılan betonun basınç dayanımının 40 MPa'dan az, neopren pedlerin ise 50 durometre⁹ sertlikte ve 12,7 mm kalınlığında olduğu yazılmıştır.

Özyıldırım (1982) tarafından yapılan bir çalışmada Ø150×300 mm boyutlarında silindir numuneler kullanmış ve kükürt başlıklama ile neopren ped başlıklama yöntemleri karşılaştırılmıştır. Kükürt ile başlıklanan numunelerin basınç dayanımı ortalamalarının, neopren ped ile başlıklama yapılan numunelerin basınç dayanımı ortalamalarından yaklaşık 0,4 MPa daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Neopren ped ile başlıklama yönteminin kükürt başlıklama yöntemine bir alternatif olabileceği ileri sürülmüştür.

Eggers and Torres (2006)'de belirtildiğine göre Carrasquillo ve Carrasquillo (1988) tarafından yapılan bir çalışmada 28-70 MPa arasındaki dayanıma sahip betonlarda bağlanmamış başlıklama türlerinden olan alüminyum halkalar, kükürt harçlı başlıklar ile karşılaştırılmıştır. Alüminyum halkalı başlıkların kükürt harçlı başlıklardan %3 daha az dayanım verdiği görülmüştür. Alüminyum halkalar yerine çelik halkalar kullanıldığında ise bu azalmanın %1 değerinden daha az olduğu belirlenmiştir. Ancak 70 MPa üzerinde

⁹ Durometre: Bir materyalin üzerine çentik atılmasına gösterdiği dirence göre sertliğinin ölçülmesine dayalı bir metottur. 1920'lerde Albert F. Shore tarafından bulunmuştur. Durometre terimi hem ölçüm aleti hem de ölçü birimi için kullanılır (Anonim 2022c).

dayanıma sahip olan numunelerde çelik halka ve alüminyum halka kullanılan başlıkların kükürt harcından yaklaşık % 9 oranında daha yüksek dayanım ürettiği belirlenmiştir.

Carino *et al.* (1994)'de ise 25-40 MPa dayanıma sahip silindir beton numuneler üzerinde kükürt başlıklama ile ped başlıklamada basınç dayanımlarındaki değişiklikleri analiz için istatistiksel bir yazılım kullanmış ve basınç dayanımı ortalamalarında bir farklılık olmadığı tespit edilmiştir. Chojnaki ve Read (1990) yaptıkları bir çalışmada ise; kükürt, öğütme, öğütme + kükürt, elmas testere ile kesme + kükürt, öğütme + ped ve yalnız ped ile başlıklar yapılmıştır. Çalışmada 70 MPa ve 90 MPa dayanımına sahip beton numuneler kullanılmıştır. 70 MPa için 55 sertlikte, 90 MPa için ise 60 sertlikte pedler denenmiştir. 70 MPa dayanıma sahip numunelerde, en yüksek dayanım sonuçlarının elmas testere ile kesme + kükürt ile başlıklama yönteminden elde edildiği, en düşük dayanım sonuçlarının ise yalnız ped başlıklama yönteminden elde edildiği rapor edilmiştir. 90 MPa dayanıma sahip beton numunelerde, öğütme + kükürt ile başlıklama yönteminin en yüksek basınç dayanımını verdiği ve ped ile başlıklama yönteminin ise en düşük basınç dayanımı değerlerini verdiği tespit edilmiştir.

Gök (2010)'da belirtildiği üzere Lessard *et al.* (1993) tarafından Ø100×200 mm ve Ø150×300 mm boyutlu beton silindir numuneler üzerinde bir çalışma yapılmıştır. Silindir numunelere başlık yapımında yapılan hataların basınç dayanımı sonuçlarını etkileyeceğini ve bu nedenle 100 MPa dayanımın üzerindeki silindir numunelerde başlıklama için mutlaka öğütme yönteminin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Eggers and Torres (2006)'da belirtildiğine göre Pistilli ve Willems (1993) tarafından yapılan bir çalışmada kükürt başlıklar ile bağlanmamış polimer (kauçuk) pedler karşılaştırılmıştır. Yüksek dayanımlı betonlarda (yaklaşık 70 MPa ve üzeri) kükürt başlıkların basınç dayanımının ölçümünde daha yüksek bir saçılma (değişkenliğe) yol açabileceği belirtilmiştir. Ayrıca yaklaşık 70 MPa üzerindeki beton numuneleri test etmek için başlık yapımında taşlama işleminin yapılmasını önermişlerdir. Elde edilen dayanım sonuçlarının tutarlılığı için numune yüzeyinin başlıklanmasına özel dikkat gösterilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Boulay ve Larrad (1993) tarafından yapılan çalışmada ise yüksek dayanımlı betonları test etmek için Fransa'da kum kutusu (sand box) yöntemi geliştirilmiştir. Bağlanmamış pedler için kullanılabenzer 2 çelik başlık kullanılarak içerisi kumla doldurulmuş ve kumun başlık içerisinde iyi bir şekilde merkezlenmesi sağlanarak silindir ile çelik başlık arasına parafin conta uygulanmıştır.

French ve Makhtarzadeh (1993) tarafından yapılan bir çalışmada yüksek mukavemetli beton silindirlerde taşlama, bağlanmamış pedler ve yüksek mukavemetli kükürt bileşiği

karşılaştırılmıştır. Bu üç başlıklama yönteminde basınç dayanımlarında %1’lik farklar olduğu belirlenmiştir. Taşlama yöntemi ile başlıklamanın maliyetli olduğunu belirtmişlerdir. 28 günlük Ø100×200 mm numunelerde 62-109 MPa dayanım sınıfında neopren ped ile başlıklanan numunelerin daha şiddetli kırıldığını gözlemlemişlerdir.

Larrad *et al.* (1994) ise silindir numunelerin başlıklanmasında en yaygın yöntemin silindirleri uygun bir malzeme ile başlıklamak veya öğütmek olduğunu, kullanılan kükürt harcının 60-70 MPa ile sınırlı olduğunu ve yüksek mukavemetli beton numunelerin başlıklanması için uygun olmadığını belirtmişlerdir. Yüksek mukavemetli silindir beton numunelerin başlıklanmasında kum kutusu (sand box) yönteminin bu yüzden geliştirildiğini belirtmişlerdir.

Carino *et al.* (1994) tarafından yılında yapılan çalışmada taşlama yöntemi ile silindir numune başlık yapımının kükürt başlıklardan ortalama %2,1 daha yüksek dayanım sonuçları verdiği belirtilmiştir. Taşlama yönteminin 45 MPa dayanım sınıfı beton numuneler için istatistiksel olarak anlamlı olduğu ileri sürülmüştür. Daha yüksek dayanımlı betonlarda (90 MPa) taşlama yöntemi ile yapılan başlıkların kükürt başlıklardan ortalama %6 daha yüksek dayanım sonuçları verdiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada başlık kalınlıklarının 4 mm’den az olduğu ve daha kalın başlıkların kullanılmasının dayanım farkını artıracak ileri sürülmüştür.

Lobo *et al.* (1994) ise çimento hamuru, kükürt ve öğütme ile başlıklama yöntemlerini karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda, çimento ile başlıklama yönteminin öğütme ile başlıklama yönteminden %1 daha yüksek, basınç dayanımı testinden 2 saat önce kükürt harcı ile başlıklama yapılan numunelerin öğütme ile başlıklama yönteminden %2-7 daha düşük dayanım sonuçları verdiğini bulmuşlardır. 120 MPa dayanım sınıfındaki numunelerde, testten 7 gün önce kükürt başlıklama yapılan numunelerin öğütme ile başlıklama yöntemi ile benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.

Auburn Üniversitesi’nde yapılan bir çalışmada basınç dayanımının belirlenmesi için Ø100×200 mm’lik numunelerde neopren pedlerin kükürt başlıklı numunelerden yaklaşık olarak %9,6, Ø150×300 mm’lik numunelerde ise %4,6 oranında daha fazla dayanım ürettiği belirlenmiştir (Vandegrift and Schindler 2005).

Eggers ve Torres (2006) tarafından yapılan bir çalışmada yüksek dayanımlı betonların başlıklanması üzerine odaklanılmıştır. Başlıklama için taşlama ve bağlanmamış 70 durometre sertlikte pedler kullanılmıştır. Sonuç olarak; yaklaşık 40-70 MPa dayanıma sahip betonlarda başlıkların dayanımlarında önemli farklar bulunamamıştır. Yaklaşık 55 MPa ve 80 MPa

dayanıma sahip betonlarda taşlama yöntemi, bağlanmamış pedlere göre önemli derecede daha düşük, yaklaşık 40 MPa dayanıma sahip betonlarda ise taşlama daha fazla dayanım üretmiştir.

Park ve Suh (2008) tarafından yapılan bir çalışmada kum başlıklama, neopren başlıklama ve kükürt başlıklama yöntemlerini karşılaştırılmıştır. Kum başlıklamanın standart sapmasının ve dayanımdaki dağılımının kükürt başlıklama ve neopren başlıklara göre daha az olduğu belirtilmiştir. Neopren başlıklama yapılan numunelerin dayanımlarının kükürt başlıklama yapılan numunelerin dayanımlarından daha fazla olduğunu, kum başlıklama ile yapılan numunelerin dayanımlarının ise en yüksek olduğunu belirtmişlerdir. 20-80 MPa arasında dayanıma sahip olan beton numunelerde çalışmışlar ve kum başlıklama yönteminin hem düşük dayanımlı hem de yüksek dayanımlı betonun basınç dayanımını tahmin etmede daha güvenilir olduğunu belirtmişlerdir.

Chowdhury *et al.* (2013) tarafından yapılan bir çalışmada kum başlıklama ve kükürt başlıklama karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak; Ø150×300 mm boyutundaki 28 gün kür edilmiş numunelerde kükürt başlığın kum başlıklama ile hazırlanan numunelerden yaklaşık % 19 daha yüksek dayanım sonuçları verdiği, 7 günlük üretilmiş numunelerde kükürt başlıklı numunelerin yaklaşık % 34 daha yüksek dayanım sonuçları verdiği ileri sürülmüştür. Ø100×200 mm boyutundaki 28 gün kür edilmiş numunelerde ise kükürt başlığın kum başlıklama ile hazırlanan numunelerden yaklaşık % 17 daha yüksek dayanım sonuçları verdiği, 7 günlük üretilmiş numunelerde kükürt başlıklı numunelerin yaklaşık % 29 daha yüksek dayanım sonuçları verdiği rapor edilmiştir.

Dumitru *et al.* (2014), 45 MPa dayanıma sahip numunelerde kükürt ile başlıklama ve öğütme ile başlıklama yöntemleri arasında neredeyse hiç bir farklılığın olmadığını ileri sürmüştür. Ancak, yüksek dayanımlı beton numuneler üzerinde yapılan çalışmada öğütme yönteminin %1-3 daha yüksek basınç dayanımı sonuçları verdiğini belirtmiştir. Kükürt ile başlıklama yönteminin kauçuk ped ile başlıklama yöntemine göre 60 MPa dayanıma sahip beton numunelerde %2, 110 MPa dayanıma sahip beton numunelerde ise %7 daha fazla dayanım sonuçları verdiğini tespit etmiştir. Kükürt ile başlıklama ve kauçuk ped ile başlıklama yöntemleri için 60 MPa dayanımına sahip numunelerin testinde daha makul sonuçlar elde edilebileceğini ve daha yüksek dayanımlı betonlarda kauçuk ped ile başlıklama yönteminin kullanılmasını önermemişlerdir. Daha yüksek dayanımlı betonlarda kükürt ile başlıklama yönteminde başlıklama bileşiğinin dayanımının test edilmesini, uygunsa kullanılabileceğini ve başlık kalınlığının 1-2 mm olmasını önermişlerdir. 60-110 MPa arasındaki tüm dayanım dereceleri için öğütme ile başlıklama yönteminin güvenilir sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Aydın vd (2017) tarafından yapılan bir çalışmada kartonpiyer alçısı (farklı oranlarda mermer tozu eklenerek) ve kükürt + grafit tozu ile yaptığı başlıklama sonuçları karşılaştırılmış ve %10 mermer tozu + %90 alçı karışımının, kükürt + grafit tozu karışımı ile yapılan başlıklardan %14 daha iyi dayanım sonuçları verdiğini rapor etmiştir.

Baylavlı ve Gödek (2019) tarafından yapılan çalışmada ise kükürt ile başlıklama ve neopren ped ile başlıklama yöntemlerini kullanarak numunelerin dayanımları karşılaştırılmıştır. Silindir beton numunelerde bu iki başlıklama yöntemi numunenin tek ucunun veya çift ucunun başlıklanması yapılarak uygulanmıştır. Kükürt ile başlıklamada tek veya çift başlık yapılması durumunda basınç dayanımında belirgin farklar oluşmadığı belirlenmiştir. Neopren başlıklamada ise numunenin her iki ucunun da başlıklanması durumunun tek ucunun (perdah yüzeyi) başlıklanması durumundan daha yüksek dayanım sonuçları verdiği belirtilmiştir. Neopren ped ile başlıklama yönteminin tek ve çift uç başlıklama koşullarının her ikisinde de kükürt ile başlıklama yönteminden daha iyi basınç dayanımı sonuçları verdiği tespit edilmiştir.

Lerner *et al.* (2020) tarafından yapılan bir araştırmada farklı başlıklama yöntemleri karşılaştırılmış ve 7 ile 28 günlük dayanım sonuçlarında taşlama ile silindir beton numunelerin başlıklanması yönteminin her iki kür süresinde de en yüksek dayanım sonuçlarını verdiği belirlenmiştir.

Silindir Numunelerin Başlıklanmasında Kullanılan Yöntemler

Eksenel basınç testinin uygulanması için silindirik beton numunelerinin uç yüzeyleri düz, birbirine paralel ve pürüzsüz olmalıdır. Böylece numune yüzeyine uygulanan yükün uniform bir şekilde dağılması mümkün olabilecektir. Numune üzerindeki düzensizlikler; eşit olmayan yüklemelere, eksantrisiteye yol açacak, sonuç olarak da beton numunelerin basınç dayanımında bir düşüşe neden olabilecektir (Medeiros *et al.* 2017).

Silindir numuneler, basınç dayanımı testinden önce farklı başlıklama yöntemleri ile başlıklanmaktadır. Bağlanmış, bağlanmamış ve mekanik aşındırma olarak kategorize edilen bu yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

Bağlanmış başlıklama yöntemleri

Numune yüzeyine fiziksel veya kimyasal olarak yapışıp düzenli bir tabaka oluşturan malzemeler kullanılarak yapılan başlıklama yöntemleridir. Yerleştirilmesi ve dayanım kazanması için belli bir süreye ihtiyaç duyulan başlıklama malzemeleri kullanılır. Genellikle kükürt, çimento, alçı vb. malzemeler kullanılır (Medeiros *et al.* 2017; Gawatre *et al.* 2017).

Kükürt ile başlıklama yöntemi

Çabuk erimesi, hızlı soğuması ve başlıklama işleminin kısa sürmesi nedeni ile silindir beton numunelerin başlıklanmasında uzun yıllardır yaygın olarak kullanılan bir başlıklama yöntemidir. ‘Geçmişten günümüze başlıklama’ başlığı altında verilen bilgilerden de görüldüğü üzere genellikle hazır kükürt karışımlarının yanı sıra kükürt + silis kumu, kükürt + silis kumu + grafit, kükürt + filler malzeme vb. gibi farklı malzemelerin farklı oranlarda kullanılması ile oluşan karışımlar kullanılmıştır.

Genellikle yüksek dayanımlı betonun basınç dayanımının bulunmasında kükürt başlıklama kullanılmasının basınç dayanımının olduğundan daha az tahmin edilmesi nedeniyle daha yüksek dayanımlı kükürt karışımlarına ve alternatif başlıklama sistemlerine olan ilgi artmıştır (Park *et al.* 1998). ASTM C617 (Anonymous 2015) standardı da yaklaşık 35 MPa ve üzeri dayanıma sahip silindir numuneleri başlıklarken eski kükürt malzemesinin kullanılmamasını, yeni kükürt malzemesinin eritilerek kullanılmasını önermiştir (Clason 2021). TS EN 12390-3 (Anonim 2019a) ise kükürt ile başlıklama yönteminin 50 MPa basınç dayanımı sınırına kadar kullanılabileceğini belirtmiştir.

Kükürt ile başlıklanacak numunelerin başlıklamadan önce yüzeylerinin kuru ve temiz olması gerektiği bildirilmiştir (Anonim 2019a; Clason 2021). Hazırlanan kükürt bileşiği için bir eritme potası vasıtası ile yeterli sıcaklıkta (yaklaşık 130°C-145°C) eritilmesi ve erime sırasında sürekli karıştırma işlemi yapılarak topaklanma ve tabanda katı birikiminin önlenmesi, homojen bir başlık elde edilmesi için önemlidir. Kükürtün parlama noktası yaklaşık olarak 207 °C olduğu ve parlama noktası sıcaklığının üzerine çıkılması durumunda aniden tutuşabileceği belirtilmektedir. Erimiş kükürt, hidrojen sülfür gazı salınımı yaparak sağlık açısından çeşitli sorunlara yol açabilmektedir. Bu yüzden başlıklama yapılan alanın havalandırılması gerekir (Clason 2021).

TS EN 12390-3 (Anonim 2019a) standardına göre kükürt bileşiğinin eritilmesi işleminden sonra bir yerleştirme cihazı (numune diktliğini sağlamak için) ve bir başlık aparatı (numune çapından biraz daha büyük ve istenilen başlık kalınlığı derinliğinde) kullanılmaktadır. Başlıklama aparatının kükürt ile herhangi bir reaksiyona girmeyen metal veya taştan yapılmış olması önerilmektedir. Numunenin başlıklamadan sonra başlık aparatından kolay bir şekilde çıkarılması için başlık aparatı yağlanmaktadır. Yağlanmış başlık aparatı yerleştirme cihazına konumlandırılarak erimiş kükürt başlık aparatına bir kepçe yardımı ile döküldükten sonra numune dik bir şekilde yerleştirme cihazına yaslanarak başlık aparatındaki erimiş kükürt içerisinde bastırılarak erimiş kükürt sertleşinceye kadar beklenir. Çok kısa bir süre içerisinde sertleşme gerçekleşir ve numune başlık aparatından çıkarılıp

kenarlarındaki fazlalıklar alınarak küçük bir metal yardımıyla kükürt başlık üzerine yavaşça vurularak boşluk olup olmadığının kontrol edilmesi gerektiği, boşluk olması durumunda başlığın numuneden çıkarılarak tekrar yapılması gerektiği belirtilmiştir. Kükürt başlık mümkün olduğu kadar ince olmalı, kalınlığı 5 mm'yi geçmemelidir.

Başlıklamadan sonra basınç testine kadar başlıklı numunenin TS EN 12390-3 (Anonim 2019a)'da en az 30 dakika bekletilmesi gerektiği önerilmektedir. ASTM C 617 (Anonymous 2015) standardında ise en az 2 saat bekletilmesi gerektiği tavsiye edilmektedir (Clason 2021).

1944'de yapılan bir çalışmada numunelerin başlıklanmasında farklı kükürt bileşikleri kullanılarak kükürt başlıklar yapılmış ve örnekler farklı sürelerde basınç dayanımı testine tabi tutulmuşlardır. En iyi beton dayanımı sonucu için kükürt başlıkların basınç dayanımı testinden önce 1 saat bekletildiği örneklerde elde edilmiştir (Carino *et al.* 1994). Başka bir çalışmada ise bir kısım uçucu kül ve altı kısım kükürt karışımı ile beton numuneler başlıklanmıştır. Oluşan bu karışım ilk olarak yaklaşık 230°C - 260°C arasında ısıtılmış, daha sonra sıcaklığı yaklaşık 93°C de tutarak başlıklama işlemi yapılmıştır. Sonuç olarak, başlıklamanın hızlı ve ekonomik olduğunu ve AASHTO gereksinimlerine uygun tatmin edici sonuçlar aldıklarını belirtmişlerdir (Faber *et al.* 1970).

Baylavlı ve Gödek (2019) ise kükürt başlıklama yöntemi kullanılarak silindir beton numuneleri hem tek yüzeyi (perdah yüzeyi) hem de numunenin iki yüzeyi olmak üzere başlıklama yapmışlardır. Tek ve çift yüzeyine başlıklama yapılan numunelerin basınç dayanımları arasında belirgin bir fark oluşmadığı, ancak çift başlıklama yapılan numunelerde standart sapmanın daha düşük değerler aldığını belirlemişlerdir.

Alçı ile başlıklama yöntemi

Bu yöntemde, alçı ve su istenilen oranlarda karıştırılarak macun kıvamına getirip silindir beton numune üzerine dökülür. Silindir numune en az 6,5 mm kalınlığında ve çapından 25 mm daha büyük çapa sahip bir cam plaka kullanılarak kapatılır. Cam plaka, alçının yapışmasını engellemek için yağlanır. 20-30 dakika sertleşmesi için bekletilir. Böylece basınç testi için numune hazır hale getirilir (Suryakanta 2015). Alçı ile başlıklama yapılan numunelerde başlığın yumuşayıp bozulmaması için su ile temas etmemesi veya nemli bir odada çok kısa sürelerden fazla saklanılmaması gerektiği bildirilmiştir (Anonymous 2012). Günümüzde alçı ile başlıklama yöntemi için yüksek dayanımlı alçılar kullanılmaktadır. Yüksek dayanımlı alçıların 40 dakikada yaklaşık 62 MPa dayanıma ulaşabileceği belirtilmektedir (Chang 2007). Bu tür alçılar su ile karıştırıldığında 30 dakika içerisinde 35-

63 MPa arasında bir dayanıma ulaşabilmektedir. Bu alçılar ASTM C617 ve IS 516 standartlarında geçmektedir (Anonymous 2021). ASTM standartları, yüksek dayanımlı alçı sıvanın su oranının ve yaşının 5 cm'lik küp numunelerin basınç dayanımı üzerinde etkilerini belirlemek için yeterlilik testi yapılmasını önermektedir. Düşük dayanımlı Paris alçısının başlıklama için uygun olmadığı belirtilmektedir (Anonymous 2012).

Saucier (1972), yüksek mukavemetli alçı sıva ile yapılan başlıkların yaklaşık 50-70 MPa arasında basınç dayanımına sahip olan betonlara başlık yapılması için tatmin edici olduğunu, Paris alçısının yalnızca düşük dayanımlı betonun gereksinimlerini karşıladığını ileri sürmüştür.

Chang (2007) tarafından yapılan bir çalışmada alçı sıva ile başlıklamanın dikey ve yatay açıdan tam bir düzlük sağlamasının en iyi başlıklama yüzeyi koşulunu sağlayabileceği, kararlı ve tutarlı veriler elde edilebileceği ve insan dostu bir uygulama olduğu belirtilmiştir. Yüksek dayanımlı alçı, saf kükürt ve neopren ped kullanılarak yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Çalışmada alçı ile başlıklama yapılan beton numunelerin ortalama dayanımlarının en yüksek ve standart sapmalarının en düşük çıktığı ifade edilmiştir. Alçı ile başlıklanan numunelere göre saf kükürt başlıklı numunelerin basınç dayanımı %7, neopren ped ile başlıklanan numunelerin basınç dayanımları ise %23 daha düşüktür.

Gawatre *et al.* (2017) ise beton numuneleri alçı ile başlıklamanın iyi bir başlıklama yöntemi olduğu, bunun yüksek akışkanlık özelliği ve hızlı sertleşip hızlı dayanım kazanmasından kaynaklandığını bildirmiştir.

Tablo 2. Alçı, Saf Kükürt, Neopren Ped Başlıklarının Karşılaştırması

	Alçı	Saf Kükürt	Ped
İnsan Dostu	Zarar Yok	Yüksek zehirli	Zarar Yok
Basınç Tekdüzeliliği	Yüksek	Orta	Düşük
Veri Doğruluğu	Yüksek	Orta	Düşük
Yüzey Durumu Basınç Testinden Sonra	İyi	Çatlak	Periyodik Kullanımdan Sonra Çatlak
Yüzey Durumu Basınç Testinden Sonra	İyi	Çatlak	Periyodik Kullanımdan Sonra Çatlak
Ortalama Çalışma Süresi	2 Dakika	5 Dakika	1 Dakika
Sertleşme Süresi	30 Dakika	1 Saat	Gerek Yok
Çalışma Aralığı	0-62 MPa	0-20 MPa	0-62 MPa

Aydın vd (2017) tarafından yapılan başka bir çalışmada da kartonpiyer alçısına %10, %20, %30, %40, %50 oranlarında mermer tozu eklenerek bir karışım elde edilmiş ve silindir

beton numunelere başlıklama yapıp kükürt + grafit tozu ile yapılan başlıklar ile karşılaştırılmıştır. 5×5×5 cm boyutundaki numuneler ile yapılan basınç dayanımı testinde kükürt + grafit 16,8 MPa, kartonpiyer alçı 9,3 MPa çıkmış iken %10 mermer tozu + %90 kartonpiyer alçısı 9,5 MPa bulunmuştur. Alçının basınç dayanımı kükürt + grafit tozuna göre düşük olmasına rağmen silindir beton numunelere ince başlıkların yapılması durumunda yüzeye homojen dağılabildiği ve verimli sonuçlar alındığı belirtilmiştir. 28 günlük basınç dayanımı testinde %10 mermer tozu katılan ve sadece kartonpiyer alçısı ile yapılan başlıklı numunelerin kükürt + grafit tozu ile başlıklama yapılan numunelerden yaklaşık %14 daha fazla dayanım sonuçları vermiştir.

Çimento ile başlıklama yöntemi

Çimento ile beton numunelere başlıklama yapılması yöntemi uzun yıllardan beri kullanılmaktadır. 1920'li yıllarda çimento hamuru, standart bir başlıklama yöntemi olarak göz önünde bulundurulmaktaydı (Carino *et al.* 1994; Eggers and Torres 2006).

TS EN 12390-3'de (Anonim 2019a), TS EN 197-1'e (Anonim 2012) uygun olan çimentoların, çimento harcının dayanımının en az beton numunenin dayanımı kadar olması şartı ile başlık malzemesi olarak (50 MPa dayanıma kadar) kullanılmasına izin verilmektedir. ASTM C 617'de (Anonymous 2015) ise çimento başlıklarının 5×5×5 cm'lik küp numuneler üzerinde basınç dayanımı bakımından yeterlilik testleri yapılarak kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Düşük dayanımlı Portland çimentolarının kullanılmasının uygun olmadığına dair bilgiler de vardır (Anonymous 2012).

Bu çalışmada silindir beton numunelerinin başlıklanmasında kalsiyum alüminatlı çimento kullanılmıştır. Bu nedenle, her ne kadar bu alt başlık altında verilebilecek ise de, bu çimento türü ile yapılan başlıklama ile ilgili ayrıntılı bilgilerin ayrı bir alt başlıkta verilmesi daha uygun bulunmuştur.

Kalsiyum alüminatlı çimento ile başlıklama yöntemi

TS EN 12390-3'e (Anonim 2019a) göre kalsiyum alüminatlı çimento ile başlıklama yapılırken numunenin başlıklanacak yüzeyinin temiz ve nemli olması ve başlıklamadan sonra da numune kür işlemine tabi tutulması gerektiği belirtilmektedir. Kalsiyum alüminatlı çimento harcının hazırlanmasında 3 kısım kalsiyum alüminat çimentosu ve 1 kısım (ISO-3310-1'e uygun olan çoğunluğu 300 µm elekten geçen) kum kullanılarak bir karışım hazırlanır ve belirli bir su/çimento oranında su ile karıştırılarak harç oluşturulur. Numune uç yüzeyine çelik bir kelepçe geçirilir. Çelik kelepçe başlığın ince olması ve 5 mm'yi geçmemesi için ayarlanarak sıkıştırılır. Hazırlanan kalsiyum alüminatlı çimento harcı numune yüzeyine

dökülür. Yağlanmış bir cam plaka ile harç, numuneye sabitlenen çelik kelepçe üst yüzeyine kadar döner hareketlerle yerleştirilir. Kullanılan cam başlık üzerinde bırakılarak başlıklanmış numune kür işlemi için (yeterli dayanıma kavuşması için) bağıl nemi en az %95, sıcaklığı 20 ± 5 °C olan ortamda bekletilir. Yapılan başlıklamanın yeterli dayanıma ulaşması sonucu silindir beton numune basınç dayanımı testi için hazır hale getirilmiş olur. Başlık kalınlığının 5 mm'yi geçmemesi, ancak küçük mertebede bölgesel kalınlık sapmalarına izin verilebileceği belirtilmektedir. Anılan standart, kalsiyum alüminatlı çimento ile başlıklama yönteminin de 50 MPa basınç dayanımı sınırına kadar kullanılabileceğini belirtmiştir.

Carino *et al.* (1994)'te belirtildiği üzere Adams (1927) tarafından yapılan bir çalışmada alüminli çimento ve ince kum harcı ile silindir numunelere başlıklama yapmıştır. Araştırmacı, silindir numunelerin baş kısımlarına bir yaka yerleştirerek yakaların içerisine alüminli çimento harcı doldurmuş ve bir cam levha ile bastırarak fazla harcı çıkarmıştır. 19-24 saat bekletildikten sonra da yakalar çıkarılmış ve deneyden önce numuneler 48 saat su küründe bekletilmiştir.

Bağlanmamış başlıklama yöntemleri

Numune yüzeyi ile fiziksel veya kimyasal olarak yapışmayan bir yastık malzemesi kullanılarak başlıklama yapılan yöntemlerdir. Genellikle yerleştirilmesi ve dayanım kazanması için belli bir zamana ihtiyaç duyulmayan başlıklama malzemeleri kullanılır. Genellikle neopren ped ve kum yastık malzemesi olarak kullanılır ve bir sınırlayıcı halka içerisinde numune uç yüzeylerine yerleştirilerek başlıklama işlemi yapılır (Medeiros *et al.* 2017; Gawatre *et al.* 2017).

Neopren (Polikloropren) pedler ile başlıklama yöntemi

Bu yöntem genellikle kükürt ile başlıklama yöntemine bir alternatif olarak önerilmektedir. Beton numunelerin başlıklama işleminin daha kısa sürede yapılması, başlık malzemelerinin tekrar tekrar kullanılması ve ekonomik olması açısından önemli avantaj sağlamaktadır (Eggers and Torres 2006). Ancak, bu yöntem, Türk standartlarında yer almamakta, özellikle, ASTM ve AASHTO standartlarında kullanımına izin verilmektedir.

ASTM C617 (Anonymous 2015) ve ASTM C1231 (Anonymous 2017) standartları silindir numunelere uygulanacak olan başlıklama işlemlerinde silindir numunenin her iki ucu için de aynı başlıklama yönteminin uygulanması gerektiğini belirtmektedir. Başlıklama yapılacak numunelerin her iki başlık yüzeyinin de eksene dikliğinin $0,5^\circ$ den fazla bir sapmanın olmaması ve silindir düzeyinde 5 mm'den fazla girintilerin olmaması şartlarını karşılaması durumunda silindir beton numune yüzeyleri neopren ped ile başlıklanabileceği

belirmiştir. Aksi takdirde kesme ve taşlama (öğütme) ile başlıklanması gerektiği belirtilmiştir. (Anonymous 2014).

Neopren ped ile yapılan başlıklama yöntemi için; iki adet çelik başlıklama aparatı ve çelik başlıklama aparatı çapından daha küçük bir çapa sahip olan iki adet kauçuk malzemeden üretilmiş (silindir numunenin basınç dayanımı aralığına göre farklı sertliklerde önerilen) pedler kullanılmaktadır. Çelik başlık aparatından daha küçük çapa sahip olan pedler, çelik aparatlarının içerisine yerleştirilir, başlıklar da numune uçlarına yerleştirilir ve basınç testi yapılır.

Michigan Ulaştırma Bölümü tarafından AASHTO T22: Standard Method of Test for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens kapsamında 35 eyalette neopren kullanımı ile ilgili araştırmacılara anket yapmış ve 18 eyalet anket sonuçlarına cevap verirken bunlardan 15'i neopren ped ile başlıklama yönteminin performansından memnun olduklarını belirtmiştir. Ayrıca neopren pedlerin 100 teste kadar kullanılmasını, alüminyum yerine çelik başlık kullanılmasını ve yaklaşık 40 MPa dayanım üstündeki silindirlerde kullanılmasının yasaklanmasını önermişlerdir (Anonymous 1994). Neopren pedler de erken oluşan çatlak (ASTM C 1231'e göre 10 mm den fazla) veya bozulma durumlarında 100 teste kadar kullanımına bakılmaksızın değiştirilmesi gerektiği de bildirilmiştir. ASTM C 1231'de (Anonymous 2017) bu başlıklama yöntemi için farklı basınç dayanımları aralıklarında farklı sertlikte kullanılması önerilen neopren pedler Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Neopren Ped Kullanımı İçin Gereksinimler (Anonymous 2017)

Basınç dayanımı (MPa)	Durometre sertlik	Yeterlilik testi gerekli mi?	Yeniden kullanma (maksimum)
10-40	50	Hayır	100
17-50	60	Hayır	100
28-50	70	Hayır	100
50-80	70	Gerekli	50
>80	-	İzin verilmez	-

Özyıldırım (1982) tarafından yapılan bir çalışmada neopren pedler ile kükürt başlıklama yöntemleri karşılaştırılmış ve 34 MPa'lık dayanıma sahip numunelerin dayanımlarının her iki yöntemde de yaklaşık olarak eşit çıktığı belirtilmiştir. 34 MPa'ın altındaki beton numunelerde neopren ped ile başlıklama yönteminin kükürt başlıklama yöntemine göre daha düşük (neopren pedlerin gerilmesinden ve akmasından kaynaklı), 34 MPa dayanımının üzerindeki numunelerde ise neopren ped ile başlıklama yönteminin daha

yüksek (neopren pedlerin akmasının kısıtlamasından kaynaklı) dayanım sonuçları verdiği ileri sürülmüştür.

Başka bir çalışmada (Park and Suh 2008) ise 21 MPa, 34 MPa ve 70 MPa dayanımlı beton numunelere neopren ped ve kükürt harcı ile başlıklama yöntemleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlarda 21 MPa ve 34 MPa dayanımına sahip olan numunelerde neopren ped ile kükürt harcı yönteminin hemen hemen aynı, 70 MPa dayanımındaki numunelerde ise neopren ped ile başlıklama yönteminin kükürt harcı ile başlıklama yönteminden %3 daha fazla basınç dayanımı sonucu verdiği rapor edilmiştir. Beton numunelerin dayanımının artması ile farkın daha da arttığı ileri sürülmüştür.

Baylavlı ve Gödek (2019) ise neopren pedler kullanılarak silindir beton numunelere tek ve çift başlıklar yapılmış ve kükürt başlıklama yöntemi ile karşılaştırılmıştır. 50 durometre sertlikte neopren pedler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre neopren başlıklamanın kükürt ile başlıklamadan daha yüksek basınç dayanımları verdiği belirlenmiştir. Ayrıca çift uç başlıklamanın tek uç (perdah yüzeyi) başlıklamalarına göre daha yüksek dayanım sonuçları verdiği tespit edilmiştir. Gerek kükürt gerek ise neopren başlıklama yöntemlerinde numunenin her iki uç yüzeyinin de başlıklanması gerektiğini önermişlerdir.

Kum ile başlıklama yöntemi

Kum ile silindir beton numunelerin başlıklanması yöntemi nadir çalışmanın yapıldığı bir yöntemdir. Neopren ped ile silindir numunelerin başlıklanması yöntemine benzerlik göstermektedir. Neopren ped ile başlıklama da kullanılan çelik başlık aparatları kullanılarak ve ped yerine ise kum kullanılarak yapılan bir başlıklama yöntemidir. Bu yöntem ilk defa 1926 yılında Purrington ve McCormick tarafından yapılan bir çalışmada ele alınarak yaklaşık 60 mm çapındaki bir başlık aparatın içerisine kum yerleştirilerek deneyler yapılmış, neticede çimento hamuru ile başlıklama yöntemi ile karşılaştırılabilir sonuçlar verdiği belirlenmiştir (Carino *et al.* (1994) ve Eggers and Torres (2006)).

Park and Suh (2008) tarafından yapılan araştırmada ise 100×200 mm boyutlarındaki silindir numuneler kullanılmış ve 21-70 MPa arasında dayanımlarına sahip numunelerin sadece perdah yüzeylerine kum başlık ile başlıklama işlemi uygulanmıştır. Deney esnasında perdah yüzeyine yapılan başlık, alt tarafa gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Sonuç olarak kum ile başlıklama yapılan numunelerin standart sapma ve mukavemet dağılımları diğer başlıklama yöntemlerine (neopren ped ve kükürt harcı) göre düşük çıkmıştır. En yüksek standart sapma ve dağılım dikkate alındığında kum ile başlıklama yönteminin hem normal

hem de yüksek dayanımlı betonun basınç dayanımını belirlemede daha güvenilir ve doğru olduğunu belirtmişlerdir.

Kum kutusu (sand box) ile başlıklama yöntemi

Bağlanmamış başlıklama yöntemlerine bir alternatif olarak geliştirilmiştir. Kum kutusu ile başlıklama yöntemi ilk olarak yüksek performanslı beton numunelerin başlıklanması amacı doğrultusunda kullanımı yaygınlaşmıştır. Yüksek performanslı betonun dayanımının mevcut bağlanmış başlıklama yöntemleriyle ölçülmesinin tatmin edici sonuçlar vermemesinden dolayı neopren pedler ile ölçülmesi denemeleri yapılmış ve neopren pedler yüksek performanslı betonun başlıklanması işleminde 5-10 kullanımından sonra sürekli değiştirilmesi uzun vadede oldukça pahalı hale gelmiş ve eksantrisite sorun haline gelmiştir. Yüksek dayanımlı betonun basınç dayanımının ölçülmesi için 1993 yılında Fransa'da kum kutusu yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem standart Ottawa kumu kullanılarak yapılmıştır (Aitcin 1998). 1996 yılında ABD Ulaştırma Bakanlığı Federal Otoyol İdaresi yayınladığı bir raporda yüksek performanslı betonun giderek daha fazla kullanılmakta olduğunu ve bağlanmış başlıklama sistemlerinin tartışmalı olduğunu bildirmiştir (Anonymous 1996). Nitekim 1993 yılında yapılan Pont de Normandie köprüsünde (Fransa) kullanılan yüksek performanslı betondan 3000 adet silindir numune kum kutusu ile başlıklama yöntemi kullanılarak test edilmiştir (Larrard *et al.* 1994). Kapalı kumun mukavemetinin sınırı yok gibi olduğundan kum kutusu yöntemi ile başlıklamanın teorik olarak daha güvenli olduğu ifade edilmiştir (Anonymous 1996).

Yapılan deneysel çalışmalar kum kutusu ile başlıklama yönteminin silindir numunelerin alt ve üst yüzeylerinde yükün çok daha düzgün dağılımını sağladığı, numune yüzeylerindeki yerel kusurları ortadan kaldırdığı ve diğer başlıklama yöntemlerine göre numune sonuçlarının istatistiksel dağılımının daha konsantre olduğunu göstermiştir (Ajdukiewicz and Radomski 2002).

Kum kutusu yöntemi ile silindir numunelere başlık yapılması ile ilgili TS EN 12390-3'da (Anonim 2019a) aşağıdaki paragrafta verilmiştir.

Başlıklanacak numune yüzeyleri temizlenmelidir. Daha sonra çelik (akma dayanımı en az 900 MPa olan) kum kutusu vibratörlü yerleştirme cihazına yerleştirilerek cihaza sabitlenir. ISO 3310-1'e uygun olan çoğunluğu 250 µm geçen, 125 µm elekte kalan ince silis kumu kullanılarak kum çelik kum kutusunun merkezine yayılmadan dökülmelidir. Başlıklanacak olan numune, merkezi kum dolu olan çelik kum kutusu içerisine yerleştirilir. Numune dikliğinin bozulmaması için numune bir kelepçe yardımıyla yerleştirme cihazına sabitlenir

ve vibratör 20 ± 5 saniye süre aralığında çalıştırılarak kumun homojen dağılması ve sıkışması sağlanır. Daha sonra eritilmiş parafin (silindirin açık olan kenarlarından kumun dökülmesini engellemek için) çelik kum kutusunun açık kalan kenarlarına dökülerek kısa bir sürede sertleşmesi beklenir ve aynı işlem diğer numune ucu için de yapılarak numune basınç dayanımı testine hazır hale getirilir. Çelik kum kutularını basınç dayanımından sonrası numuneden çıkartmak için çelik kutuların yan yüzeylerinde bulunan ince deliklere basınçlı hava verilerek kolayca çıkartılır.

TS EN 12390-3'da (Anonim 2019a) kum kutusu ile başlıklama yönteminin hangi aralıktaki dayanıma sahip numuneler için uygun olduğuna dair bir bilgi bulunmamaktadır.

Mekanik aşındırma sistemleri ile başlıklama yöntemleri

Mekanik aşındırma yöntemleri ile silindir numunelere başlık yapımında elmas diskler kullanılır. Bu yöntemler ile silindir numunenin üst kısmından ince bir malzeme tabakası çıkarılarak başlıklama işlemi yapılır. Bu başlıklama sonucunda numune üzerindeki düzlük kusurunun 0,05 mm den daha fazla olmaması gerektiği belirtilmiştir. Bu yöntemde kesme ve taşlama gibi makineler kullanılarak başlıklama işlemi daha hızlı ve kolay hale getirilebilir (Medeiros *et al.* 2017).

Öğütme (taşlama) ile başlıklama yöntemi

Beton silindirlerin basınç dayanımlarını test etmek için öğütme ile başlık yapılması yöntemi yaygın kullanılan standart bir başlıklama yöntemidir. Bu başlıklama yönteminin ilk yatırım maliyeti önemli ölçüde yüksek ve sürekli bakım gerektirir. Çünkü numune başlık kısımlarında öğütme cihazı başlığının kusurlarından dolayı pürüzlü bir yüzeyin oluşmasına neden olabileceği belirtilmektedir (Chang 2007).

TS EN 12390-3 (Anonim 2019a), öğütme ile başlıklama yönteminin de hangi dayanıma sahip numunelerde kullanılacağına dair bir sınırlama koymamıştır. Ayrıca standartta belirtilmeyen başlıklama işlemleri için de aşındırma yöntemi ile başlıklama işlemine göre geçerliliği ispatlanırsa kullanılabileceği belirtilmiş ve herhangi bir anlaşmazlık durumunda aşındırma yönteminin referans yöntem olarak kullanılması gerektiğini bildirilmiştir. Su kürü uygulanan numunelerde aşındırma yöntemi uygulanacak ise örnekler aşındırmadan en fazla 1 saat önce sudan çıkarılmalı, aşındırma işlemi bitikten sonra da (sulu kesim yapılmamış ise) basınç dayanımı testinden önce en az 1 saat su içerisinde bekletilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Gök (2010)'da $\emptyset 100 \times 200$ mm ve $\emptyset 150 \times 300$ mm boyutlarındaki silindir numunelere başlık yapılırken yapılan hataların betonun basınç dayanımı sonuçlarını etkileyeceği

belirtilmiş ve 100 MPa basınç dayanımının üzerindeki numunelerin öğütme yöntemi ile başlıklanmasını tavsiye edilmiştir.

Başka bir çalışmada (Carino *et al.* 1994) 45 MPa dayanımına sahip silindir beton numunelerde kükürt ile başlıklama yöntemi ve öğütme ile başlıklama yöntemini karşılaştırılmış ve bu dayanım seviyesi için bu iki yöntemde silindirlerin basınç dayanımlarında önemli bir farklılık olmadığını belirtmiştir. 90 MPa basınç dayanımına sahip olan numunelerde ise öğütme ile başlıklama yönteminin %6 daha fazla basınç dayanımı değerleri verdiği rapor edilmiştir. Bu çalışmaya benzer bir çalışma yapan Dimitru *et al.* (2014), 45 MPa, 60 MPa, 80 MPa ve 110 MPa dayanıma sahip silindir beton numuneleri üzerinde kükürt ve öğütme ile başlıklama yöntemlerini karşılaştırmışlardır. 45 MPa dayanıma sahip beton numunelerde bu farklı başlıklamalar arasında önemli bir basınç dayanımı farkının olmadığı, dayanım artışına bağlı olarak yüksek dayanımlı numunelerde öğütme yöntemi ile yapılan başlıkların %1-3 daha yüksek dayanım sonuçları verdiğini belirlemişlerdir. Tüm dayanım derecelerinde öğütme yönteminin kullanılabileceğini de ileri sürmüşlerdir.

Lerner *et al.* (2020)'da ise 7 ve 28 günlük numuneler üzerinde farklı başlıklama yöntemleri karşılaştırılmış ve her iki yaş için de en yüksek dayanımın ve en düşük standart sapmanın öğütme yöntemi ile başlıklanan numunelerde olduğu tespit edilmiştir.

Elmas testere kullanarak kesme ile başlıklama yöntemi

Elmas testere ile silindir numunelere başlık yapılması yöntemi, öğütme ile başlıklama yöntemine benzer şekilde yapılan bir başlıklama yöntemidir. Öğütme yöntemi ile başlıklama da silindir numune yüzeyi öğütülerek düzgün bir yüzey elde edilirken bu yöntemde silindir numune uçları düzgün ve pürüzsüz bir yüzey oluşturmak için bir elmas testere ile belirli bir kalınlıkta kesilerek düz bir yüzey elde edilir.

ASTM C 617'de (Anonymous 2015) numunenin başlık kısmında herhangi bir noktanın üst yüzeyinin en yüksek noktasından geçen ve silindir eksenine dik olan bir düzlemden uzaklığı 3 mm geçmesi durumunda silindir numunenin ucunun öğütme veya kesme ile hazırlanması gerektiği belirtilmektedir.

Medeiros *et al.* (2017), 7 ve 28 günlük silindir numuneleri elmas testere ile keserek başlıklamışlar ve öğütme, neopren ped ve kükürt ile başlıklama yöntemleri ile karşılaştırmışlardır. Elmas testere ile kesilerek başlıklanan numunelerin 7 ve 28 günde istenilen dayanıma ulaşmadığını, öğütme yönteminin her iki yaşta da en yüksek dayanıma eriştiğini ifade etmişlerdir. Dört başlıklama yöntemi arasında en düşük basınç dayanımı ve en

yüksek standart sapma değerlerinin elmas testere ile kesme yönteminde olduğunu rapor etmişlerdir.

Ancak, ASTM C 617 (Anonymous 2015) standardında özellikle yüksek mukavemetli silindir beton numunelerin başlıklanmasında yaşanılacak bir anlaşmazlık durumunda güvenli basınç dayanımı sonuçları almak için silindir numunelerin öğütme veya kesme yöntemi ile başlıklanması gerektiği belirtilmektedir.

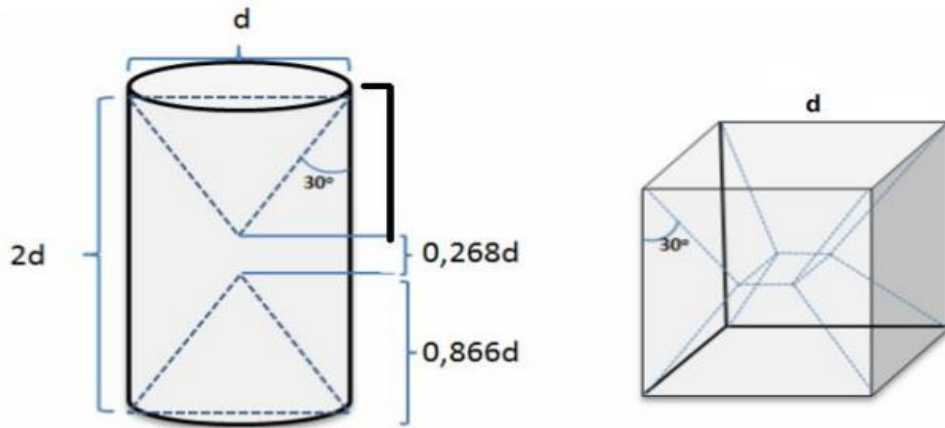
Carino *et al.* (1994) tarafından yapılan bir çalışmada ise silindir numuneler farklı başlıklama yöntemleri (kükürt, öğütme, öğütme+ күkürt, elmas testere ile kesme+ күkürt, ped) başlıklanmış ve 70 MPa dayanıma sahip beton numunelerde en yüksek dayanım sonuçları elmas testere ile kesme + күkürt başlıklama yönteminden elde edildiği bildirilmiştir.

Basınç Dayanımı Testinde Beton Örneklerinde Görülen Kırılma Şekilleri

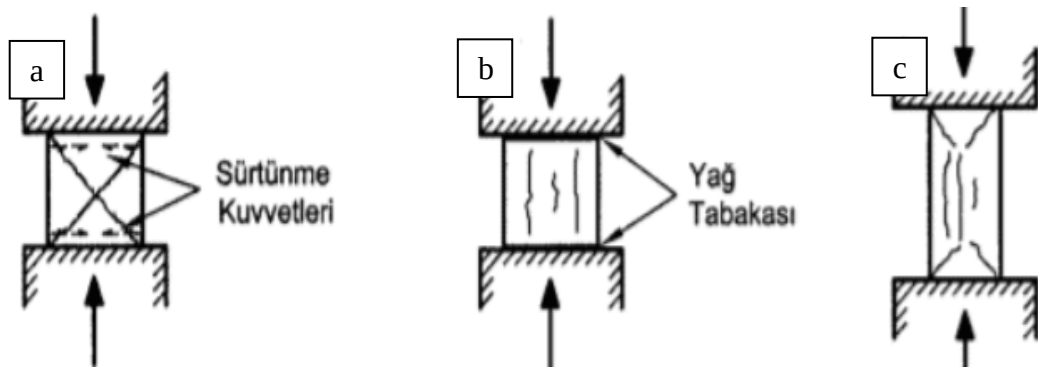
Beton, herhangi bir yüklemeye maruz bırakılmasa bile, içerisinde mikro çatlaklar ve boşluklar bulunduran yarı gevrek ve heterojen bir malzemedir. Betonun, maksimum gerilme yükünün yaklaşık %30 kadar doğrusal elastik bir davranış gösterdiği ve bu bölgede çimento ve agrega ara yüzeyinde çatlaklar oluşmaya başladığı ve betonda bulunan mevcut çatlakların aktifleştiği belirtilmektedir. Bu çatlakların stabil halde olduğu ve bu bölgede yük kaldırılınca şekil değiştirmenin ilk haline döndüğü belirtilmektedir. Maksimum gerilme yükünün yaklaşık %70-90 aralığındaki yüklemelerde ise betonun elastik davranışının kaybolduğu ve bu bölgede çimento ve agrega ara yüzeyinde bulunan çatlakların uzunluğu, genişliği, şiddeti ve sayısının arttığı belirtilmektedir. Maksimum gerilme yüküne yaklaşıldıkça çatlaklar, çimento hamuruna doğru hareket ederek uygulanan yük doğrultusunda birleşerek ilerlediği belirtilmektedir. Bu bölgede çatlak ilerlemesinin hızlandığı ve yeni çatlakların oluşmaya devam ettiği belirtilmektedir. Maksimum gerilme yüküne gelindiğinde ise betonun daha fazla yüke karşı koyamadığı ve daha düşük yük altında şekil değiştirmenin devam ettiği belirtilmektedir. Çatlaklar ilerledikçe de şekil değiştirmenin arttığı ve yük taşıma kapasitesinin azalmaya başladığı belirtilmektedir. Maksimum gerilme yükünden sonra betonun tokluk kazanarak yarı gevrek bir davranış sergilediği bildirilmiştir (Ghaffarı 2014; Engin 2015).

Küp numunelerinin alanı ve dayanımı silindir numunelerden daha büyük olduğu için kırılma yükünün yaklaşık olarak %40 daha fazla olduğu ve büzülmeden dolayı küpün köşelerinde gerilme yığılmaları olabileceği belirtilmiştir. Küp numune ile pres tablası arasındaki sürtünme kuvvetinden dolayı yük eksenine dik kesme kuvveti oluşarak eğik çatlaklar oluştuğu ve piramit şeklinde bir kırılma gerçekleştiği tespit edilmiştir (Küden 2011). Pres tablası ve beton numune yüzeyi arasında oluşan sürtünme kuvvetinden dolayı

kayma gerilmesi numune yüzeyinden numune merkezine doğru azalmakta (Şekil 1) ve silindir numunelerde üst ve alt yüzeyden yaklaşık $0,86 d$ uzaklığında numunenin kesitinde kayma gerilmesinin etkisinin kalktığı ve gerilmenin uniform olduğu değerlendirilmektedir (Bayqra 2018). Basınca maruz kalan küp numunelerde pres tablasının yüzeyi ile küp numunenin yüzeyi arasındaki sürtünme kuvvetleri yüzünden eğik/çapraz şekilde çatlaklar oluştuğu belirtilmiştir. Bu nedenle, küp numune uçlarından birleştirilmiş iki adet üçgen şekli oluşturacak şekilde birleştikleri noktadan çatladığı (Şekil 2a) ve başlık kısımlarının yağlanması ile sürtünme kuvvetinin azaltılması sonucu yükleme yönünde çatlaklar oluşacağı (Şekil 2b) belirtilmiştir. Silindir numunede silindirin uzunluğundan dolayı sürtünme kuvvetleri daha düşük etkili olacağından Şekil 2c’de şematize edilen biçimdeki çatlak oluşumunun gözlendiği rapor edilmiştir (Toprak 2021).

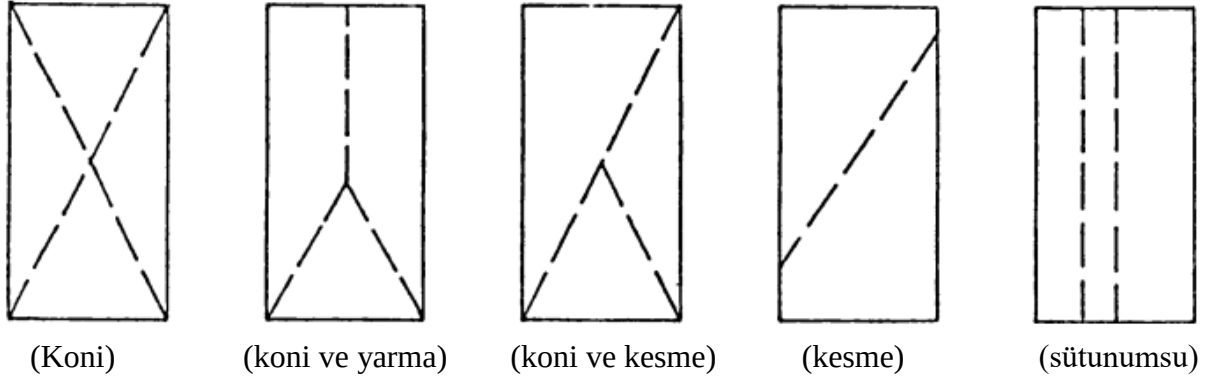


Şekil 1. Küp ve silindir numunelerin basınç dayanımı etki alanları (Bayqra 2018).



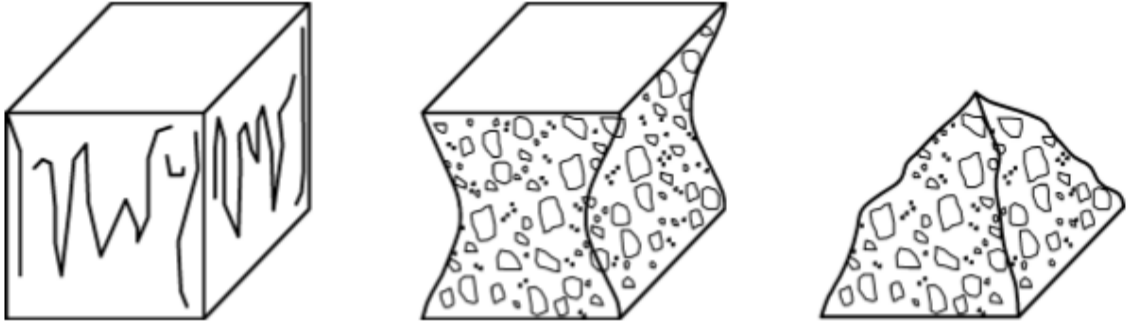
Şekil 2. Küp ve silindir numunelerde kırılma şekilleri a, b ve c (Toprak (2021)).

Silindir numunelerin normal kırılmada yan yüzeylerinde diyagonal kırılma çizgilerinin oluştuğu ve hemen hemen numunenin orta noktasında mafsall oluşumunun gözlendiği tespit edilmiştir (Köseoğlu 2010). ASTM C39/C39M-14’de (Anonymous 2014) verilen silindirik örneklerde görülen normal (ideal) kırılma biçimleri Şekil 3’de gösterilmiştir.

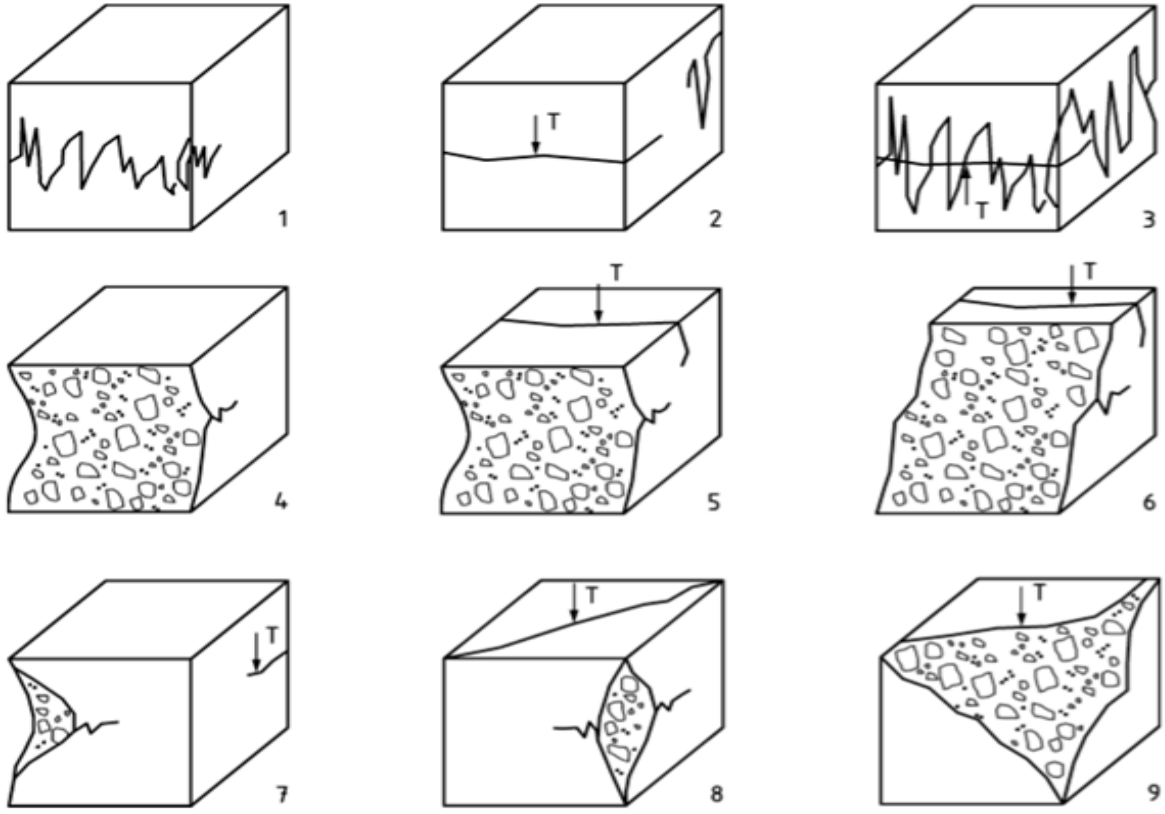


Şekil 3. Silindir numunelerde normal kırılmalar (Anonymous 2014).

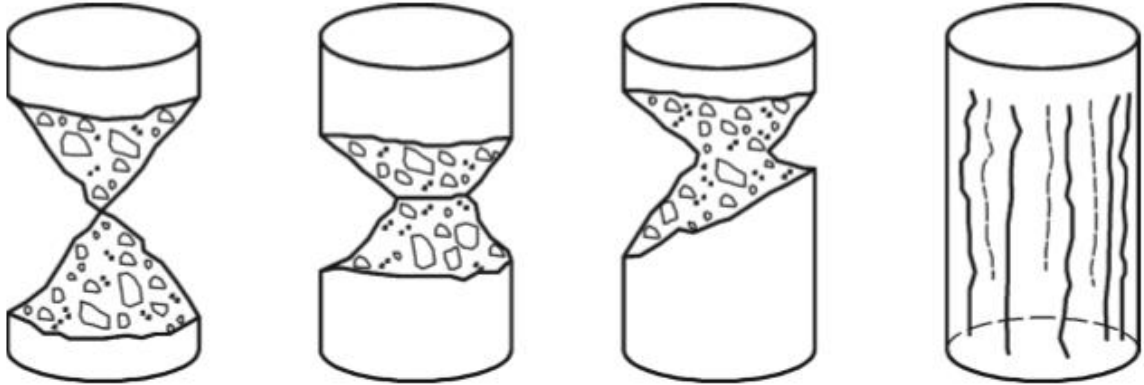
Basınç dayanımı, betonla ilgili en önemli olgudur. Gerçekleştirilen tasarımların güvenliğinin sağlanması için beton dayanımında doğru değerlerin elde edilmesinin çok önemli olduğunu belirtilmiştir. Ne yazık ki, birçok değişken basınç dayanımını etkilediğinden, basınç dayanımı altındaki somut kırılma prosedürü henüz tam olarak anlaşılamamıştır (Talaat *et al.* 2021). Bu tespite rağmen beton örneklerin kırılma biçimleri ile ilgili literatürde oldukça fazla bilgi bulunmaktadır. Bu tezde, kapsamlı olması nedeniyle TS EN 12390-3’de (Anonim 2019a) verilen tatmin edici olan ve olmayan çatlama/kırılma biçimlerinin gösterilmesiyle yetinilmiştir (Şekil 4-7).



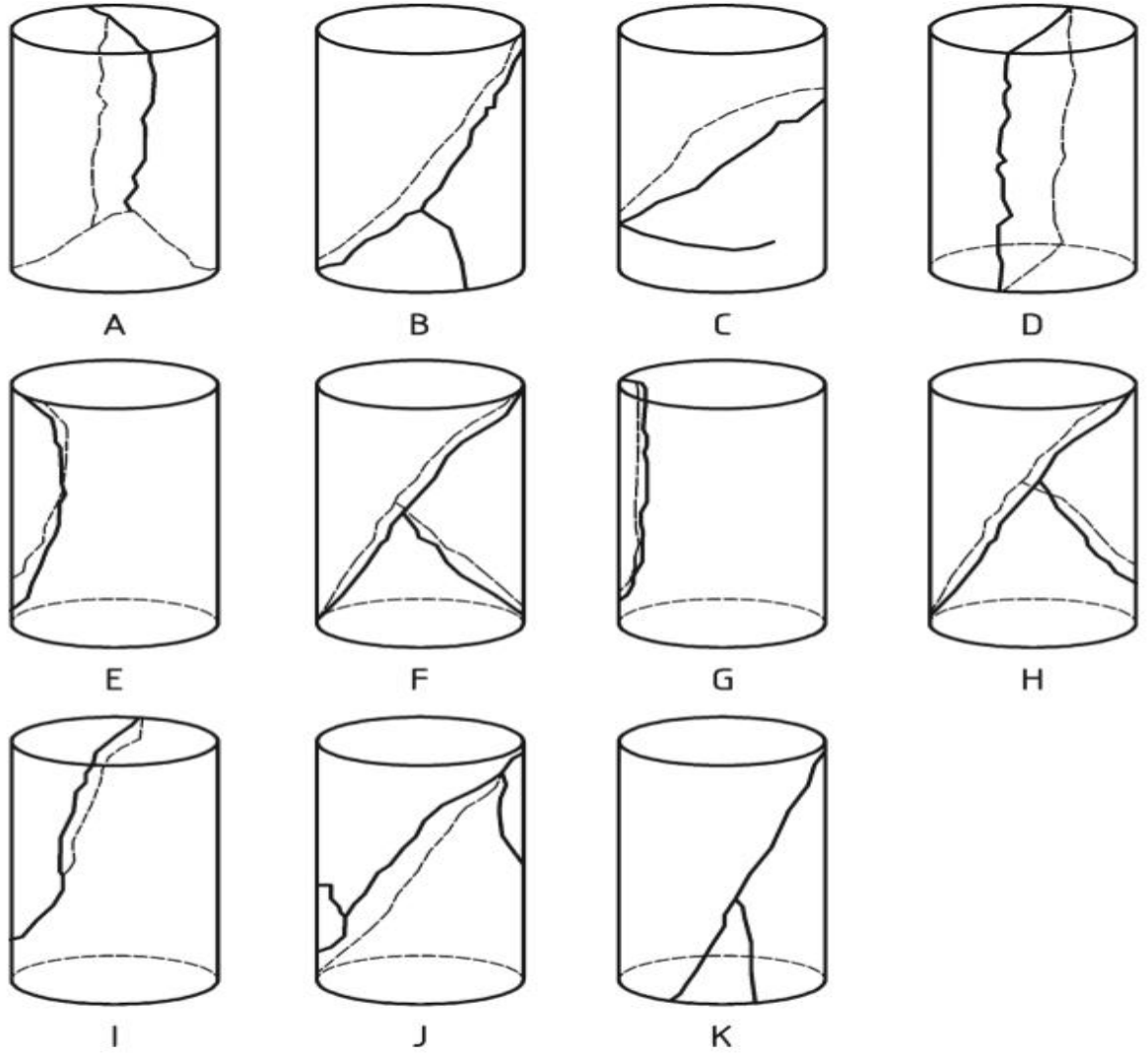
Şekil 4. Küp numunelerde tatmin edici kırılma şekilleri (Anonim 2019a).



Şekil 5. Küp numunelerde tatmin edici olmayan bazı kırılma şekilleri (T = Çekme gerilmesi nedeniyle oluşan çatlak) (Anonim 2019a).



Şekil 6. Silindir numunelerde tatmin edici kırılma şekilleri (Anonim 2019a).



Şekil 7. Silindir numunelerde tatmin edici olmayan bazı kırılma şekilleri (Anonim 2019a).

MATERYAL ve METOD

Materyal

Çimento

Numunelerin üretiminde Aşkale Çimento San. ve Tic. A.Ş.'ye ait Van Çimento Fabrikası'nda TS EN 197-1'e göre üretilmiş olan CEM II/A-LL 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Başlıklama malzemesi olarak Kalsiyum Alüminat Çimentosu ise ÇİMSA-Mersin Fabrikası'ndan temin edilen TS EN 14647'e uygun ISIDAÇ 40'dır. Her iki çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'te verilen analiz sonuçları çimentoların temin edildiği firmalar tarafından yapılmıştır.

Tablo 4. CEM II/A-LL 42,5 R ve Kalsiyum Alüminat Çimentosu Özellikleri

CEM II/A-LL 42,5 R			Kalsiyum Alüminatlı Çimento		
Kimyasal Kompozisyon (%)			Kimyasal Kompozisyon (%)		
Toplam SiO ₂	18		SiO ₂	3,6	
Al ₂ O ₃	4,22		Al ₂ O ₃	39,8	
Fe ₂ O ₃	2,94		Fe ₂ O ₃	17,1	
CaO	60,45		CaO	36,2	
MgO	2,85		MgO	0,65	
SO ₃	2,94		SO ₃	0,04	
Kızdırma Kaybı	7,42		Kızdırma Kaybı	0,3	
Na ₂ O	0,4		Na ₂ Eq	0,16	
K ₂ O	0,72		Cl ⁻	0,01	
Cl ⁻	0,0194		S	0,01	
Toplam	99,96		Sülfat ataklarına karşı maksimum koruma sağlar.		
Serbest CaO	1,1				
Toplam Katkı	13,6		Fiziksel ve Mekanik Karakteristikler		
Fiziksel ve Mekanik Karakteristikler			Özgül Ağırlığı	g/cm ³	3,25
32 mikron elekte kalıntı (%)	8,4		Özgül Yüzey	cm ² /g	3000
45 mikron elekte kalıntı (%)	2,8		Flow Test (ASTM C-109)	%	55
Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)	4184		Priz Başlangıcı	dakika	280
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,03		Priz Sonu	dakika	295
Priz Süresi (Vicat) (dk.)	Başlangıç	190	Su	%	23,1
	Bitiş	240	Hacim Sabitliği (Le Chatelier)	mm	1
Su İhtiyacı (%)	30,2		Elek Kalıntı (45 Mikron)	%	23
Hacim Genleşmesi (mm)	1		Elek Kalıntı (90 Mikron)	%	6,5
Basınç Dayanımı (MPa)	Gün	Sonuçlar	Dayanım (6 Saat)	MPa	47
	2	25,3	Dayanım (24 Saat)	MPa	70
	7	41,9	1200°C'ye kadar üstün performans gösterir. Asidik ortamda minimum kütle kaybına uğrar.		
	28	49,2			

Agrega

Numunelerin üretimi için yapılan deneylerde agrega olarak 2-16 mm (özellik değeri 2,64 ve su emme değeri %1,3) ve 8-16 mm (özellik değeri 2,65 ve su emme değeri %1) aralığındaki boyutlara sahip kırma taş, 0-4 mm (özellik değeri 2,41 ve su emme değeri %5,5) aralığındaki boyutlara sahip dere kumu ve filler malzeme olarak beyaz kalker (özellik değeri 2,60) kullanılmıştır. Agregaların tane yoğunluğu ve su emme oranı değerleri TS EN 1097-6'ya (Anonim 2013a) göre belirlenmiştir.

Süper Akışkanlaştırıcı (SA)

Deneyisel çalışmalar esnasında numunelerinin üretiminde TS EN 934-2+A1 (Anonim 2013b)'ye uygun üretilmiş kimyasal katkı olarak Master Glenium Sky 608 ticari adıyla piyasada satılan Master Builders Solutions Yapı Kimyasalları Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti üretimi süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcının üretici firmadan temin edilen teknik özellikleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Süper Akışkanlaştırıcı Teknik Özellikleri

Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Görünüm	Kahverengi – Sıvı
Özellik Ağırlık (20°C'de)	1,069-1,109 kg/lt
Ph Değeri	5-7
Alkali İçeriği (%)	≤3,00 (kütlece)
Klor İyon İçeriği (%)	≤0,10 (kütlece)

Karışım Suyu

Deneylerde numunelerin üretimi için Atatürk Üniversitesinin şebeke suyu kullanılmıştır. Numune üretiminde kullanılan tüm malzemeler Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Numune üretiminde kullanılan malzemeler.

Silis kumu

Numuneleri başlıklama yöntemlerinden %50 Kükürt + %50 Silis Kumu yönteminde, TS EN 12390-3'e (Anonim 2019a) göre çoğunluğu TS ISO 3310-1'e (Anonim 2019d) uygun 250 µm elekten geçen 125 µm elek üzerinde kalan silis kumu kullanılmıştır. Elenmemiş ve elenerek istenilen boyutlara getirilmiş silis kumu Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Silis kumu (a: elenmemiş, b: 250 µm elekten geçen 125 µm elek üzerinde kalan).

Kükürt

TS EN 12390-3'de (Anonim 2019a) belirtilen başlıklama yöntemlerinden %50 kükürt + %50 silis kumu ve literatürde rastlanan %100 kükürt yöntemleri için saf kükürt eritilerek kullanılmıştır. Kullanılan kükürt ve kükürt bileşiğine ait fotoğraflar Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Kükürt ve kükürtlü karışım (a: Kükürt ve b: Kükürt + Silis Kumu).

Parafin

Başlıklama yöntemlerinden biri olan kum kutusu ile başlıklama için ilgili standart gereği petrol kökenli bir mum çeşidi olan parafin kullanılmıştır. Şekil 11'de kullanılan parafine ait bir fotoğraf verilmiştir.



Şekil 11. Başlıklamada kullanılan parafin.

Metot

Numune sayısı, parametreler ve kodlama

Bir kür ortamında saklanmak üzere; 6 farklı başlıklama için ikişer adet silindir numune, iki adet başlıksız silindir numune ve iki adet de küp numune olmak üzere toplam 16 numune üretilmiştir. Buna göre, dört farklı kür ortamı için üretilen toplam örnek sayısı 64'tür. Çalışmada kullanılan silindir numuneler $\varnothing 100 \times 200$ mm, küp numuneler ise $150 \times 150 \times 150$ mm boyutlarındadır. Başlangıçta örneklerden ikişer değil, üçer adet üretilmesi planlanmıştı. Ancak, ön deneylerden sonra, üretimden kaynaklanabilecek değişikliklerin kontrol edilemeyen bir faktör olarak deneysel sürece etki edebileceği endişesiyle, 16 numunenin tamamının aynı harmandan elde edilmesinin daha doğru olacağı değerlendirilmiştir. Deneylerde kullanılan laboratuvar tipi mikserin kapasitesinin tek seferde üçer numune dökümü için yeterli olmaması nedeniyle de her bir ölçüm için ikişer numune üretilmesine karar verilmiştir.

Çalışmada başlıklama yöntemi ve kür ortamı olmak üzere iki parametre seçilmiştir. Başlıklama için TS EN 12390-3'de (Anonim 2019a) belirtilen 4 farklı yöntem ve kükürt, elmas testere ile kesme yöntemi seçilmiştir. Kür ortamı olarak da; hava kürü, nem kürü, su kürü I (basınç dayanımı testinden 24 saat önce kürden çıkarılıp başlıklama yapma) ve su kürü II (basınç dayanımı testinden 10 saatten kısa süre önce kürden çıkarılıp başlıklama yapma) seçilmiştir (Tablo 6).

Tablo 6. Parametreler, Seviyeleri ve Kodlama

Kür Ortamı	Başlıklama Biçimi
Hava Kürü: A	Manuel Öğütme: G
Nem Kürü: H	Kalsiyum Alüminatlı Çimento Harcı: CM
Su Kürü I: WI	Kükürt: S
Su Kürü II: WII	Kükürt + Silis Kumu: SSM
	Kum Kutusu (Sand Box): SB
	Elmas Testere ile Kesme: C
Referans numuneler	
Başlıksız silindir: WC	Küp Numune: R

Numunelerin kodları iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım kür ortamını, ikinci kısım ise başlık türünü göstermektedir. Her bir kısım için geliştirilen kısaltmalar Tablo 6’da verilmiştir. Kodlama yapılırken her bir seviyenin İngilizce karşılıklarının ilk harf ya da harfleri alınmıştır. Buna göre: **H-SSM**: Nemli ortamda kür edilmiş, kükürt + silis kumu ile başlıklanması yapılmış numuneyi göstermektedir. Araştırma Bulguları ve Değerlendirme bölümündeki tablolarda kodların devamında yazan 1 ve 2 sayıları her bir karışım için üretilen iki örnekten birincisini ve ikincisini göstermektedir.

Agrega deneyleri

Agregalarda yüzey nemi, tane yoğunluğu ve su emme oranı tayini deneyleri

TS EN 1097-6: Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini (Anonim 2013a)’de belirtilen yöntemler kullanılarak agregaların yüzey nemi, tane yoğunluğu, su emme oranı tayini yapılmıştır.

Elek analizi deneyleri ve granülometri eğrisi

Yapılacak karışım hesabına esas olmak üzere agregaların elek analizi TS EN 933-1: Agregaların geometrik özellikleri için deneyler- Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini- Eleme metodu (Anonim 2012a) standardına göre yapılmıştır. Elek analizi sonuçlarına bağlı olarak belirlenen granülometri eğriler TS 706 EN 12620+A1 (Anonim 2009b) belirtilen kriterler göz önünde bulundurularak çizilmiş ve ‘Araştırma Bulguları ve Değerlendirme’ bölümünde verilmiştir.

Beton karışım hesapları, ön deneyler ve numunelerin üretimi

Numunelerin üretimi için yapılan betonun karışım hesabı TS 802 (Beton karışım tasarımı hesap esasları) (Anonim 2016) esas alınarak yapılmıştır. Karışım hesabı yapılan betonun üretimi ise TS EN 206 + A2 (Beton-Özellik, performans, imalat ve uygunluk)

(Anonim 2021c) göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. İdeal bir karışım hesabı ve istenilen özelliklerde beton numune üretimi için agrega, filler ve süper akışkanlaştırıcı oranlarının değiştirilmesi ile slump ve kohezyonun izlemesi yapılarak sekiz adet ön deney gerçekleştirilmiş ve sekiz grup beton numunesi alınarak basınç dayanımı sonuçlarından hareketle karışım hesabına son şekli verilmiştir. Ön deneyler için yapılan karışım hesapları ve gözlem sonuçları Tablo 7’de verilmiştir.

Ön deneylerde beton karışım hesapları ve numune üretimleri gerçekleştirilmiş ve 7. denemedeki karışımın homojenliğinin yüksekliği ve CEM II tipi çimentonun yeterince temin edilmiş olması nedeniyle 7. denemedeki karışım oranları ve üretim yöntemi ile asıl numunelerin üretimine karar verilmiştir. Nihai karışım hesabı Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 7. Ön Deneme Karışımları ve Gözlemler

	Ön deney numarası							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Dozaj (kg/m³)	350	350	350	350	350	350	350	350
S/Ç	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Hava (%)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
SA Oranı (%)	1	1	1,2	1,4	1,4	1	1,2	1,2
Filler (%)	-	-	5	5	5	5	5	5
2/16 (%)	40	40	40	35	35	35	35	35
8/16 (%)	20	15	15	15	15	15	15	15
0/4 (%)	40	45	45	50	50	50	50	50

Gözlemler ve ön bulgular:

- 1. Deneme:** Slump 16 çıktı ancak kohezyon iyi değildi. İri agregalar ana kütlede kolay ayrıştı. İnce agreganın artırılmasına karar verildi.
- 2. Deneme:** Slump 2 cm çıktı ve kohezyon 1. denemeye göre biraz iyileşti. %5 filler katılmasına ve SA’nın değiştirilmesine karar verildi.
- 3. Deneme:** Slump 1 cm çıktı ve kohezyon da beklenildiği kadar iyileşmedi. Kum (0/4) oranının biraz daha arttırılmasına ve SA’nın tekrar değiştirilmesine karar verildi.
- 4. Deneme:** Slump 2,5 cm çıktı, kohezyon biraz daha iyileşti ve 3 adet numune 7 günlük dayanım için kalıplara döküldü. $\sigma_{ort} = 21,04$ MPa bulundu.
- 5. Deneme:** CEM I 42,5 çimentosu kullanıldı. Slump 15 cm ve kohezyon iyi çıktı. 7 günlük dayanım için 3 adet numune alındı ve $\sigma_{ort} = 20,5$ MPa bulundu. SA’nın azaltılmasına karar verildi.
- 6. Deneme:** Slump 5 cm ve kohezyon öncekine göre daha da iyileşti. 7 günlük dayanım $\sigma_{ort} = 24,0$ MPa çıktı. Slump düşük olduğu için SA oranının biraz arttırılmasına karar verildi.
- 7. Deneme:** Slump 9 cm çıktı ve kohezyon mükemmel hale geldi. 7 günlük dayanım sonuçları bir biri ile hemen hemen aynı ($\sigma_1=20,6$ MPa, $\sigma_2=20,8$ MPa, $\sigma_3=20,8$ MPa) ve $\sigma_{ort}=20,75$ MPa bulundu. Bu sonuçlar karışımın homojenliğinin göstergesi olarak değerlendirildi.
- 8. Deneme:** 7. denemedeki karışım oranları ile CEM I 42,5R çimentosu kullanılarak deneme yapıldı. Slump 12 cm çıktı ve kohezyon mükemmeldi. 7 günlük dayanım sonuçlarının ($\sigma_1=23,7$ MPa; $\sigma_2=29,7$ MPa ve $\sigma_3=20,1$ MPa) standart sapması yüksek çıktı ve $\sigma_{ort} = 24,5$ MPa bulundu.

Numunelerinin üretiminde yaklaşık 100 dm³ kapasiteye sahip fakat karıştırma hacmi düşük olan, 30 devir/dakika karıştırma hızına sahip laboratuvar tipi mikser kullanılmıştır (Şekil 12).

Karışımların üretiminde önce 2/16 + 8/16 + çimento + filler malzeme miksere dökülmüş ve 1 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra ince agrega (0/4) karışıma eklenerek 2 dakika karıştırılmıştır. Kullanılacak suyun yarısı karışıma eklenerek 1 dakika karıştırılmış daha sonra suyun diğer yarısına SA eklenerek karışıma ilave edilmiş ve 1 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra 1 dakika dinlendirilip son olarak 2 dakika karıştırılarak elde edilen karışım kalıplara yerleştirilmiştir. Silindir numuneler 2 tabaka halinde 15 kez şişlenerek, küp numuneler ise tek tabaka halinde 25 kez şişlenerek kalıba yerleştirilmiş her ikisi de 30 saniye süreyle vibrasyon masasında vibre edilmiştir.

Tablo 8. Ana Deneyler İçin Kullanılan Karışım Oranları

	Hacim (dm ³)	Ağırlık (kg)
Çimento (CEM II 42,5R)	115	350
Su	157,5	157,5
Süper akışkanlaştırıcı (%1,2)	4,20	4,20
Hava (%0,5)	5	0
Agrega hacmi (719 dm³)		
Filler (%5)	35,95	93,47
2/16 (%35)	239,07	631,15
8/16 (%15)	102,46	271,52
0/4 (%50)	341,53	823,90
TOPLAM	1000,71	2331,74



Şekil 12. Beton üretiminde kullanılan mikser.

Taze beton deneyleri

Birim ağırlık deneyi

Birim ağırlık deneyi 150×150×150 (mm) boyutlarında, hacmi ve kütlesi sabit olan bir küp kalıp içerisine taze beton yerleştirilip tartım yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde TS EN 12350-6 (Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Birim hacim kütlesi) (Anonim 2019b) standardı göz önünde bulundurulmuştur.

Çökme (slump) deneyi

Çökme deneyi TS EN 12350-2 (Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi) (Anonim 2019e)'a uygun olarak yapılmıştır. 30 cm yüksekliğinde, 20 cm taban ve 10 cm üst çaplarına sahip metal slump konisi kullanılmıştır. 60 cm boyunda ve 1,6 cm çapa sahip bir metal çubuk şişleme işlemi için, bir yerleştirme tablası da altlık olarak kullanılmıştır. Yerleştirme tablası merkezine slump konisi geniş tabanı alta gelecek şekilde yerleştirilmiş ve koniyi üç seferde doldurmak ve her seferde metal çubuk ile 25 kez şişlemek şartı ile taze beton yerleştirilmiştir. Koninin üst yüzeyi tesviye edilerek 5 sn'de slump konisi dikey olarak özenle çekilmiş ve slump konisi çöken betonun yanına koyularak çökme mesafesi Şekil 13'te görüldüğü gibi ölçülmüştür.



Şekil 13. Taze betonda çökme miktarı ölçümü.

Numunelerin kürü

Numuneler 24 saat kalıplarında bekletildikten sonra çıkarılarak Tablo 9'da belirtilen kür ortamlarına yerleştirilmiştir. Hava kürü olarak TS 1248'de (Anonim 2012b) verilen Şekil 14'deki grafiklerden “c eğrisi” ile gösterilen yetersiz kür koşulu rejimi seçilmiştir. Nem kürü numuneleri kür süresi boyunca ıslak telis bezine sarılmış ve kür süresi boyunca bez sürekli nemli tutulmuştur. Su kürü için ise iki farklı rejim seçilmiştir. İlki, standart dışı olan ve zaman zaman uygulamada karşılaşılan, basınç testinden 24 saat önce kirece doymuş su içeren kür

havuzundan çıkarılarak laboratuvar ortamında deney anına kadar kurutma rejimidir. İkinci ise TS EN 12390-3’de (Anonim 2019a) belirtilen deneyden 10 saatten kısa sürede kür havuzundan çıkarma rejimidir.

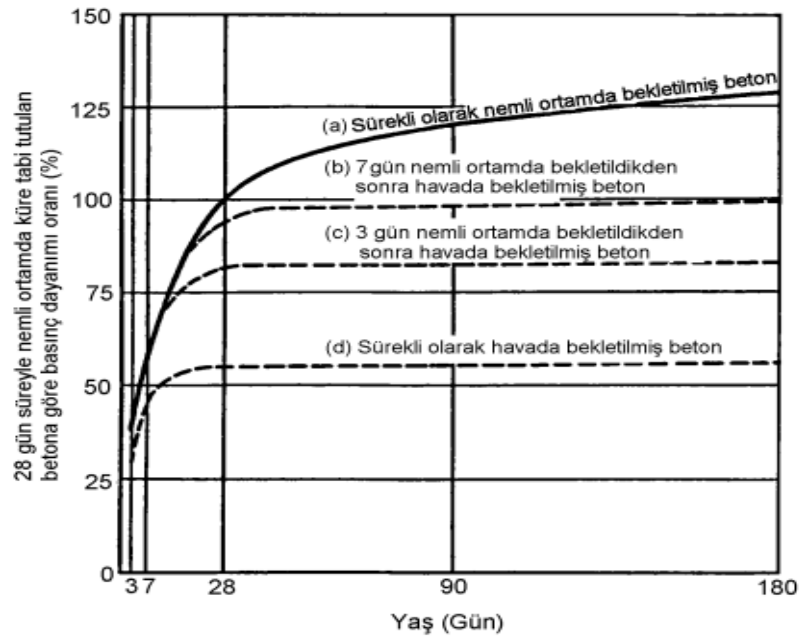
Tablo 9. Numunelere Uygulanan Kür Süreleri ve Yöntemleri

Hava Kürü	1 Gün Kalıp + 3 Gün Nem + 23 Gün Hava (Laboratuvar ortamı) (Şekil 15)
Nem Kürü	1 Gün Kalıp + 26 Gün Nem (Islak telis bezi içinde saklama) (Şekil 16)
Su Kürü I	1 Gün Kalıp + 26 Gün Su (24 Saat önce sudan çıkarma) (Şekil 17)
Su Kürü II	1 Gün Kalıp + 26 Gün Su (10 Saatten kısa süre önce sudan çıkarma)

Numunelerin saklandığı ortamların sıcaklık ve nem değerleri kür süresi boyunca kaydedilmiş ve Tablo 10’da verilmiştir. Hava, nem ve su kürü numunelerine kür ortamlarına ait fotoğraflar Şekil 15-17’de verilmiştir.

Tablo 10. Kür Ortamlarının Sıcaklık ve Nem Değerleri

	Sıcaklık (°C)	Bağıl Nem (%)
Kür havuzu suyu	21±2	100
Nem kürü	26±7	≥ 95
Laboratuvar ortamı	26±7	30±20



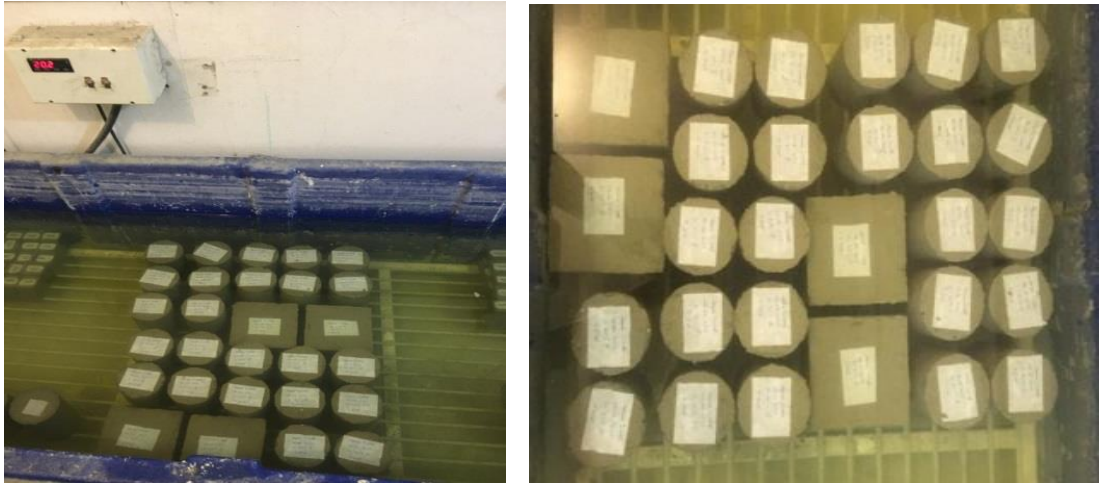
Şekil 14. Suda ve havada bekletilen numunelerin basınç dayanımı gelişimi (Anonim 2012b).



Şekil 15. Hava kürü (a:3 günlük nem kürü, b:laborauvar ortamı).



Şekil 16. Nem kürü (a ve b: ıslak telis bezi içindeki örnekler, c: sıcaklık ve nem ölçümü).



Şekil 17. Kür havuzunda saklanan numunelere ait fotoğraflar.

Numuneleri başlıklama yöntemleri

Numuneler, 6 farklı başlıklama yöntemi ile başlıklanmıştır. Ayrıca her bir başlıklama yöntemi için iki adet başlıksız numune üretilmiştir. Başlıklama yöntemleri belirlenirken TS EN 12390-3 (Anonim 2019a) referans alınmış ayrıca uygulamalarda da bu standarttaki

kurallara uyulmuştur. Çalışmada silindir numunelere uygulanan başlıklama yöntemleri ile ilgili detaylı bilgiler aşağıda verilmiştir.

Başlıksız numuneler

Başlıklama işleminin basınç dayanımı üzerindeki etkisini net olarak belirleyebilmek amacıyla her bir başlıklama yöntemi için ikişer adet silindir örnek üretilmiş ve başlıklı olanlar ile aynı kür şartlarında saklandıktan sonra eksenel basınç deneyine tabi tutulmuştur. Başlıksız örnekler toplu halde Şekil 18’de görülmektedir.



Şekil 18. Başlıksız numunelere ait fotoğraf.

Manuel öğütme yöntemi ile başlıklama

Çalışmanın yapıldığı laboratuvarla ya da yakın çevredeki laboratuvarlarda elmas bıçaklı otomatik öğütme cihazı bulunmaması nedeniyle öğütme işlemi manuel olarak yapılmıştır. Bu amaçla, silindir numune düşey konumda bir mengeneyle sıkıştırılmış ve bir spiral taşlama makinesinin ucuna mermer taşlama zımparası takılarak taşlama (aşındırma) işlemi yapılmıştır (Şekil 19a ve b). Taşlama işlemi yapılırken silindir numune yüzeyi sürekli ıslatılmış ve yüzeyin düz olması için su terazisi (Şekil 19c), cam plaka (Şekil 19d) ve gönye (Şekil 19e) ile sürekli kontroller yapılarak ilerleme sağlanmıştır. Son olarak başlıklama işlemi Şekil 19f’de görüldüğü gibi tamamlanmıştır.



Şekil 19. Manuel öğütme yöntemine ait fotoğraflar.

Elmas testere ile kesme yöntemi ile başlıklama

Elmas testere (bıçak) ile silindir numunelere başlık yapılırken önce silindir numune, yatay konumda beton kesme makinesinde bulunan mengeneye sabitlenmiştir (Şekil 20a). Daha sonra cihaz çalıştırılmış ve borlu su püskürtülerek yavaşça silindir numunenin sabitlendiği mengene testereye yaklaştırılarak kesim işlemi yapılmıştır (Şekil 20b). Böylece silindir numuneler eksenel basınç testi için hazır hale getirilmiştir (Şekil 20c ve d).



Şekil 20. Elmas testere ile kesme yöntemine ait fotoğraflar.

Kükürt ile başlıklama

Kükürt ile başlıklama yöntemi için Şekil 21a’da gösterilen kükürt, Şekil 21b ve c’de gösterildiği gibi eritme potasında 130°C ’de dibinde katı birikimi olmaması için sürekli karıştırılarak eritilmiştir. Erimiş kükürt yağlanmış bir taban plakasının (Şekil 21d) haznesine dökülmüştür. Yüzeyi temiz ve kuru silindir numune taban plakası üzerine dik konumda olacak şekilde yerleştirilerek yeterli sertliğe ulaşmaya kadar bekletilmiştir (Şekil 21e). Daha sonra yatay plakadan taşan fazla başlık malzemesi temizlenerek silindir numune plakadan çıkarılmış ve başlıkta boşluk olup olmadığı kontrol edilmiştir. Başlık yapımından sonra, yapılan kükürt başlığın yeterli dayanıma ulaşması için basınç dayanımı deneyinden önce 1 saat bekletilmiştir. Şekil 21f’de kükürt ile başlıklanan numunenin son hali verilmiştir.

Bu çalışmada $5 \times 5 \times 5$ cm boyutundaki kükürt numuneler üzerinde yapılan basınç dayanım testi sonucundan hareketle, başlıklamadan 1 saat sonra eksenel basınç testi yapılması kararlaştırılmıştır. Anılan deneyin detayları bu bölümün sonundaki “Başlık malzemelerinin basınç dayanımının belirlenmesi” başlığı altında verilmiştir.



Şekil 21. Kükürt yöntemi ile başlıklamaya ait fotoğraflar.

Kükürt + silis kumu ile başlıklama

Kükürt + silis kumu başlıklama için, eşit miktarlarda kükürt ve silis kumu karışımı hazırlanmıştır (Şekil 22a ve b). Kükürt, homojenliğin sağlanması ve eritme potasının tabanında katı birikimini önlemek ve topaklanma olmaması için sürekli karıştırılarak eritme potasında 130°C’de eritilmiştir (Şekil 22c). Erimiş karışım Şekil 22d’de gösterilen yağlanmış taban plakası üzerine dökülmüş ve Şekil 22e’de gösterildiği gibi dikey konumdaki silindir numune plakaya yerleştirilerek yeterli sertliğe ulaşmaya kadar beklenmiştir. Daha sonra kenarlardan taşan başlık malzemesi temizlenerek silindir numune taban plakasından çıkarılmıştır. Başlığa zarar vermeyen bir obje yardımıyla başlıkta boşluk olup olmadığı kontrol edilmiştir. Başlık malzemesinin yeterli dayanıma ulaşması için basınç dayanımı deneyinden önce 1 saat bekletilmiştir. Bu yöntemdeki 1 saatlik sürenin belirlenmesinde bir önceki yöntemde değinilen ön deneylerden elde edilen sonuçlar etkili olmuştur. Şekil 22f’de kükürt + silis kumu yöntemi ile başlıklanan numunenin son hali verilmiştir.



Şekil 22. Kükürt + silis kumu yöntemi ile başlıklamaya ait fotoğraflar.

Kum kutusu (sand box) ile başlıklama

Kum kutusu başlıklama yöntemi için gerekli olan deney düzeneği TS EN 12390-3'e (Anonim 2019a) uygun olarak ve belirtilen ölçülerde kendi imkânlarımızla yapılmıştır. Deney için gerekli olan metal başlıklar anılan standartta verilen boyutlara göre yaptırılmıştır. Bir yerleştirme düzeneği temin edilmiş ve titreşim cihazı üzerine sabitlenmiştir. Metal başlık, yerleştirme düzeneğine bir kelepçe yardımıyla sabitlenmiştir (Şekil 23a). Bir numunenin her iki ucu için 240 gram silis kumu (ISO 3310-1'e uygun 250 μ m elekten geçen 125 μ m elek üzerinde kalan) bir cam mezürde ölçülerek (Şekil 23b), dağıtılmadan metal başlık merkezine bir huni yardımı ile (Şekil 23c) dökülmüştür. Daha sonra, Şekil 23d'de gösterildiği gibi, silindir numune düşey konumda metal başlık içerisine yerleştirilmiş ve o konumda metal kelepçe ile sabitlenmiştir. Titreşim cihazı çalıştırılarak silis kumunun yayılarak iyi bir şekilde yerleşmesi sağlanmış ve tablalı ısıtıcıda eritilmiş parafin metal başlık kenarlarındaki boşluklara dökülerek basınç dayanımı deneyi esnasında hem kumun dağılmadan kalması hem de başlığın silindir numunede sabit kalması sağlanmıştır. Aynı işlemler, silindir numunenin diğer tarafı içinde sırası ile uygulanmıştır (Şekil 23e). Basınç dayanımı deneyi biten

numuneler basınçlı hava kompresörü ile metal başlıklarda bulunan deliklerden hava verilerek metal başlıklar numuneden çıkarılmıştır. (delikler başlıklama işlemi yapılırken eritilmiş parafin damlatılıp kapatılmıştır.) TS EN 12390-3’de (Anonim 2019a) belirtilen deney aşamaları sırası ile uygulanmıştır. Kum kutusu ile başlıklanan numunenin son hali Şekil 23f’de verilmiştir.



Şekil 23. Kum kutusu ile başlıklama yöntemine ait fotoğraflar.

Kalsiyum alüminat çimentosu ile başlıklama

TS EN 12390-3’e (Anonim 2019a) göre kalsiyum alüminatlı çimento ile silindir numunelerin başlıklanması için kütlece üç kısım çimento ve bir kısım kum (ISO 3310-1’e göre 300 µm elekten çoğu geçen) karışımından oluşan bir harç hazırlanmıştır. Başlıklama yapılacak numunenin perdahlı yüzeyine bir çelik kelepçe takılmış ve numuneye sabitlenmiştir (Şekil 24a). Numune yüzeyi nemli durumda iken başlık harcı yerleştirilmiş (Şekil 24b) ve yağlanmış bir cam plaka (Şekil 24c) ile de dairesel hareketler yapılarak harcın, çelik kelepçenin üst yüzeyine tam oturması sağlanmıştır. Cam plaka numune üzerinde bırakılarak (Şekil 24d) sıcaklığı 25°C, bağıl nemi en az %95 olan nem küründe (Şekil 24e) numune 6 saat bekletilmiştir. Şekil 24f’de kalsiyum alüminat çimentosu harcı ile başlıklanan numunenin son hali verilmiştir.



Şekil 24. Kalsiyum Alüminat Çimentosu yöntemi ile başlıklamaya ait fotoğraflar.

5x5x5 cm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda kalsiyum alüminat çimentolu harcın yeterli dayanıma 6 saat sonra erişildiği tespit edilmiştir. Bu nedenle numune başlıklandıktan sonra 6 saat nem kürü işlemine tabi tutulduktan sonra eksenel basınç testi uygulanmıştır. Mezkûr deneyin detayları bu bölümün sonundaki “Başlık malzemelerinin basınç dayanımının belirlenmesi” başlığı altında verilmiştir.

Sertleşmiş beton deneyleri

Ultrasonik dalga hızı (UPV) deneyi

Bu deney için Proceq ticari ismi ile piyasada bulunan cihaz kullanılmıştır. Ultrases cihazı çalışır durumda iken ultrases dalgaları üreterek iletmektedir. Ultrases cihazında iki adet başlık bulunmakta ve kablolarla cihaza bağlanan başlıklardan biri dalga gönderici diğeri ise dalga alıcıdır. UPV deneyinde numunelerin hem başlıklamadan önce hem de başlıklamadan sonraki boyları numunenin 3 farklı yerinden ölçülüp ortalaması alınarak kaydedilmiştir. Cihazın proplarına gres yağı sürülerek propların numune ile boşluksuz temas etmesi sağlanmıştır. Numune yatay konumda iken aparatlar numune alt ve üst yüzeylerinin merkezine bastırılarak okumalar yapılmıştır. UPV yöntemi, tahribatsız bir yöntem olup bu çalışmada ultrases dalga hızı tayini TS EN 12504-4’e (Anonim 2021d) göre yapılmıştır. Ultrases geçiş süresi μs olarak ölçülmüş ve boy/süre (m/s) formülü ile geçiş hızı (V)

belirlenmiştir. UPV cihazının üretici firmanın sayfasından alınan görüntüsü Şekil 25a’da, deneyler esnasından alınan bir fotoğrafı ise Şekil 25b’de verilmiştir.



Şekil 25. UPV cihazına ait fotoğraflar (a: üretici firmadan alınan, b:deney esnasından alınan)

Eksenel basınç dayanımı deneyi

Numunelerin eksenel basınç deneyleri TS EN 12390-3’e (Anonim 2019a) göre yapılmıştır. Basınç dayanımı deneyleri için ELE International üretimi AUTOTEST 3000 cihazı kullanılmıştır. Yük kontrollü olan bu cihazın bir resmi Şekil 26’da verilmiştir. Deneylerde yükleme hızı 0,6 MPa/sn. olarak alınmıştır.



Şekil 26. Beton presine ait fotoğraf

Başlık malzemelerinin basınç dayanımının belirlenmesi

Kükürt (Şekil 27a), kükürt + silis kumu (Şekil 27b) ve kalsiyum alüminatlı çimento harcı (Şekil 27c) ile hazırlanan karışımlardan 5×5×5 cm boyutlarında küp numuneler üretilmiştir. Daha sonra bunlardan; kükürt ve kükürt + silis kumu karışımının 30 dakika, 1 saat, 2 saat, 3 saat ve 4 saatlik, kalsiyum alüminatlı çimento harcının ise 30 dakika, 1 saat, 2 saat, 3 saat, 4 saat, 5 saat ve 6 saatlik basınç dayanımları belirlenmiştir. Bu karışımların dayanımlarının düşük olabileceği öngörüsünden hareketle deneyler, Şekil 27d’de gösterilen deformasyon kontrollü 20 ton kapasiteli preste yapılmıştır. Deneylerde deformasyon hızı 0,8 mm/dak. alınmıştır.



Şekil 27. Başlık malzemelerinin basınç dayanımlarının belirlenmesi için üretilen numuneler ve pres (a: kükürt, b: kükürt + silis kumu, c: kalsiyum alüminatlı çimento harcı, d: deformasyon kontrollü pres)

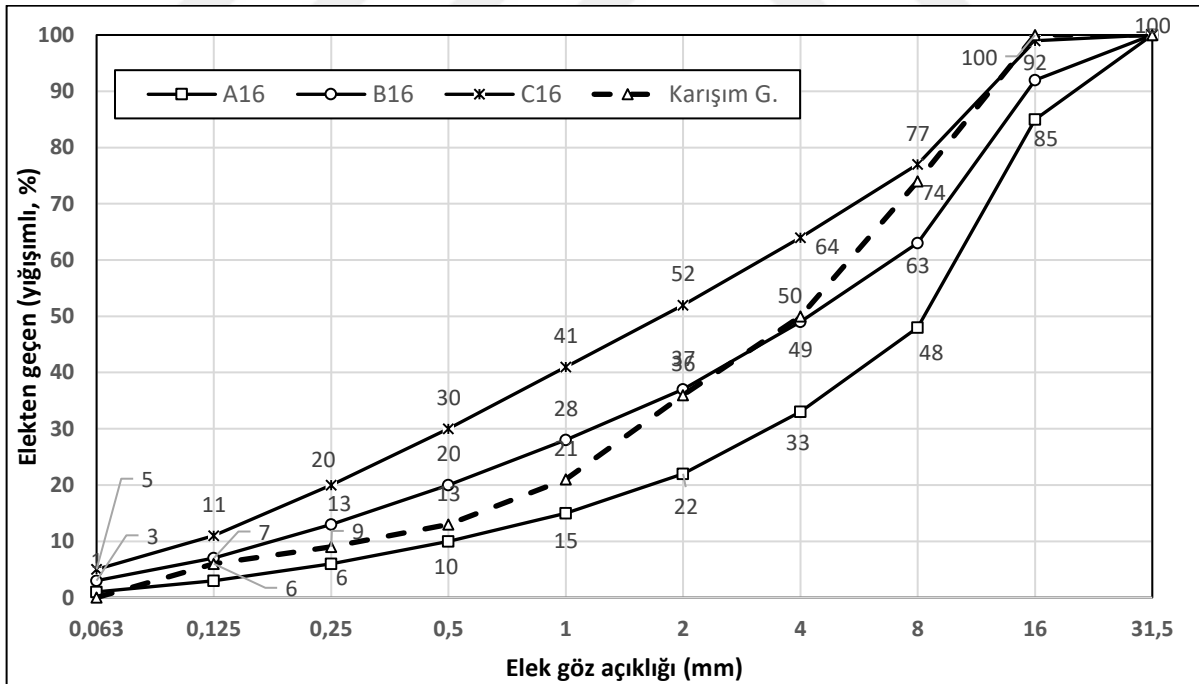
ARAŞTIRMA BULGULARI ve DEĞERLENDİRME

Elek Analizi Sonuçları ve Granülometri Eğrisi

Çalışmada kullanılan agreganın maksimum agrega çapı ($D_{en\ büyük}$) 16 mm'dir. İnce ve iri agregaların TS EN 933-1'e (Anonim 2012) göre yapılan elek analizinin sonuçları Tablo 11'de, karışım granülometrisi ve $D_{en\ büyük}=16$ mm ait standart eğriler Şekil 28'de verilmiştir.

Tablo 11. Elek Analizi Sonuçları

	Elekten Geçen Malzeme (%)									
	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
0/4	0,1	12,2	17	25,6	40,1	70	96,5	99,7	100	100
2/16	0,5	0,7	0,9	1,2	2,2	7,8	69,4	84,5	100	100
8/16	0	0	0	0	0	0	0	0,6	100	100
0/4 (%50)	0	6	9	13	20	35	48	50	50	100
2/16 (%35)	0	0	0	0	0	1	2	24	35	100
8/16 (%15)	0	0	0	0	0	0	0	0	15	100
Karışım G.	0	6	9	13	20	36	50	74	100	100



Şekil 28. D=16 mm için standart eğriler ve karışımının granülometri eğrisi.

Şekil 28, TS 802'de (Anonim 2016) tane büyüklüğü dağılımı (granülometri) seçiminde agrega en büyük tane büyüklüğü 16 mm olan betonlar için önerilen sınır değerlere göre hazırlanmıştır. Şekil 28'den de görülebileceği gibi, karışım granülometrisi; 2 mm'den küçük olan agregalar A16-B16 arasında, 2 mm'den büyük olanlar ise B16-C16 eğrileri

arasında kalmaktadır. Diğer taraftan, TS 706 EN 12620 + A1’de (Anonim 2009) üst göz açıklıklı (D) elekte kalan agregaların varlığı da kabul edildiğinden $D_{en\ büyük}=16\text{ mm}$ için belirlenen standart eğriler, 31,5 mm’yi de içine alacak şekilde uzatılmıştır. Bu nedenle, Tablo 11 ve Şekil 28’de 31,5 mm’lik elekten geçen oranlar da gösterilmiştir.

Taze Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Dört farklı kür ortamı için üretilen taze betonda kohezyonlarının çok iyi olduğu ve segregasyonun olmadığı gözlemlenmiştir. Taze beton deneyleri sonucunda elde edilen birim ağırlık, çökme (slump) değerleri Tablo 12’te verilmiştir.

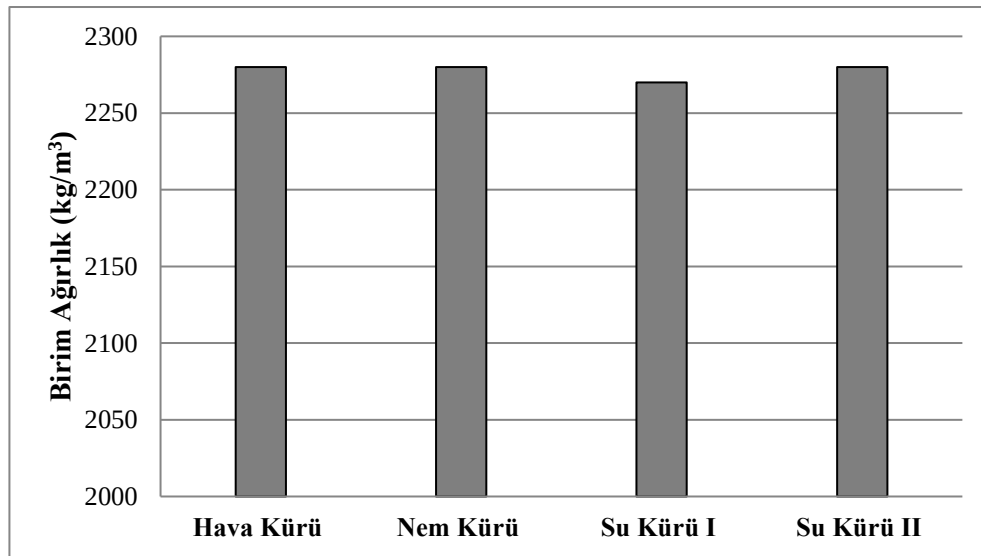
Tablo 12. Taze Beton Birim Ağırlık ve Çökme Deneyi Sonuçları

Saklama ortamı	Birim ağırlık (kg/m^3)	Çökme (cm)
Hava Kürü	2280	6
Nem Kürü	2280	12
Su Kürü I	2270	12
Su Kürü II	2280	14

Birim ağırlık deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

TS EN 12350-6’ya (Anonim 2019c) uygun olarak yapılan birim ağırlık deneylerinin sonuçları Şekil 29’da gösterilmiştir.

Tablo 12 ve Şekil 29’dan da görülebileceği gibi, dört farklı kür ortamı için üretilen numunelerin birim ağırlıkları hemen hemen aynıdır. Sadece su kürü I ortamı için dökülen numunelerin birim ağırlık değerinde diğer gruplara göre %0,45’lük bir düşüş söz konusudur. Bu azalma da anlamlı olmayıp ölçüm hassasiyetinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

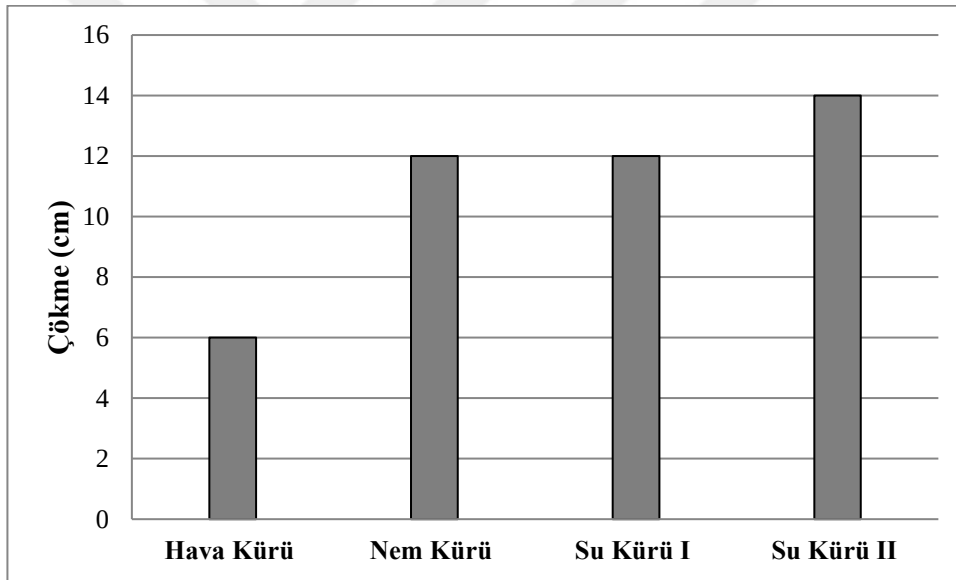


Şekil 29. Farklı kür ortamları için üretilen betonların birim ağırlıkları.

Çökme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Deneyleer için üretilen betonların çökme (slump) değlereri Şekil 30’da grafize edilmiştir.

TS EN 206 + A2’a (Anonim 2021c) göre 5-9 cm arası S2, 10-15 cm arası ise S3 sınıfı olarak belirlenmiştir. Buna göre, hava kürü numuneleri S2, diğer üç kür ortamı için üretilen örnekler ise S3 sınıfına girmektedir. Diğer taraftan, dört grup için aynı karışım hesabı ve aynı döküm yöntemi kullanılmıştır. Gruplar dört günde art arda dökülmüş, laboratuvar ortamının sıcaklık ve nem değlereri yaklaşık olarak aynı olmasına rağmen hava kürü için üretilen numunelerin çökme değlerinin düşük çıkması agregaların nem değlereri ile ilişkilendirilmiştir. Her ne kadar, deneylere başlamadan önce her bir agrega sınıfının nem değlereri özenle belirlenmiş ve karışım suyunun son hali buna göre belirlenmiş olsa da ilk grup için kullanılan yığının üst kısmındaki agregaların nem düzeylerinin iç kısımlara göre biraz daha düşük olabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 30. Farklı kür ortamında üretilen numunelerde çökme değlereri.

Başlıklama İşlemlerinde Karşılaşılan Sorunlar

Manuel öğütme ile başlıklama

Otomatik öğütme (aşındırma) cihazı ne araştırmanın yapıldığı Üniversitenin laboratuvarlarında ne de yakın çevredeki laboratuvarlarda bulunmaktadır. Bu nedenle TS EN 12390-3’de (Anonim 2019a) belirtilen öğütme yöntemi/işlemi, bu çalışmada, elde kullanılan taşlama makinası ile mermer, mozaik, beton, granit ve diğer doğal ve yapay taşlar gibi ürünlerin aşındırılması için üretilmiş olan zımparalar kullanılarak yapılmıştır. Bu önemli

detayı vurgulamak amacıyla da tez çalışmasının tamamında öğütme işleminin adı “manuel öğütme” olarak anılmıştır. Anılan standartta bu isimlendirme geçmemektedir.

Manuel öğütme aşamasında silindir numunelerin yüzeyi; ne kadar özen/dikkat gösterilse, çaba harcansa ve sayısız deneme yapılsa da, Şekil 31’de görüldüğü gibi, istenilen (olması gereken) derecede düzleştirilememiştir. Öyle ki numune yüzeyinde kusursuz bir düzgünlük sağlamak için aşındırmaya devam edildikçe, iri agrega çıkıntılarının numune yüzeyinde daha fazla belirginleştiği, buna karşın, çimento matrisinin de daha fazla oyulduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, Şekil 31’de verilen resimlerden de görülebileceği üzere, numunelerin öğütülen yüzeylerinde bir türlü istenilen düzgünlük sağlanmamış, az ya da çok oyulmalar oluşmuştur. Bu oyukların derinlikleri numuneden numuneye değişkenlik gösterdiği gibi bazı durumlarda aynı numune yüzeyinde birbirinden farklı derinlikte olan oyuklara da rastlanılmıştır. Bu durum, sentil yaprakları ile ölçülmek suretiyle tespit edilmiştir (Şekil 31).



Şekil 31. Manuel öğütme yöntemi ile başlıklamada düzlük kontrolü.

Elmas testere ile keserek başlıklama

Elmas testere (ıslak kesim bıçağı) ile kesim işlemi, numunenin sabitlendiği tablanın dairesel hareket eden bir kol yardımı ile testereye doğru sürülmesi sonucu testerenin numune içine girmesinin sağlanması şeklinde yapılmaktadır (bkz. Şekil 20 a ve b). Hassas kesim olarak bilinen bu işlem esnasında testerenin sabit hızla kesmesinin sağlanması her zaman mümkün olamamaktadır. Bu nedenle, bazı örneklerin kesilen yüzeylerinde kesim (testere) izleri şeklinde pürüzler oluşmuştur. Diğer taraftan, özellikle hızlı kesim yapıldığı durumlarda kesim işleminin sonuna doğru, Şekil 32’deki resimde gösterilen parça kopması söz konusu olmuştur. Bir çok deneme kesimi yapıldıktan sonra testerenin numune içindeki ilerleme hızını düşürmek (yaklaşık 10-12 saniyede 1 tur) ve testerenin silindir numuneden kesilen başlığı ayıracağı en son kısımda, kesim hızını iyice azaltmak suretiyle bu sorunun önüne büyük ölçüde geçilmiştir. Ancak, sorunun tamamen ortadan kalkması sağlanamamıştır. Bu yüzden,

elmas testere ile başlıklama işleminin cihazın yapısı (kaba kesimin yanında ince (hassas) kesime imkan tanınması gibi) ile operatörün tecrübe ve kabiliyetine bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 32. Testere ile kesim sonucu numuneden parça kopması.

Kükürt ile başlıklama

Yapılan deneme başlıklarında silindir numune yüzeyinin temiz olmaması veya yüzeyin nemli olması sonucu yapılan kükürt başlıklamada başlığın numuneden kopması ve başlıkta nemli yüzeyden dolayı kabarcıklar ve boşluklar oluştuğu görülmüştür. Erimiş kükürt sürekli karıştırılmadığı zaman da eritme potası dibinde katı birikimi oluştuğu gözlemlenmiştir. Ancak, bahsedilen sorunlar çözülebilecek türdendir.

Kükürt + silis kumu ile başlıklama

Eritme potasına döküldükten sonra başlık malzemelerinin sürekli karıştırılmadığı durumlarda başlıkta bölgesel olarak silis kumu birikimleri gözlenmiştir. Bu nedenle bu çalışmada, erimiş kükürt karışımı sürekli karıştırılarak hem topaklanma hem de eritme potası dibindeki katı birikimi önlenerek homojen bir karışım elde edilmiştir.

Diğer taraftan, kükürt ve kükürt + silis kumu başlıklamalarında erimiş kükürt hidrojen sülfür gazı salınımı yaparak sağlık açısından çeşitli sorunlara yol açabilmektedir. Bu yüzden başlıklama yapılan ortam iyice havalandırılmalıdır.

Kum kutusu ile başlıklama

TS EN 12390-3 (Anonim 2019a) standardı gereği kum kutusu yöntemi ile silindir numuneler başlıklanırken numunenin yerleştirme cihazına sabitlenmesi gerekmektedir. Ancak, metal başlık içindeki silis kumu üzerine yerleştirildikten sonra silindir numuneyi düşey konumda sabit tutması için ortasından atılan kelepçenin numuneyi sıkması durumunda silindir numune titreşim sonrasında silis kumu yayılırken silindir numunenin aşağı inemediği ve metal başlık içine yerleşmediği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, bu sorunun önüne geçmek için silindir numunenin ortasından atılan kelepçe, numunenin düşey hareketini kısıtlamayacak ve dik konumda kalmasını sağlayacak şekilde ayarlanmıştır.

Kalsiyum alüminat çimentosu ile başlıklama

Başlıklama esnasında numune yüzeyi nemli olmaz, çimento harcının yerleşmesi iyi yapılmaz ve başlıklamadan sonra nem kürüne bırakılmaz ise yapılan başlık numuneden kolayca ayrılmaktadır (Şekil 33).



Şekil 33. Kalsiyum alüminatlı çimento başlığının numuneden ayrılması.

Başlıklama Sürelerinin Değerlendirilmesi

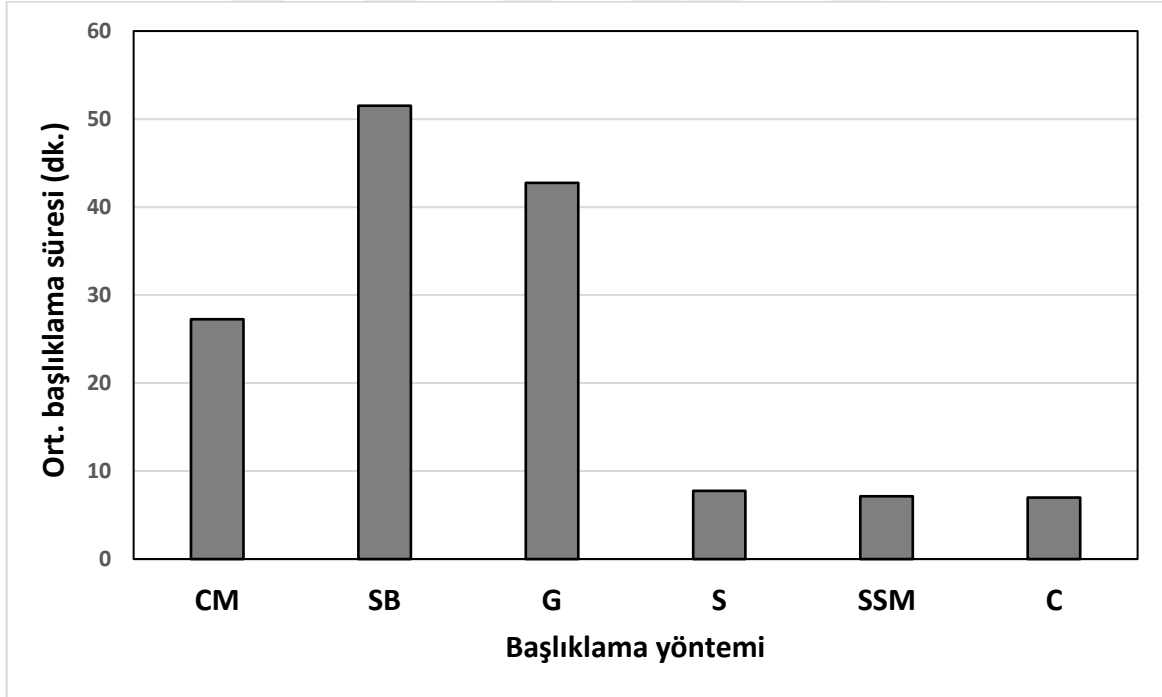
Başlık yapılacak numunelerde gerekli olan başlık malzemeleri ve deney düzenekleri hazırlandıktan sonra, yalnızca numunelerin ortalama başlıklama süreleri belirlenmiştir. Elde edilen bulgular Tablo 13 ve Şekil 34’de verilmiştir.

Tablo 13’den de görülebileceği gibi aynı başlıklama yöntemi için farklı kür koşullarında saklanmış örnekler farklı sürelerde başlıklanmıştır. Ancak, aynı başlıklama türü

için sürelerde ölçülen bu değişikliklerin kür koşuluyla ilişkili olmayıp başlıklamada kazanılan tecrübe ve pratiklik sonucu oluştuğu değerlendirilmektedir. Uzun süren başlıklamalarda (CM, SB ve G) ilk dökülen hava küründen itibaren sürenin gittikçe azalması bu düşüncüyü doğrulamaktadır.

Tablo 13. Başlık Çeşidine Göre Başlıklama Süreleri

Başlıklama yöntemi	Başlıklama süreleri (dk.) (2 adet numune ort.)				Ortalama başlıklama süresi (dk.)
	Hava Kürü	Nem Kürü	Su Kürü I	Su Kürü II	
Kalsiyum Alüminatlı Çimento (CM)	35	30	23	21	27,25
Kum Kutusu (SB)	70	58	40	38	51,50
Manuel Öğütme (G)	46	42	40	43	42,75
Kükürt (S)	8,5	7	8	7,5	7,75
Kükürt + Silis Kumu (SSM)	8	7	6,5	7	7,12
Elmas Testere ile Kesme (C)	7	7	7	7	7,00



Şekil 34. Başlıklama yöntemine göre ortalama başlıklama süreleri.

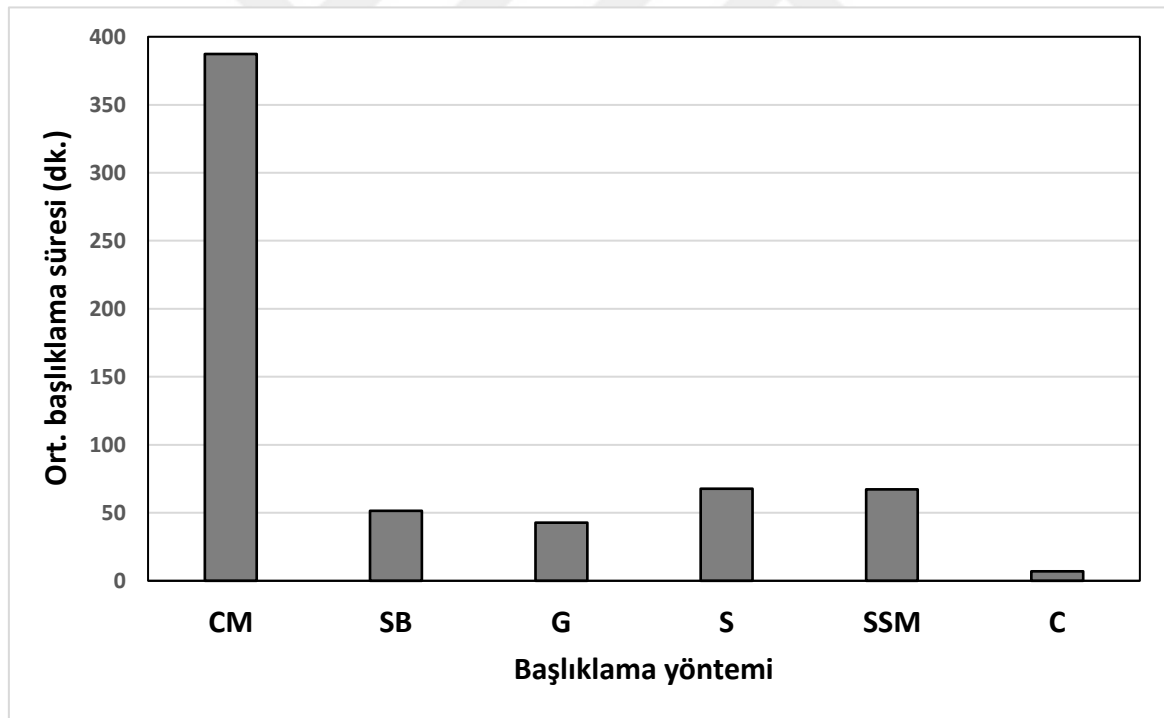
Başlıklama işleminin en kısa sürede gerçekleştirildiği yöntemler; elmas testere ile kesme, kükürt ve kükürt + silis kumudur. Aralarında çok küçük farklılıklar olmasına rağmen bu üç başlıklama yöntemi 7-8 dakikada tamamlamıştır. Bu süreler 2 adet numunenin başlıklama süreleridir. En uzun başlıklama süresi ise kum kutusu başlıklama yönteminde elde

edilmiştir (yaklaşık 1 saat). Bu yöntemi 43 dakikalık başlıklama süresiyle manuel öğütme, 27 dakikalık başlıklama süresiyle de kalsiyum alüminatlı çimento takip etmiştir.

Başlıklama yapılan numunelerin basınç dayanımı deneyine kadar bekletilme süreleri ise Tablo 14 ve Şekil 35’te verilmiştir.

Tablo 14. Başlıklama ve Basınç Dayanımı Deneyine Kadar Geçen Süreler

Başlıklama yöntemi	Ort. başlıklama süre (dk.)	Başlıklamadan sonra deneye kadar olan bekleme süresi (dk.)	Toplam süre (dk.)
Kalsiyum alüminatlı çimento (CM)	27,25	360	387,25
Manuel öğütme (G)	42,75	0	42,75
Kükürt (S)	7,75	60	67,75
Kükürt + Silis kumu (SSM)	7,12	60	67,12
Elmas testere ile kesme (C)	7	0	7



Şekil 35. Başlıklama ve basınç dayanımına kadar geçen toplam bekleme süresi.

Şekil 35’ten görüldüğü gibi en kısa başlıklama ve basınç dayanımı deneyine başlama süresi (7 dk.) elmas testere ile kesme yönteminde elde edilmiştir. Buna karşın, en uzun süre başlıklama ve deneyine başlama süresi ise kalsiyum alüminatlı çimento ile başlıklamada elde edilmiştir. Kükürt ve kükürtlü bileşik ile yapılan başlıklamalarda ise toplam bekleme süresi, kum kutusu ve öğütmeden fazladır. Yalnız başlıklama süresi bakımından en uzun zamanı alan

kum kutusu ve öğütme yöntemlerinin, toplam sürede bakımından, kesmeden sonra en kısa zamanı vermiş olmaları dikkat çekmiştir. Başlıklama için harcanan süre ile basınç dayanımı deneyine kadar beklenen süre hesaba katılarak belirlenen toplam süre bakımından en avantajlı başlıklama yönteminin elmas testere ile kesme olduğu belirlenmiştir.

Başlık Kalınlıklarının Değerlendirilmesi

Çalışmada kükürt, kükürt + silis kumu ve kalsiyum alüminatlı çimento kullanılarak üretilen başlıkların kalınlıkları, öğütme ve kesme (aşındırma) yöntemlerinde numune yüzeylerinden olan kayıpların derinliği ve kum kutusu deneyinde tablalar dâhil ilave kalınlıklar Tablo 15’de verilmiştir.

Tablo 15. Başlıklama Yönteminde Göre Başlık Kalınlıkları

Başlıklama Türü	Başlık Kalınlığı
Kükürt (S)	1,7 mm - 5 mm arası
Kükürt + Silis Kumu (SSM)	3 mm - 6,3 mm arası
Kalsiyum Alüminatlı Çimento (CM)	4,3 mm - 6,6 mm arası
Kum Kutusu (SB)	27 mm - 28 mm arası
Manuel Öğütme (G)	1,3 mm - 4,7 mm arası
Elmas Testere ile Kesme (C)	7 mm - 9,7 mm arası

Bir kısım literatürde kükürt, kükürt + silis kumu ve kalsiyum alüminatlı çimento kullanılarak yapılan başlıklamalarda başlık kalınlıklarının 6 mm’yi geçmemesi önerilirken, TS EN 12390-3’de (Anonim 2019a) başlık kalınlığının 5 mm’yi geçmemesi önerilmektedir. Ancak, anılan standartta küçük mertebedeki bölgesel kalınlık sapmalarına izin verilebileceği de belirtilmiştir.

Tablo 15’den de görülebileceği üzere, kükürt başlıklamada başlık kalınlıkları önerilen aralıkta kalmış iken, kükürt + silis kumu ve kalsiyum alüminatlı çimento ile yapılan başlıklarda 6 mm’nin üzerine çıkıldığı olmuştur. Manuel öğütme ile başlıklamada ise maksimum 4,7 mm’ye kadar numunelerin perdah yüzeyi öğütülmüştür. En fazla kayıp ise elmas testere ile kesme ile başlıklamada görülmüştür. Bu yöntemde 9,7 mm’ye varan başlık kesimi yapılmıştır. Testere kalınlığı (yaklaşık 2 mm) ve testerenin numunenin içine çok az da olsa girmesinin istenmesi gibi etkenlerden dolayı beton örneklerden olan kayıpların miktarı 7 mm’den aşağıya düşürülememiştir. Kum kutusu ile başlıklamada ise metal başlıklama aparatlarının da kullanılmasından dolayı 27 – 28 mm aralığında başlık kalınlıkları elde edilmiştir. Metal başlıklar içindeki kum tabakasının kalınlıkları ise 5 mm civarındadır.

Sertleşmiş Beton Deneyleri Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Başlık malzemelerinin basınç dayanımı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Kaplama şeklindeki yapılan üç başlıklama yöntemi için (S, SSM ve CM) kullanılan başlık malzemeleri ile üretilen küp (50×50×50 mm) numuneler (her bir süre için iki adet) üzerinde deformasyon kontrollü 20 ton kapasiteli pres ile deformasyon hızı 0,8 mm/dk. seçilerek basınç dayanımı testi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 16’da verilmiştir.

Tablo 16. Başlık Malzemelerinin Basınç Dayanımı Sonuçları

Süre	P _{max1}	P _{max2}	σ ₁ (MPa)	σ ₂ (MPa)	σ _{ort} (MPa)
Kükürt (S)					
1/2 Saat	3066	3778	12,3	15,1	13,7
1 Saat	4062	3482	16,2	13,9	15,1
2 Saat	4038	4166	16,15	16,7	16,4
3 Saat	3714	4240	14,9	17,0	15,9
4 Saat	4198	3622	16,8	14,5	15,6
%50 Kükürt + %50 Silis Kumu (SSM)					
1/2 Saat	8486	7468	33,9	29,9	31,9
1 Saat	8860	8272	35,4	33,1	34,3
2 Saat	8254	9902	33,1	39,6	36,3
3 Saat	9512	9174	38,05	36,7	37,4
4 Saat	9166	8084	36,7	32,3	34,5
%75 Kalsiyum Alüminat Çimentosu + %25 Silis Kumu (CM)					
1/2 Saat					
1 Saat					
2 Saat					
3 Saat					
4 Saat	2762	2406	11,05	9,6	10,3
5 Saat	4350	3376	17,4	13,5	15,45
6 Saat	4650	5484	18,6	21,9	20,3

Tablo 16’da gösterilen basınç dayanımı ortalamalarından hareketle kükürt malzemesi ile başlık yapılacak olan numunelerde başlık yapımından 1 saat sonra basınç dayanımı testi yapılmasına karar verilmiştir. Çünkü 1 saat sonra erişilen dayanım değeri (15,1 MPa) ilerleyen saatlerde pek anlamlı olacak şekilde değişmemiştir. Aynı değerlendirme kükürt + silis kumu ile yapılacak değerlendirmeler için geçerlidir. Bu yöntemde de bir saat sonra elde edilen basınç dayanımı değeri (34,3 MPa) daha sonraki saatlerde çok fazla değişmemiştir. Bu nedenle SSM yönteminde de basınç dayanımı testleri başlıklamadan 1 saat sonra gerçekleştirilmiştir. Bu arada kükürt + silis kumu ile üretilen örneklerin sadece kükürt ile üretilen örneklerle aynı sürede (1 saat) iki kattan daha fazla (%127) dayanım vermesi dikkat çekmiştir. Kalsiyum alüminatlı çimento ile yapılan numunelerde ilk 3 saate kadar numunenin sertleşmediği gözlemlenmiş ve Tablo 16’daki ortalama basınç dayanımı değerlerine göre

kalsiyum alüminatlı çimento ile yapılacak olan başlığın basınç dayanımı deneyinden 6 saat önce yapılmasına karar verilmiştir. Kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen küp numunelerin 6 saatlik dayanımı (20,3 MPa) kükürt ve kükürt + silis kumu ile üretilen örneklerin 1 saatlik dayanımlarının arasında çıkmıştır. Bu durumda üç başlıklama yöntemi içinde en kısa sürede en yüksek basınç dayanımına %50 kükürt + %50 silis kumu karşımı ile ulaşılmış olduğunu belirtmek gerekir.

Ultrasonik Dalga Hızı (UPV) Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Ultrasonik dalga hızı deneyi sonuçları aşağıdaki Tablo 17’da verilmiştir.

Tablo 17. Başlıklama Öncesi ve Sonrasına ait UPV Verileri

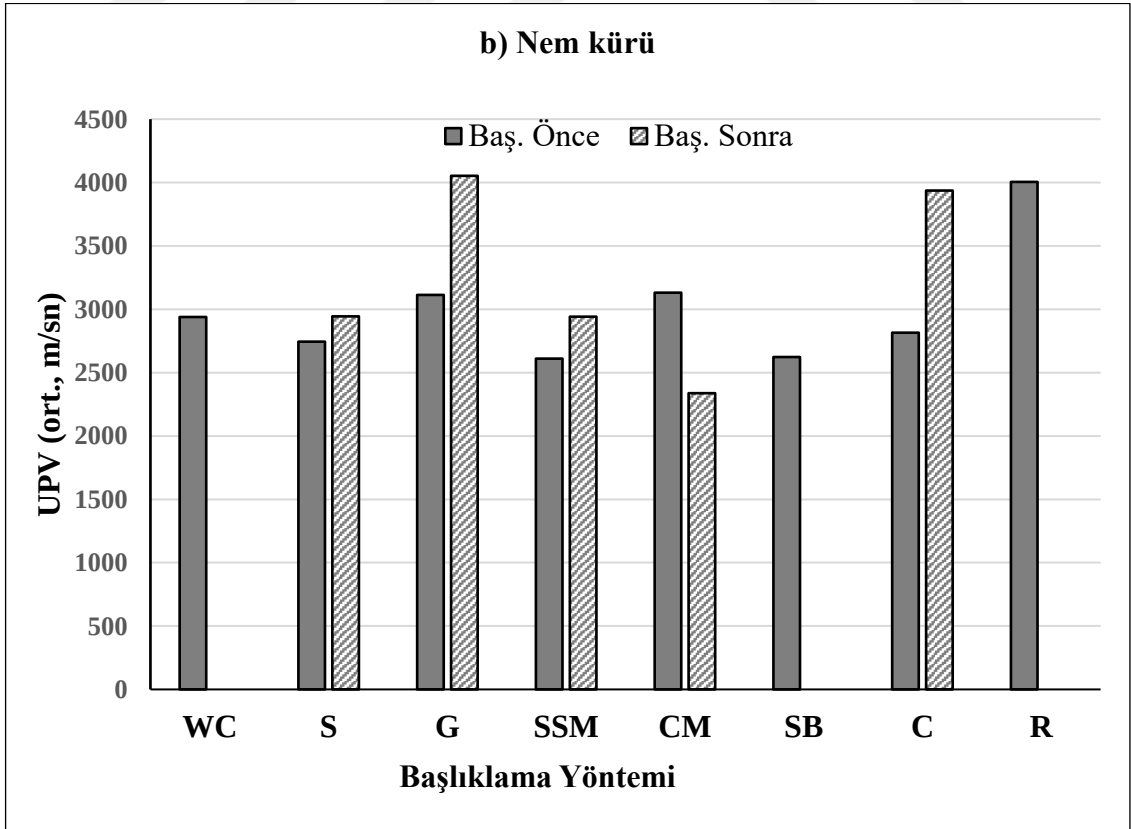
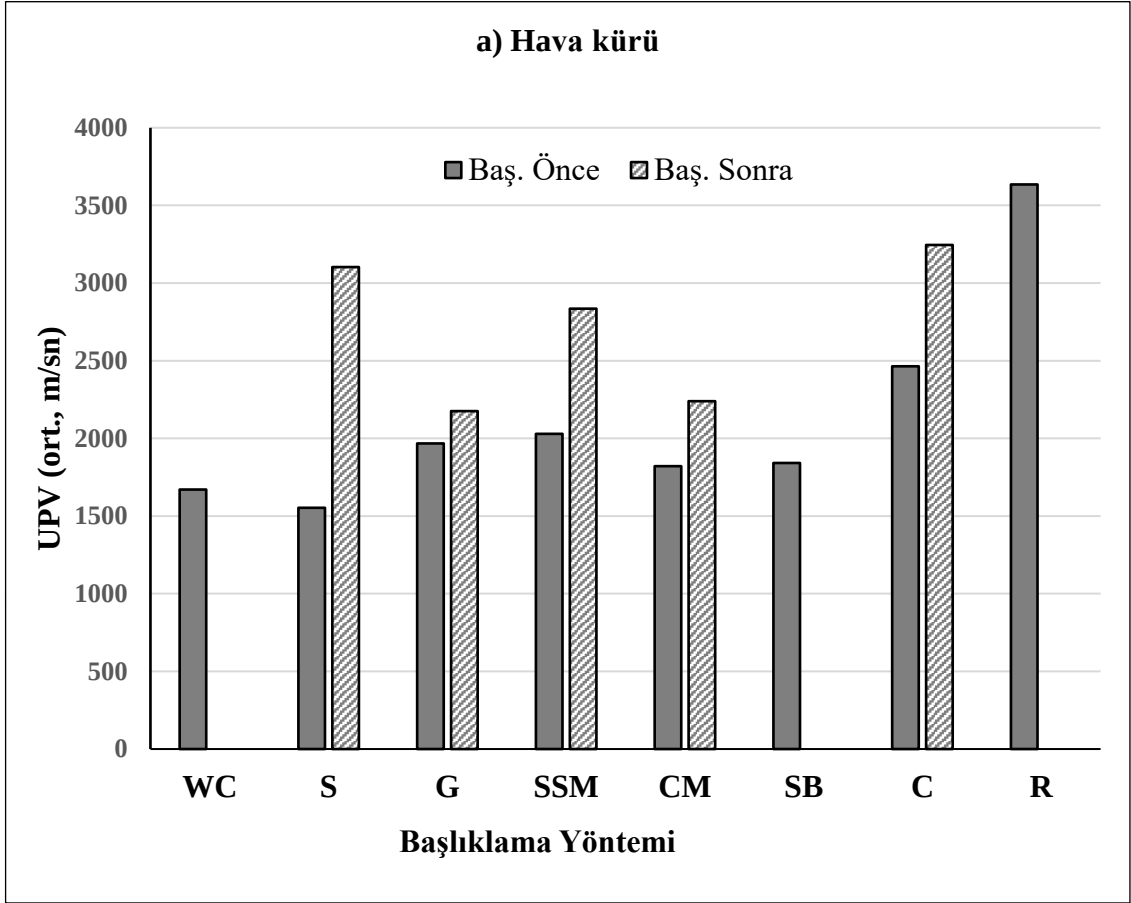
Kod	B.Ö. dalga geçiş süresi (T _ö , μs)	B.S. dalga geçiş süresi (T _s , μs)	B.Ö. Ort. Boy (L _ö , cm)	B.S. Ort. Boy (L _s , cm)	V _{Bö} (m/s)	V _{BS} (m/s)	V _{Bö, ort.} (m/s)	V _{BS, ort.} (m/s)
HAVA KÜRÜ								
A-WC-1	103,6	103,6	20,067	20,07	1937	1937	1670	1670
A-WC-2	142,6	142,6	20,00	20,00	1402,5	1402,5		
A-S-1	146,3	78	20,067	20,23	1372	2594	1553	3104
A-S-2	115,1	55,9	19,967	20,20	1735	3614		
A-G-1	96	93,6	20,067	19,70	2090	2105	1968	2175
A-G-2	108,7	87,3	20,067	19,60	1846	2245		
A-SSM-1	106,1	71,3	20,067	20,47	1891	2870,5	2029	2836
A-SSM-2	92,6	73,9	20,067	20,70	2167	2801		
A-CM-1	116	87,3	20,167	20,80	17386	2383	1821	2240
A-CM-2	104,9	98,1	19,967	20,57	1903	2096,5		
A-SB-1	115,1	Ö. A.	20,00	22,77	1738	Ölçü.	1841	Ölçü.
A-SB-2	103,4	Ö. A.	20,10	22,80	1944	Ölçü.		
A-C-1	80,9	59	20,067	19,23	2480	3260	2464	3246
A-C-2	82,1	59,2	20,10	19,13	2448	3232		
A-R-1	40,8	40,8	14,933	14,93	3660	3660	3634	3634
A-R-2	41,4	41,4	14,933	14,93	3607	3607		
NEM KÜRÜ								
H-WC-1	64,4	64,4	20,03	20,03	3111	3111	2939	2939
H-WC-2	72,5	72,5	20,07	20,07	2768	2768		
H-S-1	73,7	79,6	20,13	20,63	2732	2592	2744,5	2944
H-S-2	72,9	62,1	20,10	20,47	2757	3296		
H-G-1	64,3	48,1	20,07	19,83	3121	4123	3113,5	4053
H-G-2	64,6	49,3	20,07	19,93	3106	4043		
H-SSM-1	72,6	74,1	20,13	20,53	2773	2771	2611	2942
H-SSM-2	82,2	66,6	20,13	20,73	2449	3113		
H-CM-1	65	89,5	20,13	20,77	3097	2320	3131,5	2337
H-CM-2	63,6	88,4	20,13	20,80	3166	2353		
H-SB-1	80	Ö. A.	20,07	22,90	2508	Ölçü.	2623	Ölçü.
H-SB-2	73,9	Ö. A.	20,23	22,93	2738	Ölçü.		
H-C-1	70,6	53,6	20,07	19,27	2842	3594,5	2815	3937
H-C-2	72,1	45,1	20,10	19,30	2788	4279		
H-R-1	37,6	37,6	14,90	14,90	3963	3963	4006	4006
H-R-2	36,8	36,8	14,90	14,90	4049	4049		

Tablo 17. (Devamı)

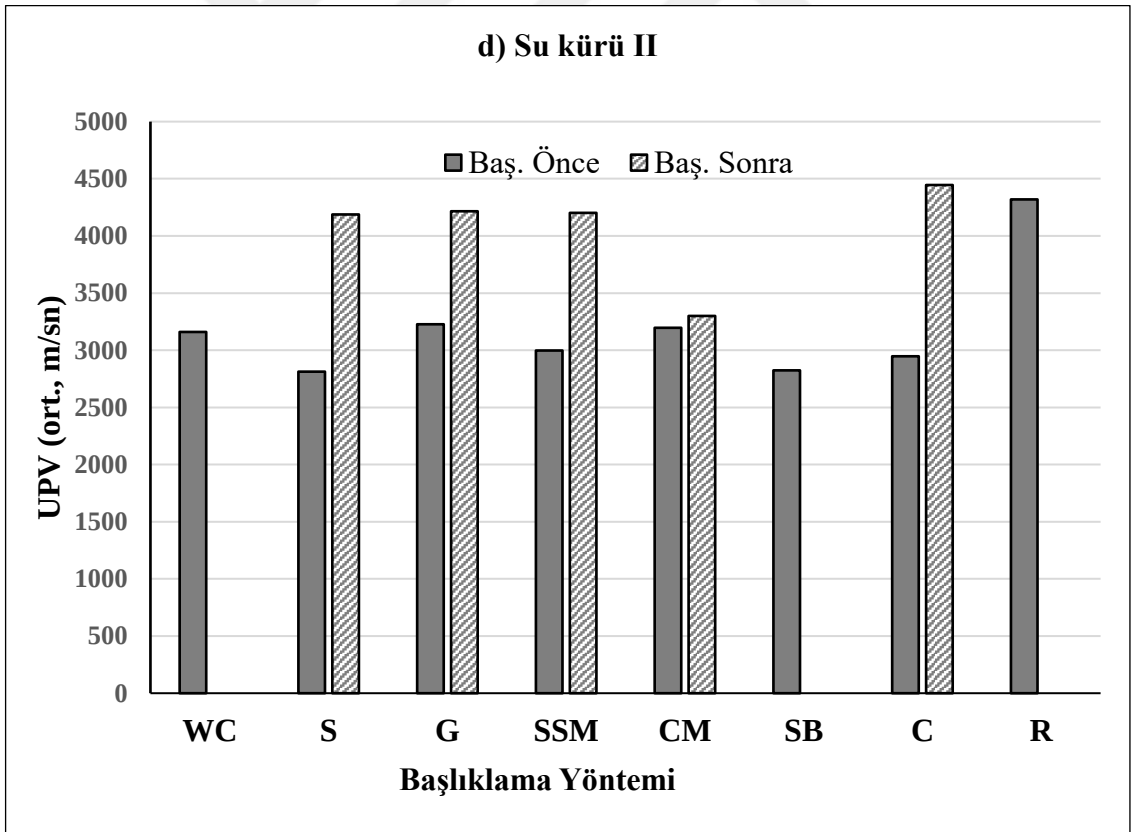
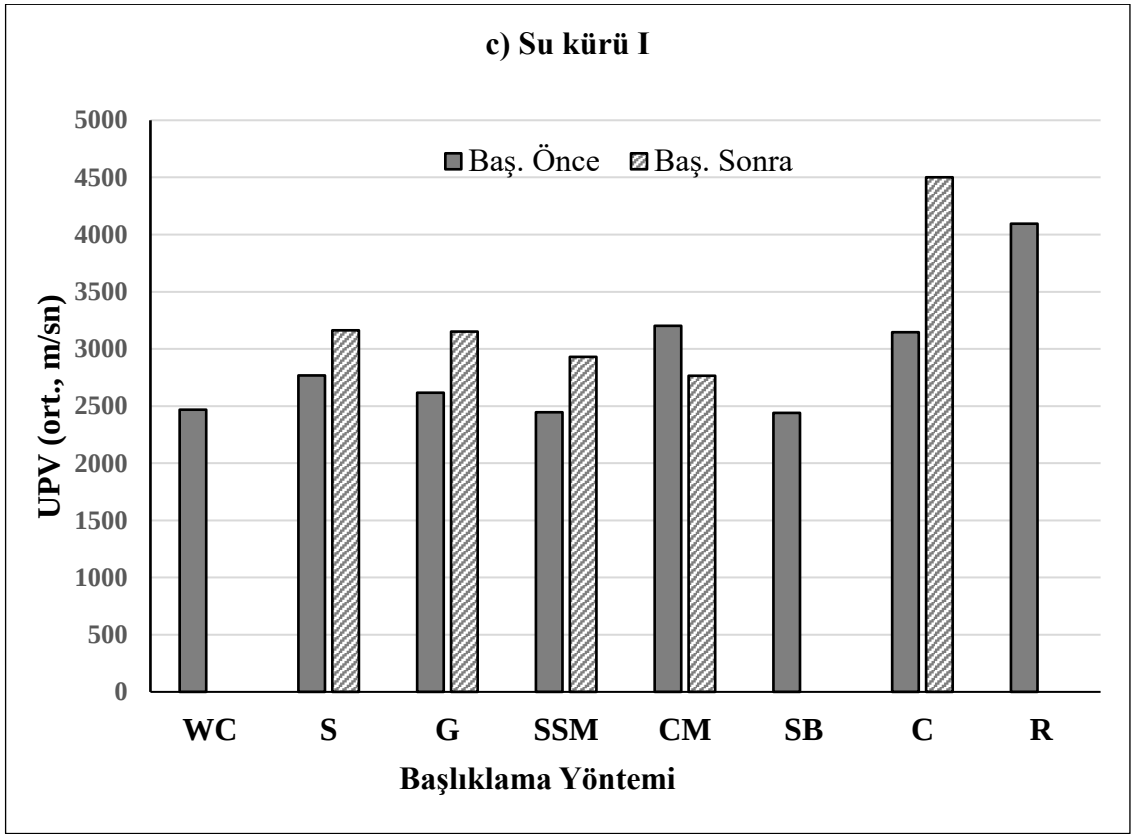
SU KÜRÜ I								
WI-WC-1	81,8	81,8	19,97	19,97	2441	2441	2468	2468
WI-WC-2	80,4	80,4	20,07	20,07	2496	2496		
WI-S-1	72,7	63,8	20,07	20,33	2760	3187	2767	3163
WI-S-2	72,2	64,9	20,03	20,37	2775	3138		
WI-G-1	80,6	62,9	20,07	19,83	2490	3153	2615,5	3151
WI-G-2	73,2	63	20,07	19,83	2741	3148		
WI-SSM-1	82,7	65,5	20,03	20,33	2422	3104	2445	2930
WI-SSM-2	81,2	73,9	20,03	20,37	2467	2756		
WI-CM-1	63,4	74,1	20,03	20,63	3160	2784,5	3201	2765
WI-CM-2	62	75,5	20,10	20,73	3242	2746		
WI-SB-1	81,5	Ö. A.	20,10	22,90	2466	Ö. A.	2441	Ö. A.
WI-SB-2	83,2	Ö. A.	20,10	22,87	2416	Ö. A.		
WI-C-1	59,7	43,2	20,03	19,33	3357	4475	3147	4500
WI-C-2	68,3	42,8	20,07	19,37	2938	4525		
WI-R-1	36,2	36,2	14,93	14,93	4125	4125	4096	4096
WI-R-2	36,8	36,8	14,97	14,97	4067	4067		
SU KÜRÜ II								
WII-WC-1	64,1	64,1	20,07	20,07	3130,5	3130,5	3160	3160
WII-WC-2	62,9	62,9	20,07	20,07	3190	3190		
WII-S-1	71,6	49,2	20,20	20,50	2821	4167	2813	4189
WII-S-2	71,8	48,6	20,13	20,47	2804	4211		
WII-G-1	62,8	46,9	20,07	19,87	3195	4236	3227	4216
WII-G-2	62,1	47,5	20,23	19,93	3258	4196,5		
WII-SSM-1	62,9	49,1	20,07	20,57	3190	4189	2997	4201
WII-SSM-2	71,1	48,1	19,93	20,27	2803,5	4213		
WII-CM-1	63,2	67	20,17	20,63	3191	3080	3196	3300
WII-CM-2	63,1	58,6	20,20	20,63	3201	3521		
WII-SB-1	72	Ö. A.	20,20	22,97	2805,5	Ö. A.	2824	Ö. A.
WII-SB-2	71,3	Ö. A.	20,27	23,00	2842	Ö. A.		
WII-C-1	67,2	42,9	20,03	19,23	2981	4483	2946	4446
WII-C-2	68,7	43,4	20,00	19,13	2911	4409		
WII-R-1	35,1	35,1	15,07	15,07	4292,5	4292,5	4319	4319
WII-R-2	34,6	34,6	15,03	15,03	4345	4345		

Kısaltmalar: B.Ö.: Başlıklamadan Önce; B.S.: Başlıklamadan Sonra; Ö.A.: Ölçüm Alınmadı

Başlıklamadan önce ve sonra ölçülen ultrasonik dalga hızı değerlerinin ortalamalarından hareketle oluşturulan grafikler Şekil 36'da verilmiştir. Kum kutusu ile başlıklamada UPV okuması yapılamadığı, referans (R) ve başlıksız (WC) numunelerin ise başlıklamadan sonraki UPV değerleri bulunmadığı için Şekil 36'da sadece bir sütunla gösterilmiştir. Tablo 17 ve Şekil 36'dan hareketle yapılan değerlendirmeler ise grafiklerden sonra verilmiştir. Tablo 17'de R ile gösterilen kod, referans numune olarak üretilen küp numuneleri göstermektedir. Bu örnekler silindir numunelerle birlikte her bir kür ortamı içinde aynı koşullarda saklanmışlardır.



Şekil 36. Hava kürü numunelerinin başlıklamadan önce ve sonra  l  len UPV



Şekil 36. Hava kürü numunelerinin başıklamadan önce ve sonra ölçülen UPV (devamı)

Filiz (2006) tarafından yapılan çalışmada beton içerisindeki boşlukların ultrases hızını etkileyen en önemli faktör olduğunu ve ultrases geçiş hızının yüksek olan betonun kalitesinin

de yüksek olacağı belirtilmiştir. Diğer taraftan, literatürde ultrases hızı ile betonun kalitesi arasında nicel ilişkilerin kurulduğu çalışmalara da rastlanılmaktadır. Bu çalışmalardan en meşhur olan ikisi Tablo 18’de verilmiştir.

Tablo 18. Ultra Ses Hızı ve Beton Kalitesi İlişkisi

	Mükemmel	İyi	Şüpheli	Zayıf	Çok Zayıf	Kaynak
Dalga Hızı (m/sn)	>4500	3500-4500	3000-3500	2000-3000	<2000	Erdoğan (2003) ¹⁰
	>4575	3660-4575	3050-3660	2135-3050	<2135	Malhotra (1976)

Görülüşü gibi her iki araştırmacı tarafından verilen aynı olmasa da birbirlerine yakındır. Bu çalışmada elde edilen ve Tablo 17’de verilen ultrases hızı değerleri Tablo 18’de verilen aralıklar ile karşılaştırıldığında her bir kür ortamında saklanan betonların kalitesi ile ilgili yapılacak değerlendirme sonuçları Tablo 19’da özetlenmiştir.

Tablo 19. Farklı Kür Koşullarında Elde Edilen Ultrases Hızı Değerleri

Kür ortamı	Numune tipi	Başlıklamadan önceki max.-min. dalga hızı (m/sn.)	Başlıklamadan sonraki max.-min. dalga hızı (m/sn.)
Hava Kürü	Silindir	1553-2464 Çok Zayıf-Zayıf	1670-3246 Çok Zayıf-Şüpheli
	Küp	3634 İyi	-
Nem Kürü	Silindir	2611-3131 Zayıf-Şüpheli	2337-4053 Zayıf-İyi
	Küp	4006 İyi	-
Su Kürü I	Silindir	2441-3201 Zayıf-Şüpheli	2468-4500 Zayıf-İyi
	Küp	4096 İyi	-
Su Kürü II	Silindir	2813-3227 Zayıf-Şüpheli	3160-4446 Şüpheli-İyi
	Küp	4319 İyi	-

Tablo 19’dan da görülebileceği üzere her dört ortamda kür edilen küp numunelerin (referans numuneler) kalitesi “iyi” dir. Bu numunelerden havada kür edilenlerin UPV değerleri en düşük, deneyden 10 saatten da kısa sürede su kürü havuzundan çıkarılan (su kürü

¹⁰ Erdoğan (2003) bu oranları “Whitehurst, E.A., *Soniscopes Tests Concrete Structures*, Journal of American Concrete Intitute, 47, Feb. 1951, pp.443-444” künyeli kaynaktan aktarmıştır.

II) örneklerin ise en yüksek UPV değerine sahip olduğunun belirlenmesi anlamlı bulunmuştur. Havada kür edilen örneklerin UPV değerlerine oranla nemli ortam, su kürü I ve su kürü II ortamlarında kür edilmiş olan betonların UPV değerleri, sırasıyla, %10,2, %12,7 ve %18,8 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. Bu oranlar, betonun dayanım kazanması üzerinde kür ortamının etkisini açıkça göstermektedir. Diğer taraftan, nemli ortamda beton dayanım kazanmaya devam etmesine rağmen ideal kür ortamının su ortamı olduğu söylenebilir. Hatta örneklerin deneyden 24 saat önce kür ortamından çıkarmanın, deneyden hemen önce çıkarmaya göre, betonun dayanım artışı olumsuz yönde etkileyeceği yine bu oranlardan hareketle söylenebilir.

Farklı kür ortamında saklanmış silindir örneklerin UPV değerlerinin kalitelerinde de farklılık söz konusu olmuştur. Tablo 19'dan da görülebileceği üzere, UPV değerlerinin alt ve üst sınırlarından hareketle, havada kür edilenlerin “çok zayıf-şüpheli”, diğer üç ortamda kür edilenlerin ise “zayıf-iyi” kalitede oldukları söylenebilir. Görüldüğü gibi bu sınıflandırmada da havada kür edilen örnekler, başlıklamadan önce ve sonraki UPV değerleri bakımından en alt kategoride yer almaktadır.

Silindirdir örnekler başlık yapıldıktan sonra yapılan UPV okumalarının, başlıksız durumlarına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Değişim oranları Tablo 20’de her bir başlıklama yöntemi ve kür ortamı için toplu olarak gösterilmiştir. Kum kutusu (SB) yönteminde başlıklamadan sonra okuma yapılamadığından tabloda bu başlıklama gösterilmemiştir.

Tablo 20. Başlıklanan Silindir Örneklerin UPV Değerlerinde Ölçülen Değişim (%)

Başlıklama Y.	Hava kürü	Nem kürü	Su kürü I	Su kürü II
S	100	7	14	49
G	11	30	20	31
SSM	40	13	20	40
CM	23	-25	-14	3
C	32	40	43	51

Tablo 20’den de görülebileceği üzere başlık yapmak, silindir örneklerden geçen ultrases hızlarını genelde artırmıştır. Hava ve su kürü II ortamında saklanan örneklerin beş farklı yöntemin hepsi ile, nem ve su kürü I ortamında saklananların ise dört farklı yöntemle başlıklanması ile UPV değerlerinde net yükseliş olmuştur. Kalsiyum alüminatlı çimento harcı (CM) ile kaplanan örneklerde ise nem ve su kürü I ortamında saklananların UPV değerlerinin başlıklandıktan sonra düşmesi ilginç bulunmuştur. Bu başlıklama yöntemi ile başlıklanan hava ve su kürü II örneklerindeki artışların da diğer başlıklama yöntemlerine göre düşük

çıkması dikkat çekmektedir. En fazla UPV artışı (%100) havada kür edilmiş örneklerin kükürt ile başlıklanması sonucu elde edilmiştir.

Ultrasonik dalga hızının başlıklama ile artmasının nedeni, başlıklamanın numune yüzeyini düzgünleştirmesidir. UPV cihazının probu boşluksuz ve düzgün yüzeye tam temas sağlayacağı için dalga hızının geçiş hızı da daha doğru okunabilmektedir. UPV ölçümlerinin örneklerin yüzey topografyasından etkilendiğinin kanıtlanması, tahribatsız deney yöntemlerinin tahmini sonuç verdiğinin bir kanıtı olarak değerlendirilebilir. Çünkü deneysel bulgular, probun numune yüzeyi ile teması derecesinin betonun ultrases dalgası geçiş hızı ile belirlenebilen kalitesini etkilediğini göstermiştir.

Diğer taraftan, hava ortamına göre nem ve su ortamlarının betonların UPV değerlerini artırmasının nedeni ise bu ortamların betondaki boşluk hacminin azalması ve boşluk yapısının incelmeye yol açmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, Etsuzo and Nobuyoshi (2017) ve Güneyli et al. (2017) tarafından yapılan çalışmalarda beton numunelerin nem içerikleri arttıkça numunelerin UPV değerlerinin de arttığı rapor edilmiştir.

Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları ve Değerlendirmeler

Eksenel basınç dayanımı deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 21’de verilmiştir.

Tablo 21. Basınç Dayanım Sonuçları ve Silindir/Küp ile Silindir/Başlıksız Oranları

Kod	σ (MPa)	σ_{ort} (MPa)	$\sigma_{sil}/\sigma_{küp}$	$\sigma_{sil}/\sigma_{başlıksız}$
Hava kürü				
A-WC-1	16,36	15,36	0,45	1
A-WC-2	14,37			
A-S-1	19,62	21,09	0,61	1,37
A-S-2	22,56			
A-G-1	14,74	14,13	0,41	0,92
A-G-2	13,52			
A-SSM-1	21,55	21,66	0,63	1,41
A-SSM-2	21,77			
A-CM-1	19,63	21,55	0,63	1,40
A-CM-2	23,48			
A-SB-1	24,79	24,80	0,72	1,61
A-SB-2	24,80			
A-C-1	22,41	23,82	0,69	1,55
A-C-2	25,22			
A-R-1	35,00	34,30	1,00	
A-R-2	33,61			
Nem kürü				
H-WC-1	14,96	14,96	0,48	1
H-WC-2	14,97			
H-S-1	24,60	24,06	0,78	1,61
H-S-2	23,53			

Tablo 21. (devamı)

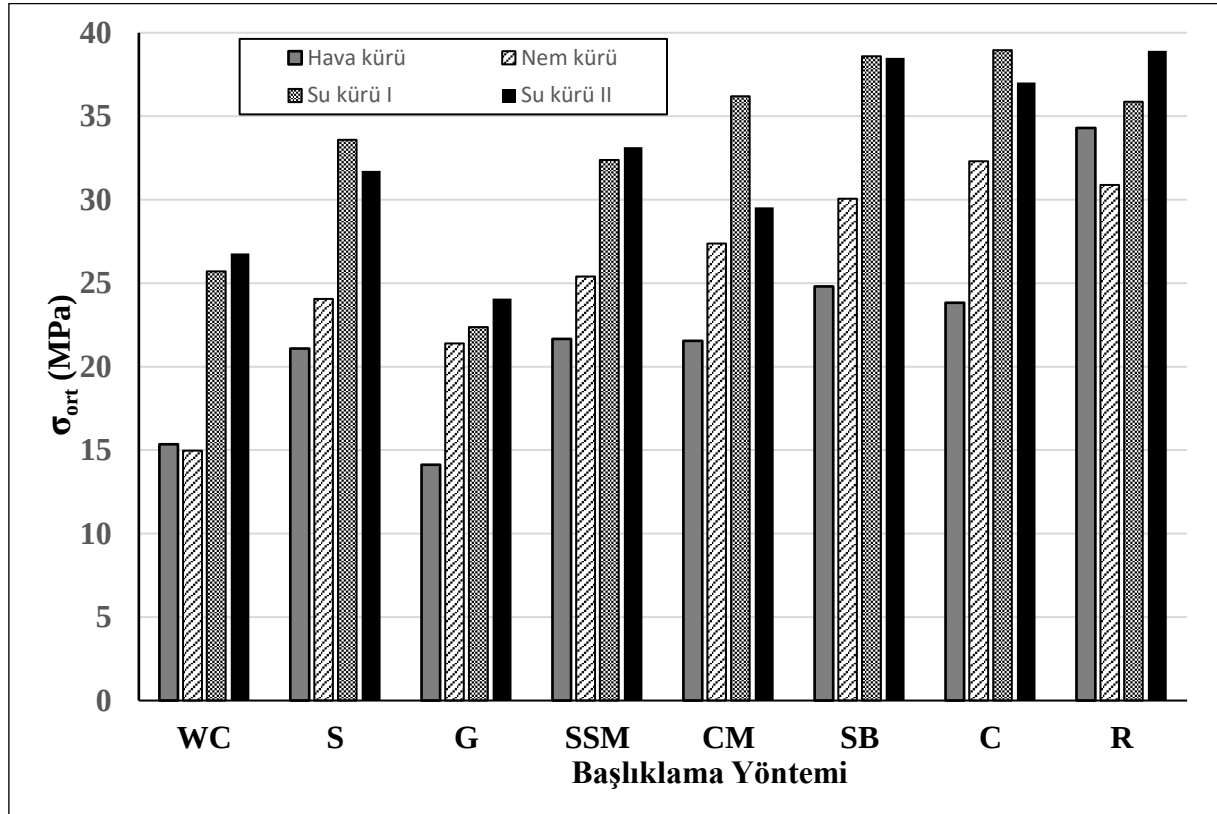
H-G-1	20,39	21,39	0,69	1,43
H-G-2	22,39			
H-SSM-1	23,43	25,39	0,82	1,70
H-SSM-2	27,35			
H-CM-1	24,24	27,38	0,89	1,83
H-CM-2	30,51			
H-SB-1	31,41	30,06	0,97	2,01
H-SB-2	28,70			
H-C-1	36,38	32,30	1,05	2,16
H-C-2	28,22			
H-R-1	32,16	30,89	1,00	
H-R-2	29,61			
Su kürü I				
WI-WC-1	29,75	25,71	0,72	1
WI-WC-2	21,68			
WI-S-1	36,27	33,58	0,94	1,31
WI-S-2	30,89			
WI-G-1	23,38	22,37	0,62	0,87
WI-G-2	21,36			
WI-SSM-1	30,00	32,37	0,90	1,26
WI-SSM-2	34,74			
WI-CM-1	36,68	36,20	1,01	1,41
WI-CM-2	35,73			
WI-SB-1	37,41	38,59	1,08	1,50
WI-SB-2	39,77			
WI-C-1	41,11	38,96	1,09	1,52
WI-C-2	36,80			
WI-R-1	37,83	35,87	1,00	
WI-R-2	33,92			
Su kürü II				
WII-WC-1	27,66	26,78	0,69	1
WII-WC-2	25,91			
WII-S-1	34,79	31,72	0,82	1,18
WII-S-2	28,65			
WII-G-1	27,39	24,08	0,62	0,90
WII-G-2	20,76			
WII-SSM-1	30,87	33,15	0,85	1,24
WII-SSM-2	35,43			
WII-CM-1	32,33	29,54	0,76	1,10
WII-CM-2	26,74			
WII-SB-1	38,31	38,50	0,99	1,44
WII-SB-2	38,70			
WII-C-1	38,17	37,01	0,95	1,38
WII-C-2	35,85			
WII-R-1	35,48	38,92	1,00	
WII-R-2	42,35			

Tablo 21'e genel olarak bakıldığında silindir numunelerde tekil sonuçların 41 MPa-13,5 MPa, ortalamaların ise 39 MPa-14 MPa arasında değiştiği söylenebilir. Farklı başlıklama yöntemleri uygulanan numunelerin basınç dayanımları değişim kür ortamına bağlı olarak

değişkenlik arz etmiştir. Bu nedenle, bu başlık altında verilen sonuçların değerlendirilmesi kür ortamına bağlı olarak yapılması uygun bulunmuştur.

Ortalama basınç dayanımı bakımından sonuçların değerlendirilmesi

Tablo 21’de verilen bulgulardan ortalama basınç dayanımı ile ilgili olanlar kür ortamına da bağlı olarak Şekil 37’de verilmiştir. Anılan şekilde başlıksız olarak dayanım testine tabi tutulmuş olanlar (WC) ve referans (küp) örnekler (R) de gösterilmiştir.



Şekil 37. Ortalama basınç dayanımlarının kür ortamı ve başlıklama yöntemine göre değişimi

Şekil 37’den de görülebileceği üzere tüm örneklerin ortalama basınç dayanımları kür ortamına ve başlıklama yöntemine bağlı olarak değişmiştir. Tablo 21’den silindirlerden havada kür edilmiş olanların 20,3 MPa, nem küründe saklananların 25,1 MPa, su kürü I’de tutulanların 32,5 MPa ve su kürü II’de bekletilmiş olanların 31,5 MPa’lık ortalama basınç dayanımına sahip oldukları hesaplanmıştır. Bu durumda havada kür edilmiş örneklerle göre nem, su kürü I ve II saklanmış olanların dayanımları, sırasıyla, %23, %60 ve %55 oranında artmıştır. Bu ortalamalar başlıksız ve altı yöntemle başlıklama yapılmış silindirlerin ortalama basınç dayanımlarıdır. Görüldüğü gibi, su küründe saklanmış olan örnekler, havada ve nemli ortamda (ıslak telis bezinde) saklanmış olanlara göre daha yüksek dayanım değerlerine sahiptirler.

Diğer taraftan, aynı ortamda kür edilmiş örnekler başlıklandıktan sonra, başlıklama yöntemine bağlı olarak dayanımlarında değişiklikler olmuştur.

Tablo 22. Başlıksız Örneklerin Dayanımına Oranla Başlıklananların Dayanımındaki Değişim (%)

Başlıklama Y.	Hava kürü	Nem kürü	Su kürü I	Su kürü II
S	37	61	31	18
G	-8	43	-13	-10
SSM	41	70	26	24
CM	40	83	41	10
SB	61	101	50	44
C	55	116	52	38

Tablo 22’den görüldüğü üzere havada kür edilmiş örneklerin basınç dayanımları başlıklama yöntemine bağlı olarak genelde artmıştır. Yalnızca manuel öğütülme yöntemiyle (G) başlıklanan örnekler, nem kürü hariç, bir düşüş söz konusu olmuştur. Bunun da nedeni, Başlıklama İşlemlerinde Karşılaşılan Sorunlar başlığı altında açıklanmış olan manuel öğütmede yaşanan güçlüklerdir. Bu yöntemin dışında kalan beş yöntem de betonun başlıklanması ile başlıksız haline göre dayanım artışı görülmüş olması önemlidir.

Diğer taraftan, her dört kür ortamı için de geçerli olmak üzere en yüksek dayanım artış oranları kum kutusu (SB) yönteminden elde edilmiştir. Öyle ki nem küründe, kum kutusu yöntemi ile yapılan başlıklama ile elde edilen dayanım artışı başlıksız örneklerin dayanımının iki kadardır (%101).

Kür ortamları arasında yapılan karşılaştırmada ise tüm başlıklama yöntemleri için geçerli olmak üzere en yüksek dayanım artışlarının nem kürü koşulunda elde edildiği yine Tablo 22’den açıkça görülmektedir. Öyle ki 27 gün ıslak telis bezinde (nem kürü) saklanan örneklerin manuel öğütülmesinde bile diğerleri gibi sorun yaşanmamış ve bu yöntemle başlıklanan betonların dayanımları başlık olanlara göre %43 oranında daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuç, başlık türü ne olursa olsun, başlıklama esnasında numunenin belirli bir nem düzeyine sahip olmasının önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Su kürü uygulanmış örneklerin basınç dayanımlarına bakıldığında ise iki farklı yöntem arasında farklılık çok dramatik olmadığı görülmüştür. Bu iki yöntem birbirine benzer sonuçlar vermiştir. Nitekim su kürü I’e göre kür edilen silindirlerin 32,5 MPa, su kürü II’ye göre kür edilenlerin ise 31,5 MPa’lık ortalama basınç dayanımına sahip oldukları yukarıda belirtilmişti. Tablo 22’de verilen başlıksız numunelere göre başlıklı olanların dayanım artış oranları bakımından karşılaştırıldığında ise kükürt + silis kumu harcı (SSM) yönteminde hemen hemen aynı artışı göstermişlerken, öğütme hariç, diğer üç yöntemde su kürü I’in su kürü II’ye göre daha fazla artışa neden olduğu söylenebilir.

Nem kürü ile su kürü sonuçları birbiri ile mukayese edildiğinde ise Tablo 22’de verildiği gibi nem küründe saklanan örneklerin dayanımlarının suda kür edilmiş olanlardan daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak, bu sonuçlar, en ideal kür ortamının nem olduğunu göstermez. Çünkü ortalama dayanım açısından bakıldığında nem küründe saklananların 25,1 MPa, su küründe saklananların ise 32 MPa olduğu görülmektedir. Arada %28’lik bir fark söz konusudur. Nemli ortamda saklanmış örneklerin dayanımları su içinde saklanmış olanlardan daha düşük olunca başlıklamanın olumlu etkisi ile ortaya çıkan dayanım artışı her iki kür ortamı için de aynı değerde olsa, nem ortamındaki oran daha yüksek olacaktır. Nitekim başlıksız örneklerin dayanımlarına bakıldığında nemli ortamda olanların 15 MPa, su küründe saklanmış olanların ise 26 MPa olduğu görülür. Benzer durum, havada kür edilmiş örnekler içinde geçerlidir. Aslında havada kür edilmiş örneklerdeki dayanım artışı da kayda değerdir (Tablo 22). Ancak artış oranlarının bu denli yüksek olmasının asıl nedeninin hava kürüne tabi tutulmuş örneklerin basınç dayanımlarının çok düşük (ortalama 20,3 MPa) olmasıdır. Dayanım bu düzeyde düşük olunca başlıklamanın etkisiyle ortaya çıkan dayanım artışı rakamsal olarak az olsa bile oransal olarak yüksek hesaplanmaktadır. Bununla birlikte, havada kür edilmiş örneklerde de başlıklamanın etkisin bariz olduğunu göstermesi bakımından sonuçlar anlamlı bulunmuştur.

Çalışmada havada kür edilmiş örneklerin dayanımlarına göre nemli ortamda saklanmış ve su kürü uygulanmış örneklerdeki dayanım değişimleri de incelenmiştir. Sonuçlar toplu olarak Tablo 23’te verilmiştir.

Tablo 23. Havada Kür Edilmiş Örneklerin Basınç Dayanımlarına Oranla Diğer Kür Ortamlarında Saklanan Numunelerin Dayanımlarındaki Değişim (%)

Başlıklama Y.	Nem kürü	Su kürü I	Su kürü II
Başlıksız (WC)	-3	67	74
S	14	59	50
G	51	58	70
SSM	17	49	53
CM	27	68	37
SB	21	56	55
C	36	64	55
Referans küp	-10	5	13

Havada kür edilmiş örneklerin dayanımına oranla nemli ortam ve su içinde kür edilmiş olan betonların dayanımlarının arttığı Tablo 23’ten görülmektedir. Yalnızca başlıksız olan ve küp numunenin nemli ortamda dayanımlarında bir miktar düşüş söz konusudur. Yine Tablo 23’ten, başlıksız olan ve küp numunede dâhil olmak üzere tüm başlıklama yöntemleri için su

içinde bekletilmiş örneklerdeki dayanım artışlarının nemli ortamda saklanmış olanlardan daha yüksek olduğu görülmektedir.

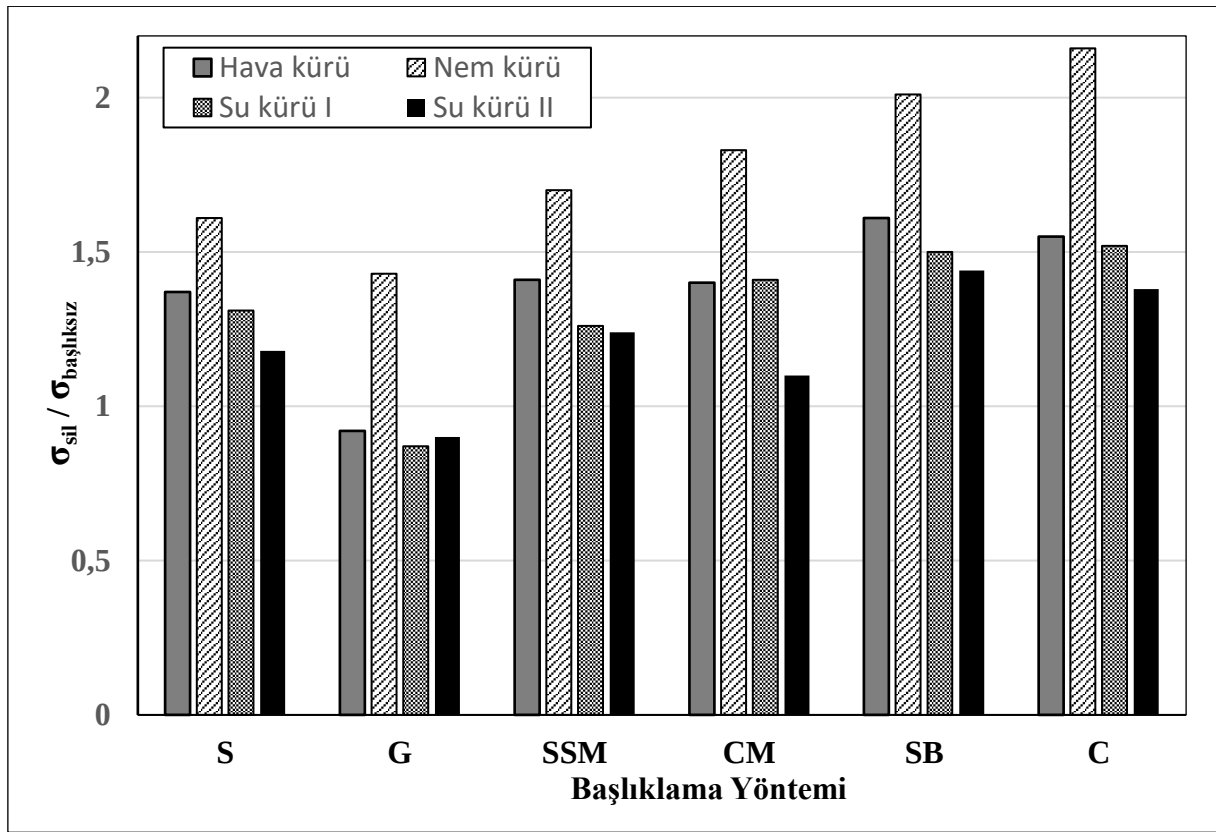
Diğer taraftan, su kürü I ile su kürü II ortamlarının silindir örneklerin basınç dayanımlarında artış üzerindeki etkisi net olarak belirlenememiştir. Nitekim Tablo 23'ten bazı başlıklama türleri için su kürü I, bazıları için ise su kürü II yönteminin daha yüksek sonuç verdiği görülmektedir. Kum kutusu yönteminde de her iki ortamda hemen hemen aynı oranda artış göstermiştir. Başlıksız örnekler ve küp numunelerde ise su kürü II ortamının daha yüksek sonuç verdiği belirlenmiştir.

Kür ortamlarının betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi numunede olan suyun buharlaşmasının önüne geçip geçmemesi ile ilişkilidir. Havada kür edilmiş örneklerle kıyasla nem ve su küründe betonu saklamak, suyun buharlaşarak hem boşluklar oluşturmamasının hem de rötre çatlakları ortaya çıkmasının önüne geçtiği gibi hidrasyon reaksiyonunun devamlılığı için gerekli su miktarının azalmasını da engellemektedir. Bu çalışmadan elde edilen bulgular, engellemenin en iyi su küründe, ona yakın düzeyde nem küründe, en az ise hava küründe sağlandığını göstermiştir. Çünkü kür ortamına göre basınç dayanımlarının yüksekten düşüğe doğru sıralaması bu şekilde olmuştur.

Bu çalışmada elde edilen kür ortamı ile ilgili sonuçlar literatürle uyumludur. Sönmezoğlu (2005) tarafından yapılan çalışmada 3, 7 ve 28 günlük hava kürü, naylon kürü (numuneleri naylon torbalara yerleştirip hava almaması sağlanmış) ve su kürü (23 ± 2 °C kür tankında) olmak üzere 3 farklı kür yöntemi uygulanmıştır. Sonuç olarak en yüksek dayanım sonuçları su kürü numunelerinde daha sonra naylon kürü numunelerinde ve en düşük dayanım sonuçları ise hava kürü numunelerinde elde etmiştir. Uysal vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada beton numunelere hava, naylon ve su kürü işlemleri uygulanmıştır. Sonuç olarak naylon kürünün hava küründen 7 günlük dayanımda %9,1, 28 günlük dayanımda %11,3, 90 günlük dayanımda %5,6 daha fazla dayanım sonucu vermiştir. Su kürü numuneleri ise naylon küründen 7 günlük dayanımda %9,6, 28 günlük dayanımda %8,7 ve 90 günlük dayanımda %8,1 daha fazla dayanım sonucu verdiği belirtilmiştir.

Başlıklı ve başlıksız silindir örneklerin basınç dayanımlarının değerlendirilmesi

Çalışmada başlıklamanın numunelerin basınç dayanımları üzerindeki etkilerini daha açık bir şekilde belirleyebilmek amacıyla başlıksız örneklerle mukayese yoluna da gidilmiştir. Şekil 38'de başlıksız numunelerin dayanımına oranla başlıklı numunelerdeki dayanım değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 38. Başlıksız ve başlıklı numunelerin dayanım oranının başlıklama yöntemi ve kür ortamına göre değişimi

Şekil 38’den de görülebileceği gibi, manuel öğütme yönteminin nem kürü hariç, diğer tüm kür ortamları ve başlıklama yöntemlerinde silindir örneklerin dayanımları artmıştır. En yüksek artış ise tüm başlıklama yöntemleri geçerli olmak üzere nem küründe görülmüştür.

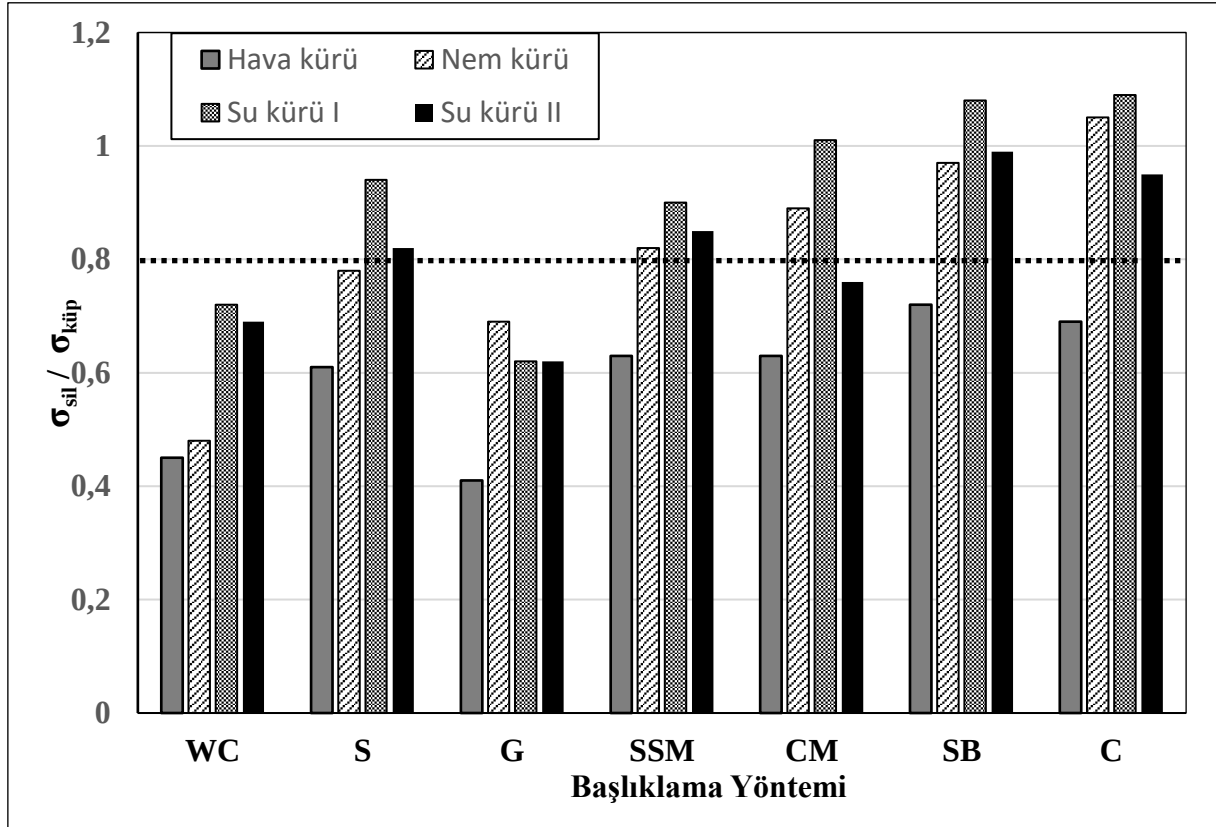
Manuel öğütme yöntemi ile başlıklanan örneklerin, nemli ortamda saklanmış olanlar hariç, dayanımlarının başlıksız örneklerden bile düşük çıkması anlamlıdır. Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi otomatik cihazlar kullanılmadan el ile numunelerin perdah yüzeylerini aşındırmak suretiyle başlıklama yapmak beklenilenin tam tersi bir sonuç doğmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, başta TS EN 12390-3 (Anonim 2019a) olmak üzere, betonların basınç testleri ile ilgili kuralları belirleyen standartlarda bu hususun açık olarak belirtilmesi ve öğütme yöntemi ile başlıklama yapılması durumunda, el ile başlıklamadan kaçınılması gerektiği açık olarak belirtilmelidir.

Diğer taraftan, kum kutusu ve elmas testere ile kesme yöntemlerindeki dayanım artışlarının diğer başlıklama yöntemlerinden biraz daha fazla olduğu görülmektedir. Bu iki yöntemdeki artışlar birbirine yakındır. En yüksek artış oranı ise 2,16 ile elmas testere ile kesilmiş ve nem kürü uygulanmış örnekte görülmüştür.

Başlıksız numunenin basınç dayanımının, yüklemenin yüzeye uniform dağılmamasından dolayı başlıklanan numunelere göre daha düşük çıkacağı başka araştırmacılar (örneğin Medeiros *et al.* 2017) tarafından da belirtilmiştir.

Silindir ve küp örneklerin basınç dayanımları arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi

Bu deneysel çalışmada elde edilen basınç dayanımı sonuçlarından silindir örnekler ile küp örneklerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması da amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 39’da verilmiştir.



Şekil 39. Silindir ve küp örneklerin basınç dayanımları oranının başlıklama yöntemi ve kür ortamına göre değişimi

TS EN 206 +A2 (Anonim 2021c) standardında da belirtildiği gibi küp numunelerin karakteristik dayanımları silindir numunelerden fazladır. Öztekin (2012) $\phi 15 \times 30$ cm ve $\phi 10 \times 20$ cm boyutlarındaki numunelerde dayanım farkının %2 ve ihmal edilebilir düzeyde olduğunu belirtmiştir. Arıoğlu vd. (1999) ise $\phi 15 \times 30$ cm’lik silindir numune dayanımının $15 \times 15 \times 15$ cm’lik küp numune dayanımının normal betonlarda %80’i, yüksek dayanımlı betonlarda ise %90’ı kadar olduğunu bildirmiştir.

Şekil 39’da silindir ve küp numunelerin basınç dayanımları arasındaki orana ilişkin literatürde verilen oran (0.8) kesikli çizgiyle gösterilmiştir. Bu oran referans alınarak yapılan değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

Şekil 39'dan görülebileceği gibi tüm örneklerin silindir/küp dayanım oranları 0,8 olmayıp bu oranının altında da üstünde de kalan epeyce örnek bulunmaktadır. Başlıklama yöntemine göre yapılan değerlendirmede kükürt (S), kükürt + silis kumu (SSM) ve kalsiyum alüminatlı çimento harcı (CM) yöntemleri ile başlıklanan örneklerin silindir/küp dayanım oranları bazı kür yöntemlerinde 0,8'in altındadır. Başlıksız (WC) olanlar ve manuel öğütme (G) yöntemi ile başlıklanan örneklerin ise silindir/küp dayanım oranlarının tamamı 0,8'in altındadır. Öyle ki bu iki başlıklamada 0,4 oranı bile görülmüştür. Buna karşın, kum kutusu (SB) ve elmas testere ile kesme (C) yöntemlerinde 0,8 oranının üstüne çıkmış olup en fazla 1,09 oranı görülmüştür.

Tablo 21'de verilen basınç dayanımı sonuçları ile “Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları ve Değerlendirmeler” başlığı altında yapılan diğer değerlendirmeler yukarıdaki paragrafta yapılan tespitler ile birlikte değerlendirildiğinde basınç dayanımını artırıcı yönde etkisi olan başlıklama yöntemlerinde silindir/küp dayanım oranlarının da arttığı söylenebilir. Nitekim SB ve C yöntemi bu kapsamdaki yöntemlerdir. Buna karşın, basınç dayanımını bakımından en elverişsiz yöntemler olan başlıksız (WC) ve manuel öğütmede ise en düşük silindir/küp dayanım oranları elde edilmiştir. Diğer üç yöntemde ise başlıklanmış örneklerin dayanımları da orta düzeyde artmış, silindir/küp dayanım oranları ise 0,8 civarında çıkmıştır.

Şekil 39, kür ortamları açısından değerlendirilecek olursa bütün karışımlar için su kürü I ortamının en iyi sonucu verdiği söylenebilir. Bu ortamı, su kürü II ve nem kürü ortamları izlemiştir. Bütün karışımlar için nem kürü ortamı ise en düşük silindir/küp dayanım oranlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Yukarıda yapılan değerlendirmelerden de anlaşılabileceği üzere, betonların silindir/küp dayanımı oranları üzerinden hem başlıklama yöntemi hem de kür ortamının etkisi vardır. Ancak, bu çalışmada başlıklama yönteminin etkisinin daha baskın olduğu belirlenmiştir. Bu iki etkiye bağlı olarak silindir/küp dayanımı oranı literatürde normal betonlar için belirtilen oran olan 0,8'in üstüne de çıkabilir altına da inebilir. Bununla birlikte silindir/küp dayanım oranının 1'in üzerinde olduğu 3 başlıklamanın bulunması dikkat çekmektedir. Bu başlıklamalar, en iyi sonucu vermiş olan kum kutusu (SB) ve elmas testere ile kesme (C) yöntemlerinde elde edilmiştir. Bu sonuç beton teknolojisinde “narin örneklerin yanal şekil değiştirmesi daha kolay olduğundan silindir örneklerin basınç dayanımlarının daha düşük olması beklenir. Silindir örneklerin narinliği 2, küp örneklerin ise 1 olduğu göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmada elde edilen sonuçların da aynı kür ortamında saklanmış küp örneklerin silindirlerden daha yüksek dayanım değerlerine sahip olması beklenirdi. Çalışmada elde edilen bu sonuçların küp örneklerin geometrilerinin tamamen düzgün olmaması, az da

olsa geometrik düzensizlikler içermesinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Silindir/küp dayanımı oranının 1'den büyük olmasından farklı bir sonuç daha çıkarılabilir. O da uygun başlıklama yöntemlerinin silindir örneklerin basınç dayanımı üzerindeki olumlu etkisinin küp örneklerin kusurlarının ortaya çıkarabileceği seviyede olmasıdır.

Başlıklama Yöntemlerinin Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi

Farklı başlıklama yöntemleri uygulanarak eksenel basınç dayanımı testine tabi tutulan örneklerin ortalama basınç dayanımı bakımından sıralaması her bir kür ortamı için Tablo 24'te verilmiştir.

Tablo 24. Başlıklama Yöntemi ve Kür Koşuluna Göre Ortalama Basınç Dayanımı Sıralaması

Kür ortamı	Ortalama Dayanımları Sıralaması
Hava Kürü (A)	$R > SB \cong C > SSM \cong CM \cong S > WC \cong G$
Nem Kürü (H)	$C > R \cong SB > CM > SSM \cong S > G > WC$
Su Kürü I (WI)	$C \cong SB > CM \cong R > S \cong SSM > WC > G$
Su Kürü II (WII)	$R \cong SB > C > SSM \cong S > CM > WC > G$

Tablo 24'te görüldüğü gibi hava kürü ve su kürü II numunelerinde tüm başlıklama yöntemleri için referans (küp, R) numunenin dayanımı diğerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Ancak, nem kürü ve su kürü I numunelerinde elmas testere ile kesilip başlık yapılan numunelerin ortalama basınç dayanımları diğer yöntemlerle başlıklılanlardan ve referans numuneden fazla çıkmıştır. Bu sonucun muhtemel nedenine dair değerlendirmelere kırılma biçimlerinin irdelendiği aşağıdaki bölümde değinilmiştir.

En düşük ortalama dayanımın ise, nem kürü hariç, manuel öğütme yönteminde elde edilmiştir. Kuramsal Temeller bölümünde belirtildiği gibi, bu çalışmada elde edilen bulguların tam aksine, birçok araştırmacı en başarılı başlıklama yöntemi olarak öğütmeyi önermektedir. Ancak, başlıklama İşleminde Karşılaşılan Sorunlar başlığı altında açıklandığı gibi, bu çalışmada aşındırma amaçlı üretilen özel (otomatik) cihazlar değil manuel öğütme yöntemi uygulanmıştır. Uygulanan bu yöntemin perdah yüzeyinde yol açtığı yeni düzensizlikler betonların basınç dayanımları üzerinde beklenilmeyen ve ileri düzeyde dayanım kayıplarının oluşmasına yol açmıştır. Öyle ki Tablo 24'ten de görülebileceği üzere, nem kürü hariç, başlıksız numunelerden bile daha düşük basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir.

Diğer taraftan, silindir numuneler arasında kum kutusu (SB) yöntemi ile başlıklılanan örneklerin ortalama basınç dayanımı; hava ve su kürü II koşullarında en yüksek, diğer iki

ortamda ise kesme yöntemiyle başlıklama ile beraber en yüksektir. Bunun nedeninin kum kutusu yönteminde numunenin her iki başının da başlıklanması ve perdah yüzeyi başta olmak üzere numune yüzeylerindeki pürüzlülük ile geometrik düzensizliklerin tolere edilebilmesi nedeniyle yükün yüzeylere üniform yayılmasının sağlanması olduğu değerlendirilmektedir. Kırılma biçimlerinin değerlendirildiği ilerleyen bölümlerde açıklandığı üzere, diğer örnekler arasında SB ile başlıklanan örneklerin en çok tatmin edici kırılma biçimi sergilediklerinin kanıtlanması da bu sonucu desteklemektedir.

Kırılma Biçimlerinin Değerlendirilmesi

Kuramsal Temeller 'de belirtildiği gibi basınç dayanımı deneylerinde küp ve silindir numunelerde görülebilecek tatmin edici ve tatmin edici olmayan kırılma şekilleri TS EN 12390-3'de (Anonim 2019a) belirtilmiştir. Mezkûr standartta geçen kırılma biçimleri bu tezde küp örnekler için Şekil 4 ve Şekil 5'de, silindir örnekler için ise Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu başlık altında yapılan değerlendirmelerde öncelikle bu standartta belirtilen yaklaşımlar esas alınmıştır.

Başlıklama yöntemlerinin kırılma biçimine etkisi

Farklı başlıklama yöntemlerinde gözlemlenen kırılma şekilleri kür yöntemine göre sınıflandırılarak aşağıda verilmiştir.

Hava kürü numuneleri

Şekil 40'ta gösterildiği gibi başlıksız numunelerde perdah yüzeyinin pürüzlü olmasından ve yüklemenin tüm yüzeye üniform bir şekilde yapılamamasından kaynaklı üst bölgede yoğunlaşan çatlaklar oluşmuştur. Başlık kısmından parça koparma şeklinde ve Şekil 7'deki I ve D şekillerine benzer bir kırılma gerçekleşmiştir.



Şekil 40. A-WC-1 (a ve b) ve A-WC-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Manuel öğütme ile başlıklama yapılan numunelerde de başlıklanan yüzeyde yapılan aşındırma işlemi ile istenilen pürüzsüzlük ve düzgünlüğün sağlanamaması nedeniyle

numunenin başlıklanan kısmına yakın bölgede çatlaklar yoğunlaşmıştır (Şekil 41). Burada da başlık kısmından parça koparma şeklinde ve Şekil 7’de I harfi ile gösterilene benzer bir kırılma gerçekleşmiştir.



Şekil 41. A-G-1 (a ve b) ve A-G-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Şekil 42’de gösterildiği gibi elmas testere ile kesme yöntemiyle başlıklama yapılan numunelerde numunenin üst kısmı ile alt kısmı arasında diyagonal çatlak oluşmuştur. Bu kırılma türü, Şekil 7’de K ile gösterilene benzerdir.



Şekil 42. A-C-1 (a ve b) ve A-C-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Kum kutusu ile başlıklama yapılan numunelerde yük, başlıklanmış yüzeye uniform bir şekilde yayılmış ve oluşan çatlaklar genellikle yükleme doğrultusunda meydana gelmiştir (Şekil 43). Bu kırılma biçimi Şekil 6’da gösterilen tatmin edici kırılma türüne benzerdir.



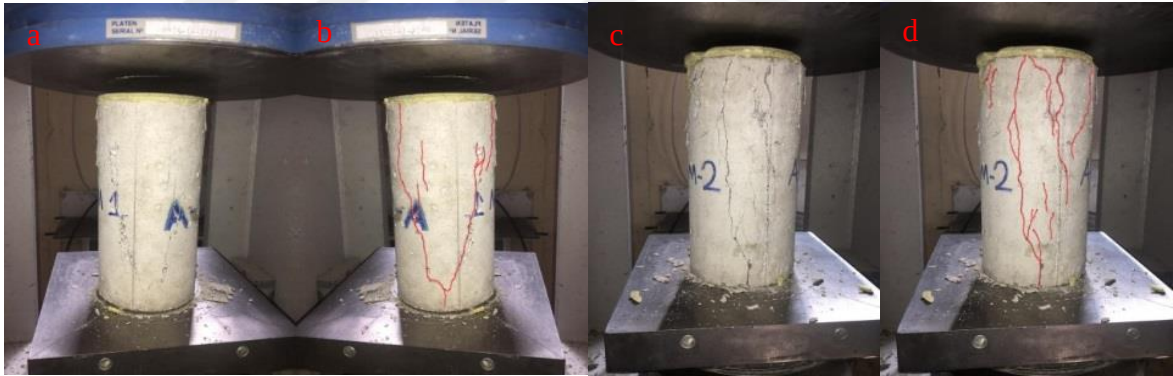
Şekil 43. A-SB-1 (a ve b) ve A-SB-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Şekil 44 a ve b’de gösterildiği gibi kükürt ile başlıklama yapılan numunelerde, A-S-1 numunesinde çatlak oluşumu başlık kısmında yoğunlaşmış hatta bir köşede başlıktan parça kopmuş ve başlıkta bir düzensizliğin olduğu görülmüştür. A-S-2 (c ve d) numunesinde ise Şekil 7’de K ile gösterilene benzer şekilde bir kırılma şekli oluşmuştur.



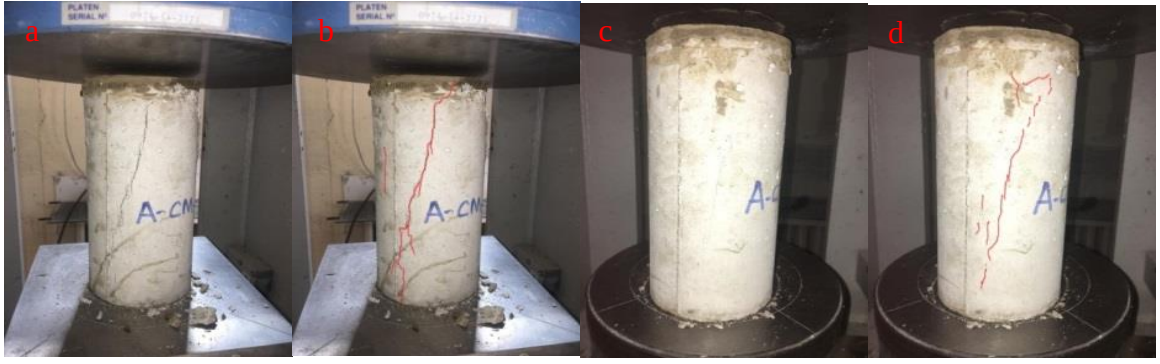
Şekil 44. A-S-1 (a ve b) ve A-S-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Kükürt + silis kumu ile başlıklama yapılan numunelerden A-SSM-1 kodlu olan ilkinde Şekil 7’de K ile gösterilene benzer bir kırılma şekli oluşmuştur (Şekil 45 a ve b). A-SSM-2 ile kodlanan ikincisinde ise genellikle yükleme doğrultusunda çatlak oluşunu gözlemlenmiştir (Şekil 45 c ve d). İkincisi tatmin edici (Şekil 6) türden olan kırılma biçimine girmektedir.



Şekil 45. A-SSM-1 (a ve b) ve A-SSM-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

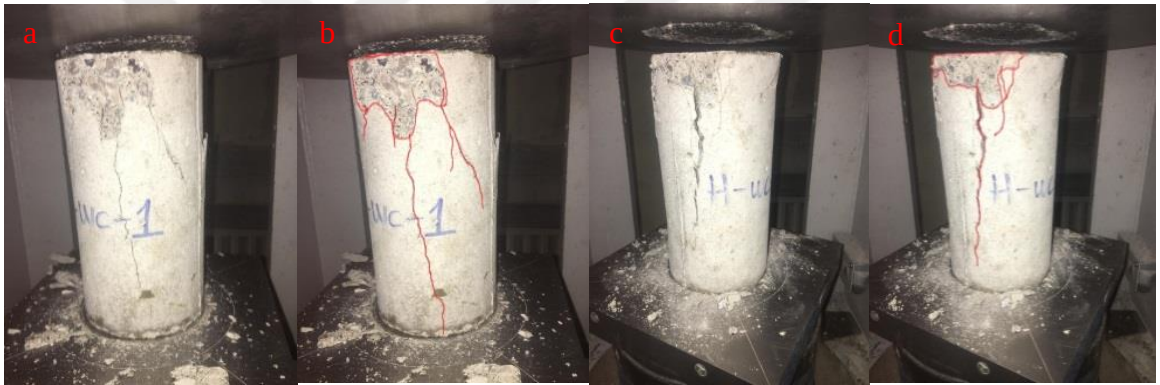
Şekil 46’da gösterildiği gibi kalsiyum alüminatlı çimento ile başlıklama yapılan numunelerde diyagonal şekilde olan çatlaklar gözlemlenmiştir. Bu kırılma biçimi, Şekil 6’da gösterilen tatmin edici kırılma şekline benzerdir.



Şekil 46. A-CM-1 (a ve b) ve A-CM-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Nem kürü numuneleri

Başlıksız numunelerde üst (perdah) yüzeydeki pürüzlülüklerden dolayı düzgün bir yükleme yapılamaması nedeniyle numuneler dikey çatlaklar oluşmasına rağmen üst kısımdan parça kopmaları da gerçekleşmiştir (Şekil 47). Bu kırılma biçimi Şekil 7’de I ve D ile gösterilen kırılma biçimine benzemektedir.



Şekil 47. H-WC-1 (a ve b) ve H-WC-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Şekil 48’de gösterildiği gibi manuel öğütme ile başlıklama yapılan numunelerde başlık kısmındaki düzensizlikler giderilemediği için çatlaklar özellikle başlık kısmında yoğunlaşmış ve numunede dikey çatlaklar görülmüştür. Bu çatlaklar, Şekil 7’de D ile gösterilene benzerdir.



Şekil 48. H-G-1 (a ve b) ve H-G-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Elmas testere ile kesme yöntemiyle başlıklama yapılan numunelerde genel olarak diyagonal oluşan çatlak numuneyi iki parçaya ayırmıştır (Şekil 49). Bu kırılma şekli ise Şekil 7’de belirtilen şekillerden birine tam olarak benzemese de K ile gösterilen kırılma biçimine yakındır.



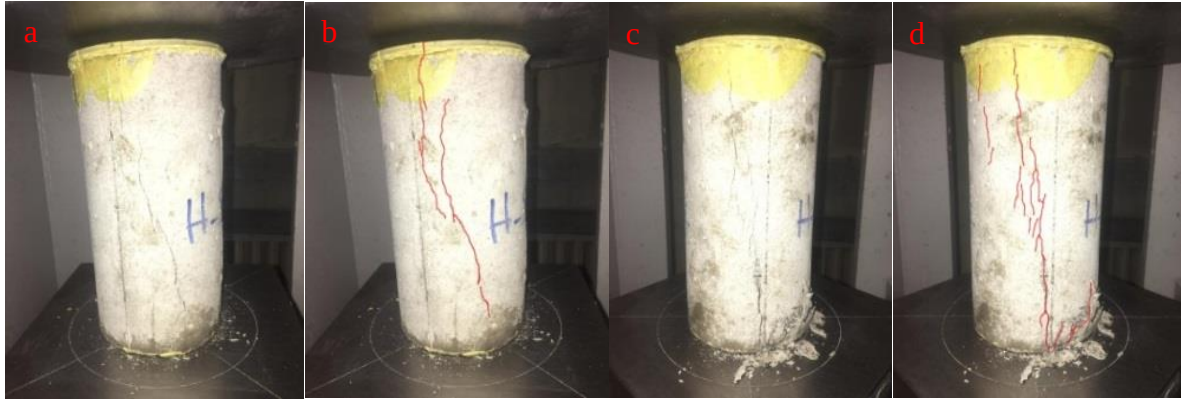
Şekil 49. H-C-1 (a ve b) ve H-C-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Kum kutusu ile başlıklama yapılan numunelerden ilkinde (H-SB-1) numune ortasına doğru diyagonal çatlaklar birleşerek bir mafsal oluşturmaya çalışmıştır (Şekil 50 a ve b). İkincisinde (H-SB-2) ise çatlaklar yükleme doğrultusunda meydana gelmiştir (Şekil 50 c ve d). Her iki kırılma biçimi de Şekil 6’da gösterilen tatmin edici kırılma türleri arasındadır.



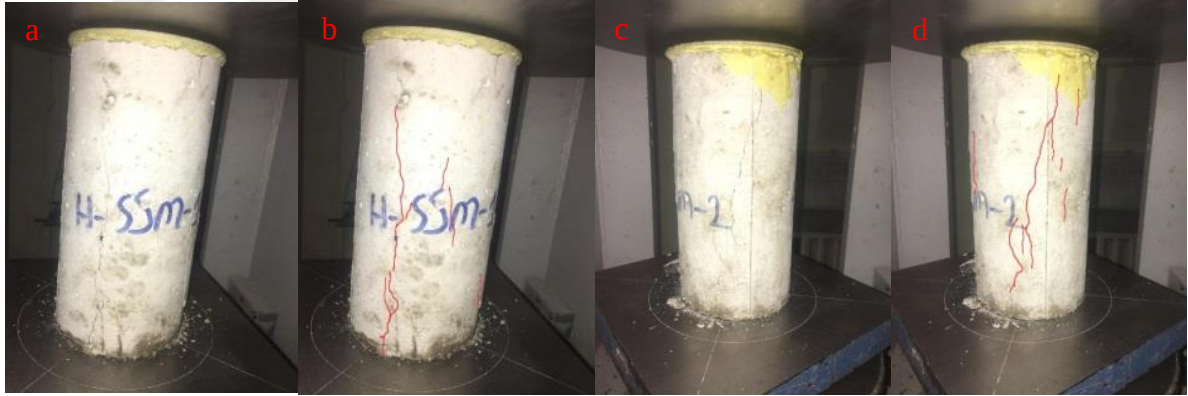
Şekil 50. H-SB-1 (a ve b) ve H-SB-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Kükürt ile başlıklama yapılan numunelerde diyagonal çatlaklar oluşmuş olup (Şekil 51) bu kırılma tipi Şekil 7’de K ile gösterilen şekle benzer görünümündedir.



Şekil 51. H-S-1 (a ve b) ve H-S-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Kükürt + silis kumu ile başlıklama yapılan numunelerin ilkinde (H-SSM-1) daha çok Şekil 6’da tatmin edici kırılma olarak gösterilen yükleme doğrultusunda çatlaklar oluşmuştur (Şekil 52 a ve b). İkinci numunede (H-SSM-2) ise daha çok Şekil 7’de K ile gösterilen diyagonal kırılma şekli görülmüştür (Şekil 52 c ve d).



Şekil 52. H-SSM-1 (a ve b) ve H-SSM-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Şekil 53’te gösterildiği gibi kalsiyum alüminatlı çimento ile başlıklama yapılan numunelerde Şekil 7’de I ile gösterilen şekle benzer bir kırılma oluşmuştur.



Şekil 53. H-CM-1 (a ve b) ve H-CM-2(c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

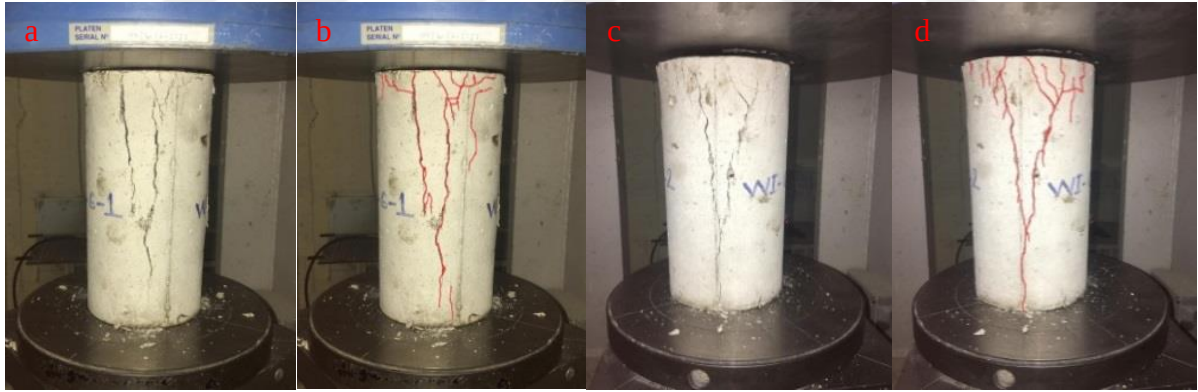
Su kürü I numuneleri

Başlıksız numunelerden WI-WC-1 numunesinde Şekil 7’de A ile gösterilen şekle benzer tatmin edici olmayan bir kırılma şekli oluşmuştur (Şekil 54 a ve b). WI-WC-2 numunesinde ise başlık kısmından kırılmalar görülmüş (Şekil 54 c ve d) ve Şekil 7’de I ve D ile gösterilen şekiller benzer çatlaklar oluşmuştur.



Şekil 54. WI-WC-1 (a ve b) ve WI-WC-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Şekil 55’te gösterildiği gibi manuel öğütme ile başlıklama yapılan numunelerde özellikle çatlak oluşumu başlık kısmında yoğunlaşmış ve Şekil 7’de A ile gösterilen şekille benzer bir kırılma şekli oluşmuştur.



Şekil 55. WI-G-1 (a ve b) ve WI-G-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Elmas testere ile kesme yöntemiyle başlıklama yapılan numunelerde Şekil 7’de I ile gösterilen şekle benzer bir kırılma şekli oluşmuştur (Şekil 56).



Şekil 56. WI-C-1 (a ve b) ve WI-C-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Şekil 57’de gösterildiği gibi kum kutusu ile başlıklama yapılan numunelerden WI-SB-1 kodlu olanda Şekil 7’de I ile gösterilen şekle benzer bir kırılma şekli oluşmuştur (Şekil 57 a ve b). WI-SB-2 numunesinde ise diyagonal çatlaklar numune merkezinde mafsallı oluşturacak şekilde oluşmuş ve Şekil 6’da gösterilen tatmin edici kırılma biçimine benzer kırılma gözlemlenmiştir (Şekil 57 c ve d).



Şekil 57. WI-SB-1 (a ve b) ve WI-SB-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Şekil 58’de gösterildiği gibi kükürt ile başlıklama yapılan numunelerden ilkinde (WI-S-1) genellikle yükleme doğrultusunda çatlaklar oluşmuştur (Şekil 58 a ve b). Bu kırılma şekli Şekil 6’da gösterilen tatmin edici kırılma biçimine benzerdir. WI-S-2 koldu numunede ise Şekil 7’de I ile gösterilen şekle benzer bir kırılma şekli oluşmuştur (Şekil 58 c ve d).



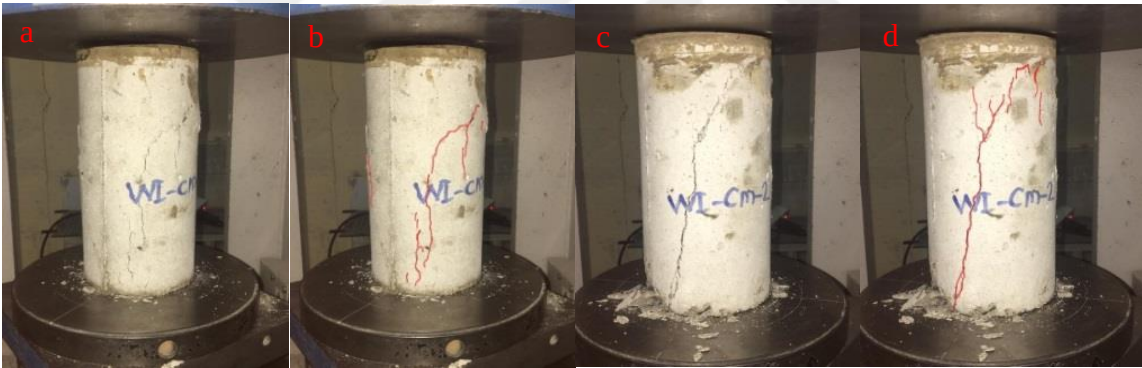
Şekil 58. WI-S-1 (a ve b) ve WI-S-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Kükürt + silis kumu ile başlıklama yapılan numunelerden ilkinde (WI-SSM-1) Şekil 7’de I ile gösterilen ikincisinde (WI-SSM-2) Şekil 7’de A ile gösterilen şekle benzer kırılma biçimi görülmüştür (Şekil 59 a-d).



Şekil 1. WI-SSM-1 (a ve b) ve WI-SSM-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Şekil 60’da gösterildiği gibi kalsiyum alüminatlı çimento ile başlıklama yapılan numunelerden birinde (WI-CM-1) Şekil 7’de I ile gösterilen şekle benzer bir kırılma şekli oluşmuş iken diğerinde (WI-CM-2) Şekil 7’de K ile gösterilen şekle benzer bir kırılma biçimi oluşmuştur (Şekil 60 a-d).



Şekil 60. WI-CM-1 (a ve b) ve WI-CM-2(c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Su kürü II numuneleri

Başlıksız numunelerde üst başlığın yükleme tablası ile temas ettiği yerlerden parça kopmaları görülmüş ve çatlak yoğunluğu üst başlık kısmına yakın yerlerde yoğunlaşmıştır. Ayrıca dikey çatlaklar da gözlemlenmiştir (Şekil 61 a-d). Bu kırılma türü Şekil 7’de D ile gösterilen şekil ile benzerlik arz etmektedir.



Şekil 61. WII-WC-1 (a ve b) ve WII-WC-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Şekil 62’de gösterildiği gibi manuel öğütme ile başlıklama yapılan numunelerden ilkinde (WII-G-1) Şekil 6’da I ile gösterilen şekle benzer bir kırılma şekli oluşmuştur (Şekil 62 a ve b). İkincisinde (WII-G-2) oluşan kırılma biçimi (Şekil 62 c ve d) ise Şekil 7’de D ile gösterilen şekle benzerdir.



Şekil 62. WII-G-1 (a ve b) ve WII-G-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Şekil 63’te gösterildiği gibi elmas testere ile kesme yöntemiyle başlıklama yapılan numunelerde Şekil 7’de I ile gösterilen şekle benzer bir kırılma şekli oluşmuştur.



Şekil 63. WII-C-1 (a ve b) ve WII-C-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Kum kutusu ile başlıklama yapılan numunelerde ise köşelerden gelen diyagonal çatlaklar yaklaşık numune ortasında mafsallı oluşturacak şekilde birleşmiştir (Şekil 64 a-d). Bu kırılma biçimi Şekil 6’da tatmin edici olarak belirtilen kırılma türlerindendir.



Şekil 64. WII-SB-1 (a ve b) ve WII-SB-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Şekil 65’de gösterildiği gibi kükürt ile başlıklama yapılan numunelerde diyagonal çatlaklara benzer çatlaklar görülse de daha çok yükleme doğrultusuna paralel çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Bu da Şekil 6’daki tatmin edici çatlak türüne benzerdir.



Şekil 65. WII-S-1 (a ve b) ve WII-S-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Kükürt + silis kumu ile başlıklama yapılan numunelerden birinde (WII-SSM-1) Şekil 7’de K ile gösterilen şekle benzer (Şekil 66 a ve b), diğesinde (WII-SSM-2) ise hemen hemen yükleme doğrultusuna paralel (Şekil 66 c ve d) çatlaklar oluşmuştur. İkinci numunedeki kırılma biçimi Şekil 6’da verilen tatmin edici kırılma şekline benzerdir.



Şekil 66. WII-SSM-1 (a ve b) ve WII-SSM-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Şekil 67’de gösterildiği gibi kalsiyum alüminatlı çimento ile başlıklama yapılan numunelerde diyagonal şekilde çatlaklar oluşurken Şekil 7’de K ile gösterilen şekle benzer bir kırılma şekli meydana gelmiştir.



Şekil 67. WII-CM-1 (a ve b) ve WII-CM-2 (c ve d) numunelerine ait kırılma şekli.

Kür yöntemlerinin kırılma biçimine etkisi

Küp numuneler

Dört farklı kür ortamında saklanan küp numunelerde basınç dayanımı deneyleri sonucunda gözlemlenen kırılma biçimleri Şekil 68’de gösterilmiştir. Çalışmada küp numuneler ile ilgili takip edilen geleneksel yöntem gözetilerek, örnekler döküm doğrultusuna dik şekilde pres tablaları arasına yerleştirilmiş ve yükün numunenin kalıpla temas eden pürüzsüz yüzeylerine uygulanması sağlanmıştır.

Şekil 68’den görülebileceği gibi, küp numunelerin hepsinin kırılma şekilleri Şekil 4’te gösterilen tatmin edici kırılma biçimleri ile birebir örtüşmemektedir. Tatmin edici kırılma, köşelerden ve numunenin tabla ile temas eden her iki yüzeyinin kenarlarından başlayan çatlakların yaklaşık 45 derecelik açıyla numune merkezine doğru ilerlemesi sonucu oluşan piramit şeklindeki kırılma türüdür. Şekil 68’de gösterilen şekillerden havada kür edilmiş (A) olanlar ile su kürü I ortamında kür edilmiş örneklerden birinde (Şekil 68 j ve k) çatlakların 45 derecelik açıyla oluştuğu gözlenmemiştir. Bu nedenle bu örneklerde görülen kırılma biçimleri tatmin edici sayılabilir. Diğer numunelerde ise 45 derecelik çatlaklarla birlikte tabla ile temas eden yüzeylerden birinde parça kopmasına yol açacak çatlaklar oluşmuştur (örneğin Şekil 68 ı ve i). Bazı örneklerde ise (Şekil 68 l ve m) yükleme doğrultusuna paralel çatlaklar da gelişmiştir. Dolayısı ile nem kürü, su kürü I ve su kürü II ortamlarında saklanan küp örneklerin, her ne kadar Şekil 5’te verilen kırılma biçimleri ile birebir örtüşmese de, tatmin edici olmayan kırılma biçimlerine daha yakın olduğu söylenebilir. Örneklerde tatmin edici kırılmadan olan bu sapmanın, numune geometrisi ilişkili olduğu değerlendirilmiştir. Numune yüzeylerinin bir birine tam paralel olmaması (tüm kenarların tam 90 derece olmaması) gibi geometrik düzensizliklerin bu sonuca yol açtığı düşünülmektedir. Diğer taraftan, bu çalışmada

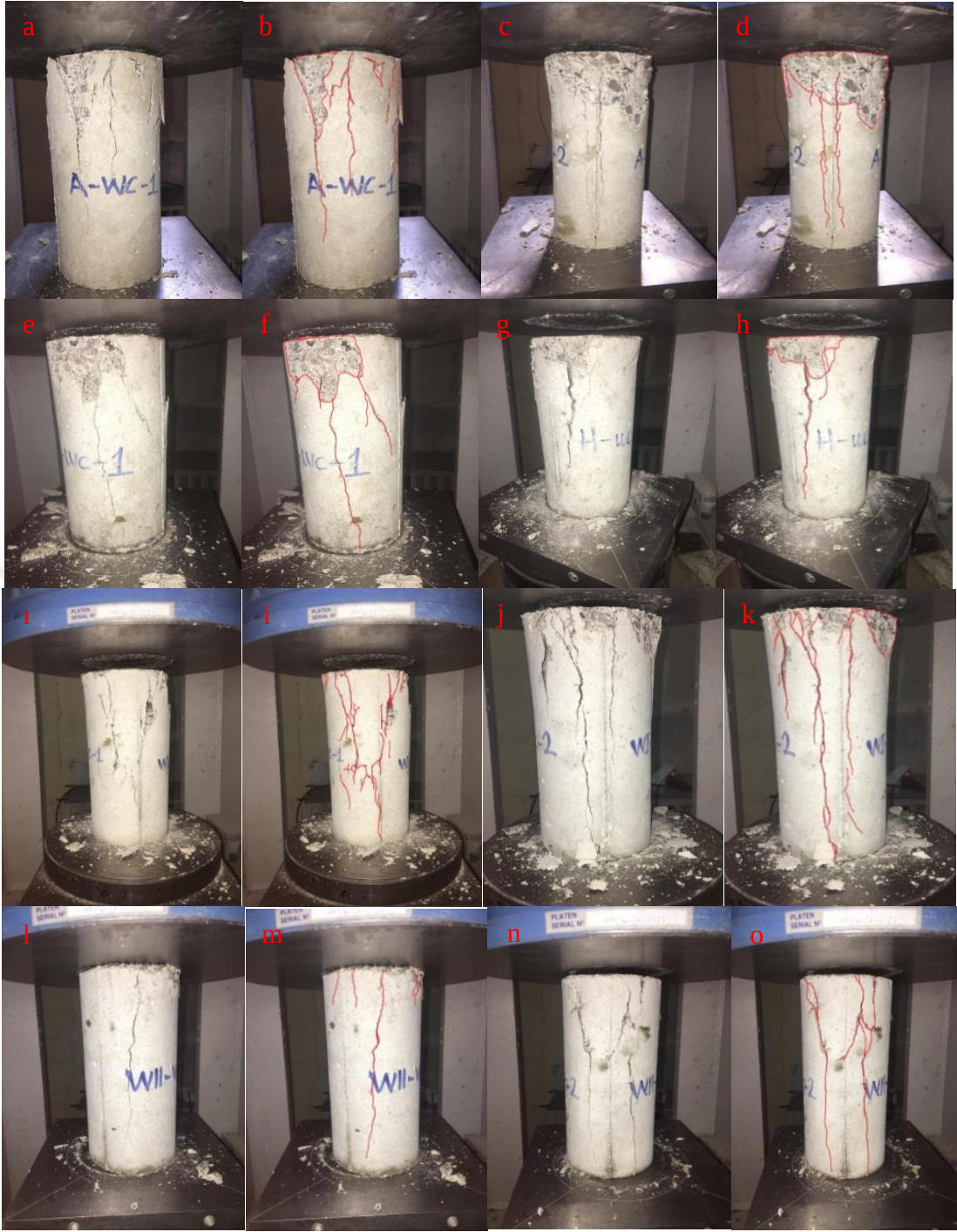
kür ortamının küp numunelerin kırılma biçimleri üzerinde etkisini açık/kesin olarak gösteren bulgulara ulaşılamamıştır.



Şekil 68. A-R-1 (a ve b), A-R-2 (c ve d), H-R-1 (e ve f), H-R-2 (g ve h), WI-R-1 (ı ve i), WI-R-2 (j ve k), WII-R-1 (l ve m) ve WII-R-2 (n ve o) numunelerine ait kırılma şekilleri (Aynı kodlu numunelerden sağdaki, soldakinin çatlaklarının kalemle belirginleştirilmiş halidir).

Başlıksız silindir numuneler

Farklı kür ortamlarda kür edilmiş başlıksız numunelerde görülen kırılma biçimleri Şekil 69’da gösterilmiştir.



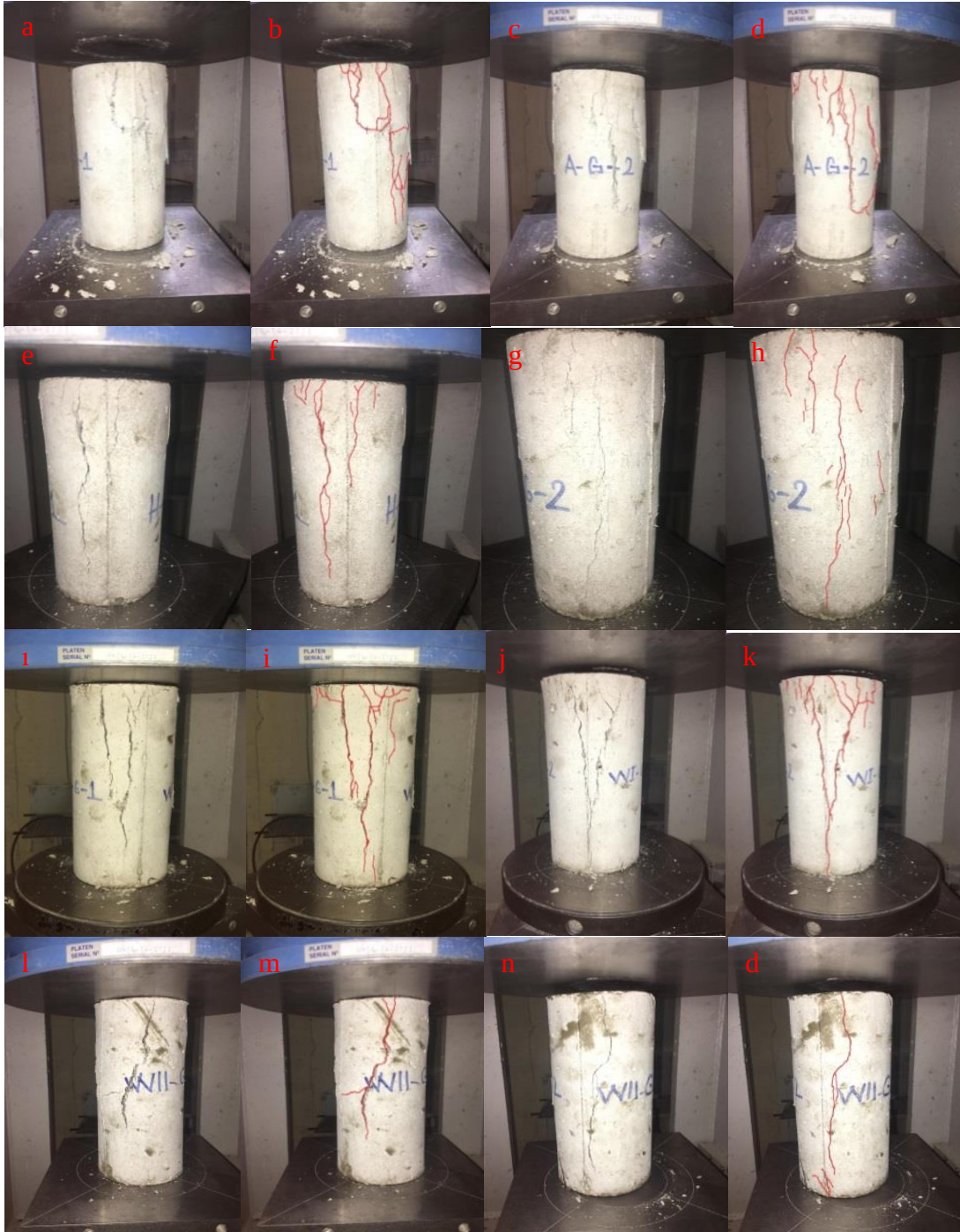
Şekil 69. A-WC-1 (a ve b), A-WC-2 (c ve d), H-WC-1 (e ve f), H-WC-2(g ve h), WI-WC-1 (ı ve i), WI-WC-2 (j ve k), WII-WC-1 (l ve m) ve WII-WC-2 (n ve o) numunelerine ait kırılma şekilleri (Aynı kodlu numunelerden sağdaki, soldakinin çatlaklarının kalemle belirginleştirilmiş halidir).

Şekil 69'dan görülebileceği gibi, su kürü II ortamında saklanmış örneklerde daha az olmak üzere, başlıksız numunelerde genellikle kalıpla temas etmeyen perdah yüzeyinden başlayan bir çatlak oluşumu ve yoğunlaşması gözlemlenmiştir. Bu kısımdan parça kopma şeklinde kırılmaların meydana geldiği ve örneklerde dikey çatlakların olduğu görülmüştür. Başlıksız numunelerde üretim esnasında kalıp ile temas etmeyen yüzeydeki düzensizliklerden dolayı (yüzeyin pürüzlü olması), Şekil 7'de A ile gösterilene benzer şekilde, tatmin edici

olmayan kırılma şekilleri gerçekleşmemiştir. Bu örneklerin kırılma biçimini de tamamen yüzeyin pürüzlü olması belirlemiş olup kırılma biçimi üzerinde farklı kür yöntemlerinin herhangi bir etkisi gözlemlenmemiştir.

Manuel öğütme (taşlama) yöntemi ile başlıklanan numuneler

Manuel öğütme ile başlıklanan numunelerde görülen kırılma biçimleri kür ortamına göre sınıflandırılarak Şekil 70’de verilmiştir.



Şekil 70. A-G-1 (a ve b), A-G-2 (c ve d), H-G-1 (e ve f), H-G-2 (g ve h), WI-G-1 (ı ve i), WI-G-2 (j ve k), WII-G-1 (l ve m) ve WII-G-2 (n ve o) numunelerine ait kırılma şekilleri.

Şekil 70'ten de görülebileceği üzere, havada kür edilmiş (A) örneklerde, başlıksız örneklerle benzer şekilde, çatlaklar manuel öğütmenin uygulandığı yüzeyde yoğunlaşmış, çatlakların bir kısmı numune ortasını biraz geçtikten sonra parça kopmaları gerçekleşmiş ve örnek kırılmıştır. Bu kırılma türü Şekil 7'de I ile gösterilen tatmin edici olmayan kırılma biçimine uymaktadır. Nemli ortamda (H) saklanan örneklerde ise yine aşındırma uygulanan yüzey tarafında çatlak yoğunlaşmaları görülmüş, bazı çatlaklar da yükleme doğrultusuna paralel şekilde ilerleyip numuneyi boydan boya kat etmiştir. Bu kırılma türü ise Şekil 7'de A ve D ile gösterilen tatmin edici olmayan kırılma biçimlerine benzemektedir. Su kürü I (WI) ortamında saklanan örneklerde ise yine çatlaklar öğütülen yüzeyden başlamış numune ortasını biraz geçince birleşerek V şeklini almış, ondan sonra da numunenin alt yüzeyine ulaşmıştır. Bu kırılma biçimi de Şekil 7'de A ile gösterilen tatmin edici olmayan kırılma şekline uymaktadır. Su kürü II (WII) ortamında saklanan örneklerde ise, diğer üç ortamda saklananların aksine, aşındırılan yüzeyde çatlak yoğunlaşması görülmemiş, yükleme doğrultusuna paralel ve yarmada çekme çatlağına benzer şekilde numune boyunca gelişen çatlaklar oluşmuştur. Bu kırılma biçimi ise Şekil 7'de D ile gösterilen tatmin edici olmayan kırılma şekline uymaktadır.

Yukarıdaki paragrafta verilen değerlendirmelerden de anlaşacağı üzere, manuel öğütme yöntemi ile başlıklanıp farklı kür koşullarının uygulandığı numunelerde, birbirine benzeyen çatlak kalıpları görülsede, kür yönteminden kaynaklı farklılıklar da gözlemlenmiştir.

Elmas testere ile kesme yöntemi ile başlıklanan numuneler

Elmas testere ile kesme ile başlıklanan numunelerde gözlenen kırılma biçimleri Şekil 71'de verilmiştir.

Testere ile kesilmek suretiyle başlıklanan örneklerden havada (A) ve nem küründe (H) saklanan örneklerde numune boyunu kat eden çapraz çatlaklar görülmüştür. Bu çatlak türü Şekil 7'de K belirtilen tatmin edici olmayan kırılma biçimine benzemektedir. Su kürü I ve II'de ise üst yüzeyden başlayan numune ortasını geçtikten sonra birleşerek V şeklini almıştır. Bu çatlak türü Şekil 7'de H ile gösterilen ve tatmin edici olmayan kırılma biçimine benzemektedir.

Paragrafta verilen bilgilerden de anlaşılacağı üzere elmas testere ile kesme yöntemi ile başlıklanan numunelerde genellikle çatlak oluşum şekilleri (dolayısıyla kırılma biçimleri) hava ve nem kürü kendi arasında su kürü I ve II ise kendi arasında birbirine benzerlik

göstermiştir. Bununla birlikte hava ve nem kürü arasındaki benzerliğin tam olmadığını da belirtmek gerekir.



Şekil 71. A-C-1 (a ve b), A-C-2 (c ve d), H-C-1 (e ve f), H-C-2 (g ve h), WI-C-1 (ı ve i), WI-C-2 (j ve k), WII-C-1 (l ve m) ve WII-C-2 (n ve o) numunelerine ait kırılma şekilleri.

Kum kutusu yöntemi ile başlıklanan numuneler

Kum kutusu ile başlıklanan numunelerde oluşan çatlak türleri Şekil 72’de verilmiştir.



Şekil 72. A-SB-1 (a ve b), A-SB-2 (c ve d), H-SB-1 (e ve f), H-SB-2 (g ve h), WI-SB-1 (ı ve i), WI-SB-2 (j ve k), WII-SB-1 (l ve m) ve WII-SB-2 (n ve o) numunelerine ait kırılma şekilleri.

Şekil 72’de verilen kırılma şekilleri incelendiğinde su kürü II (WII) ortamında saklanan örneklerin genellikle Şekil 6’da gösterilen tatmin edici kırılma biçimine tam uyduğu söylenebilir. Havada (A) ve nemli ortamda (H) kür edilmiş olanların birer numunelerinde yükleme doğrultusuna paralel (boyuna) ve birer numunelerinde ise diyagonal çatlaklar gelişmiştir. Boyuna çatlaklar Şekil 6’da verilen tatmin edici kırılma biçimine girerken diyagonal çatlaklar Şekil 7’de A ile gösterilen tatmin edici olmayan kırılma şekillen benzemektedir. Su kürü I (WI) ortamında bekletilen örneklerde ise net diyagonal çatlaklar oluşmuş olup Şekil 7’de gösterilen K şekline benzer kırılma biçimine uymaktadır.

Görüldüğü gibi kum kutusu (SB) yöntemi ile başlıklanan örneklerde de kırılma biçimi kür ortamına göre değişmiştir. Her ne kadar havada ve ıslak telis bezi ile oluşturulan nemli ortamda saklanan örneklerde benzer kırılma biçimleri görülse de iki farklı su kürü ortamında bekletilen örneklerin kırılma biçimleri birbirinden farklı çıkmıştır. Bununla birlikte, bu çalışmada TS EN 12390-3’de (Anonim 2019a) ve literatürde eksenel basınç testine tabi tutulan örneklerde görülmesi beklenen tatmin edici kırılma şekline kum kutusu ile başlıklanan örneklerin deney başlangıcından 10 saatten daha kısa bir sürede içinde su kürü havuzundan çıkarılan (su kürü II) örneklerde rastlanıldığını belirtmek gerekir. Deneysel çalışmalar esnasından yapılan gözlemlerde de bu yöntemle başlıklanan örneklerde genellikle diyagonal şekilde oluşan çatlakların numune merkezine yakın yerlerde mafsallı oluşturma eğiliminde oldukları ya da yükleme doğrultusuna paralel çatlaklar oluştuğu tespit edilmiştir.

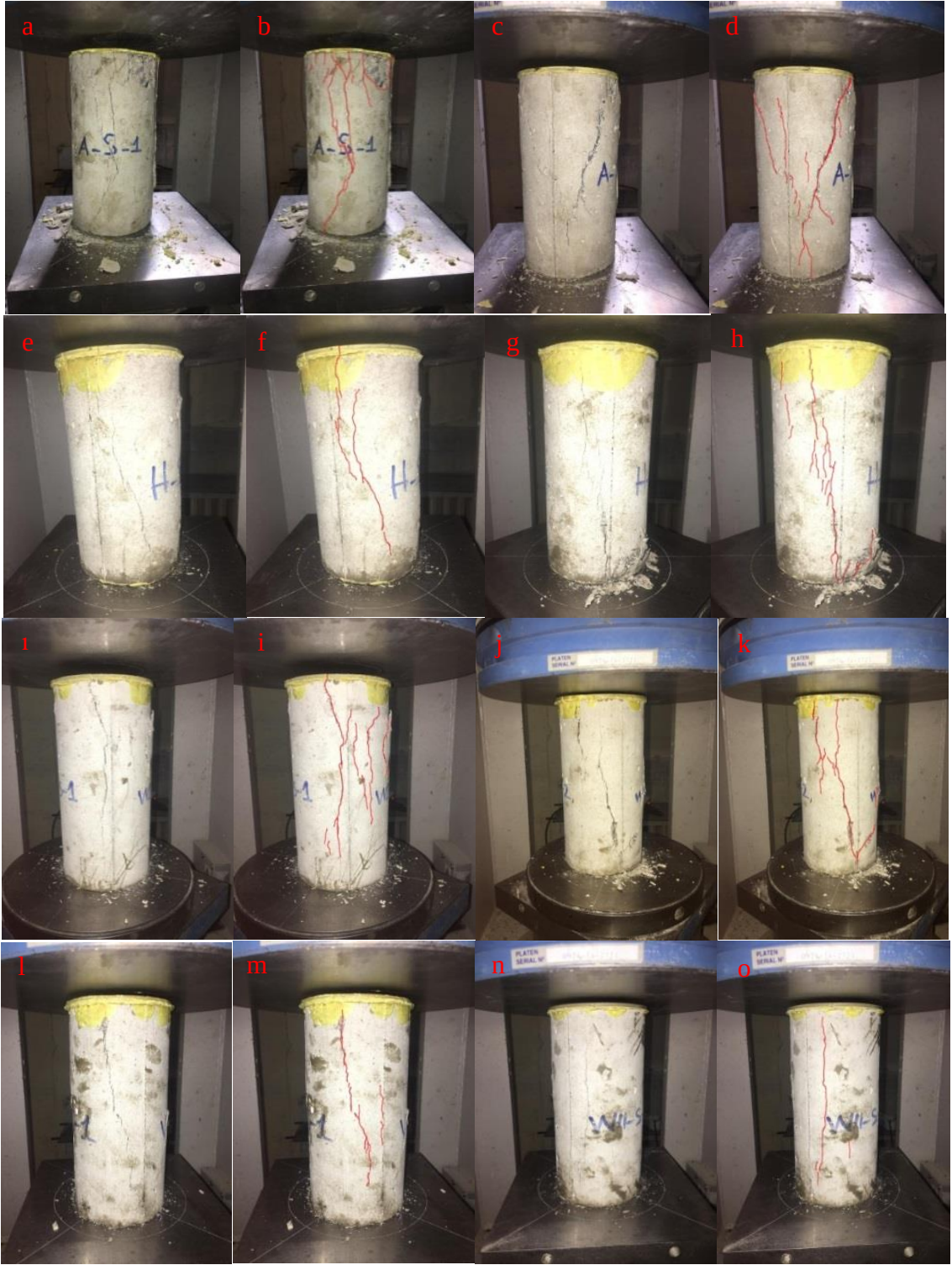
Su kürü I ve II’de farklı türden kırılma şekilleri gözlemlense de hava ve nemli ortamda kür edilen örneklerde aynı tür kırılma biçimi görülmüş olması, kum kutusu yöntemi ile başlıklanan örneklerin kırılma biçimleri üzerinde kür yönteminden kaynaklanan etkilerin olduğu kesin olarak söylenemez.

Kükürt yöntemi ile başlıklanan numuneler

Kükürt ile başlıklanan numunelerde görülen kırılma biçimleri Şekil 73’te verilmiştir.

Şekil 73’te verilen kırılma türleri incelendiğinde havada (A) ve nem küründe (H) saklanan örneklerde diyagonal çatlakların oluştuğu görülmüştür. Bu çatlakların yol açtığı kırılma biçimi, Şekil 7’de K harfi ile gösterilen tatmin edici olmayan şekle benzemektedir. Su kürü I (WI) ve II (WII) ortamlarında kür edilen örneklerin ise birer tanesinde diyagonal çatlaklar birer tanesinde ise boyuna çatlaklar gözlemlenmiştir. Boyuna çatlaklar Şekil 6’da verilen tatmin edici, diyagonal Şekil 7’de yine K ile gösterilen tatmin edici olmayan kırılma biçimine girmektedir.

Görüldüğü gibi kükürtle başlıklanan örneklerde de hava ve nem kürü ile su kürü I ve II ortamları birbirine benzer kırılma biçimlerine yol açmış olup, bu verilerden hareketle farklı kür ortamının numunelerin kırılma biçimleri üzerinde etkisi kesin olarak söylenemez.



Şekil 73. A-S-1 (a ve b), A-S-2 (c ve d), H-S-1 (e ve f), H-S-2 (g ve h), WI-S-1 (ı ve i), WI-S-2 (j ve k), WII-S-1 (l ve m) ve WII-S-2 (n ve o) numunelerine ait kırılma şekilleri.

Kükürt + silis kumu yöntemi ile başlıklanan numuneler

Şekil 74'te kükürt + silis kumu ile başlıklanan numunelerin kırılma biçimleri verilmiştir.

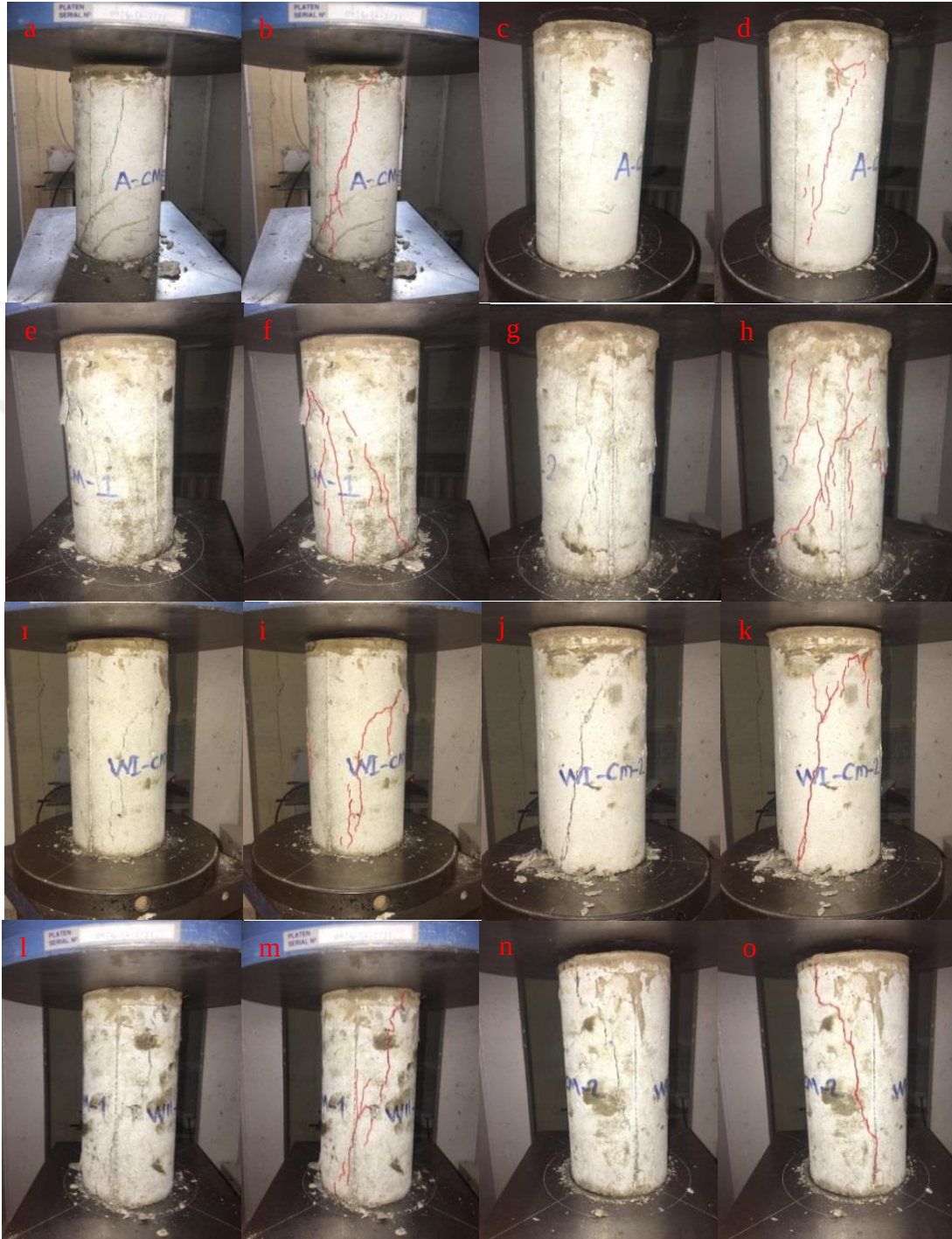


Şekil 74. A-SSM-1 (a ve b), A-SSM-2 (c ve d), H-SSM-1 (e ve f), H-SSM-2 (g ve h), WI-SSM-1 (ı ve i), WI-SSM-2 (j ve k), WII-SSM-1 (l ve m) ve WII-SSM-2 (n ve o) numunelerine ait kırılma şekilleri.

Kükürt + silis kumu ile başlıklanan numunelerin tamamında genellikle diyagonal çatlak türleri gözlenmiştir. Görülen çatlakların neden olduğu kırılma şekilleri, Şekilde 7’de verilen A ve K biçimlerine uymaktadır. Görüldüğü gibi kükürt + silis kumu yöntemi ile başlıklanan numunelerin kırılma biçimleri üzerinde kür ortamının etkisi olmamıştır.

Kalsiyum alüminat çimentosu ile başlıklanan numuneler

Kalsiyum alüminat çimentosu ile başlıklanan numunelerde görülen kırılma biçimleri Şekil 75'te gösterilmiştir.



Şekil 75. A-CM-1 (a ve b), A-CM-2 (c ve d), H-CM-1 (e ve f), H-CM-2 (g ve h), WI-CM-1 (ı ve i), WI-CM-2 (j ve k), WII-CM-1 (l ve m) ve WII-CM-2 (n ve o) numunelerine ait kırılma şekli.

Kür yöntemlerinin kırılma biçimi üzerindeki etkisi ile ilgili değerlendirmelerin özeti

Kür yöntemlerinin farklı yöntemlerle başlıklanan numunelerin kırılma biçimleri üzerindeki etkilerinin değerlendirildiği yukarıdaki paragraflarda verilen bilgilerin ayrı alt başlık altında özetlenmesinde yarar görülmüştür.

Her bir kür ortamına göre numunelerde gözlenen kırılma türleri, bu çalışmada referans alınan başlıca kaynak olan TS EN 12390-3’de (Anonim 2019a) belirtilen ve tezin kuramsal temeller bölümündeki Şekil 6 ve 7’de verilen şematik resimlerden en yakın olanlarla benzeştirilerek Tablo 25’te verilmiştir. Tablodaki harfler Şekil 7’de tatmin edici olmayan kırılma türlerini göstermek için kodları, “T. Edici” ifadesi ise Şekil 6’da verilen tatmin edici kırılma biçimini göstermektedir.

Tablo 25. TS EN 12390-3’e (Anonim 2019a) Göre Numunelerde Görülen Kırılma Şekilleri

KOD	Kür Yöntemi							
	Hava Kürü		Nem Kürü		Su Kürü I		Su Kürü II	
	1. Num.	2. Num.	1. Num.	2. Num.	1. Num.	2. Num.	1. Num.	2. Num.
WC	A	A	A	A	A	A	A	A
G	I	I	A, D	A, D	A	A	D	D
C	K	K	K	K	H	H	H	H
SB	T. Edici	A	A	T. Edici	K	K	T. Edici	T. Edici
S	K	K	K	K	T. Edici	K	K	T. Edici
SSM	A, K	A, K	A, K	A, K	A, K	A, K	A, K	A, K
CM	K	K	K	K	K	K	K	K

Tablo 25’ten görüleceği üzere, kum kutusu (SB) ile başlıklanan örneklerin kırılma biçimleri arasında tatmin edici olanların sayısı en fazladır. Araştırmacı, kum kutusu ile başlıklanan örneklerin basınç dayanımlarının diğer başlıklama yöntemlerine göre daha yüksek çıkmasının; bu başlıklama yönteminin numunenin her iki yüzeyine uygulanması ve perdah yüzeyindeki pürüzleri tolere ederek yükün uniform olarak numune yüzeyine yayılmasını sağlaması ile ilişkili olduğunu ve sonuçta örneklerin kırılmasının beklenildiği gibi (tatmin edici) çıkmasının da bunun bir kantu olduğu düşüncesindedir.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Çalışma kapsamında elde edilen deneysel bulgulardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- 1- Üretilen betonların birim ağırlığı 2280 kg/m^3 , çökmesi ise 6-14 cm aralığındadır.
- 2- Ø10×20 (cm × cm) boyutlarındaki silindir numunelerin başlıklanması için TS EN 12390-3 (2019a)'da belirtilen kükürt + silis kumu, kalsiyum alüminatlı çimento harcı, kum kutusu ve öğütme yöntemlerine ilaveten kükürt ve elmas testere ile kesme yöntemleri de kullanılmıştır. Her bir başlıklama yöntemi için uygulamada karşılaşılan zorluklar tezde rapor edilmiştir. Otomatik cihaz temin edilemediği için öğütme yönteminde mermer, mozaik, beton, granit gibi ürünlerin aşındırılması için üretilmiş olan zımparalar kullanılmıştır. Bu nedenle, öğütme yönteminin adı tezde “manuel öğütme” olarak anılmıştır. Başlıklama malzemesi olarak kullanılan kükürt, kükürt + silis kumu ve kalsiyum alüminatlı çimento harcının basınç dayanımları, sırasıyla ve yaklaşık olarak, 15 MPa, 35 MPa ve 20 MPa olarak belirlenmiştir.
- 3- Elmas testere ile kesme, kükürt ve kükürt + silis kumu yöntemleri ile başlıklama işlemleri 7-8 dakikada tamamlanmıştır. Manuel öğütme 43, kalsiyum alüminatlı çimento harcı 27, kum kutusu ise 52 dakikalık ortalama başlıklama sürelerine sahip olmuştur.
- 4- Havada kür edilen örneklerin UPV değerlerine oranla nemli ortam, su kürü I ve su kürü II ortamlarında kür edilmiş olan betonların UPV değerleri, sırasıyla, %10,2, %12,7 ve %18,8 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. Deneyden 24 saat önce sudan çıkarılan (su kürü I) örneklerin, deneye 10 saatten az süre kala (su kürü II) çıkarılanlardan daha düşük UPV değerlerine sahip olması dikkat çekmiştir.
- 5- Başlık yapmak, silindir örneklerden geçen ultrases hızlarını genelde artırmıştır. En fazla (%100) UPV artışı havada kür edilmiş örneklerin kükürt ile başlıklanması sonucu elde edilmiştir. Kalsiyum alüminatlı çimento harcı (CM) ile kaplanan örneklerde ise nem ve su kürü I ortamında saklananların UPV değerlerinin başlıklandıktan sonra düşmesi ilginç bulunmuştur. Bu bulgu, başlığın numuneye tam yapışmaması ile ilişkilendirilmiştir. Kum kutusu ile yapılan başlıklamada ise UPV değeri okunmamıştır.

- 6- Çalışma kapsamında üretilen silindir numuneler 13,5 MPa - 41 MPa arasında değişen basınç dayanımlarına sahiptir. Başlıklama uygulanan numunelerin basınç dayanımlarındaki değişim, kür ortamına bağlı olarak değişkenlik arz etmiştir. Nitekim başlıklı-başlıksız tüm örneklerin ortalama basınç dayanımları hesaplandığında havada kür edilmiş örneklere göre nem, su kürü I ve II ortamında saklanmış olanların dayanımları, sırasıyla, %23, %60 ve %55 oranında daha fazla çıkmıştır.
- 7- Aynı ortamda kür edilmiş örnekler başlıklandıktan sonra, başlıklama yöntemine bağlı olarak dayanımlarında değişiklikler olmuştur. Dört farklı kür ortamı için de geçerli olmak üzere en yüksek dayanım artış oranları kum kutusu (SB) yönteminden elde edilmiştir. Örneğin, nem küründe, kum kutusu yöntemi ile yapılan başlıklama ile elde edilen dayanım artışı başlıksız örneklerin dayanımının iki katı kadardır (%101).
- 8- Kür ortamları arasında yapılan karşılaştırmada ise tüm başlıklama yöntemleri için geçerli olmak üzere en yüksek dayanım artışları nem küründe elde edilmiştir. Öyle ki 27 gün ıslak telis bezinde saklanan (nem kürü) ve manuel öğütme ile başlıklanan betonların dayanımları bile başlıksız olanlara göre %43 daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuç, başlık türü ne olursa olsun, başlıklama esnasında numunenin belirli bir nem düzeyine sahip olmasının önemini açıkça ortaya koymaktadır. Nemli yüzeyin, başlığın yapışma niteliğinin tam olmasına yol açtığı değerlendirilmiştir.
- 9- İki farklı su kürü uygulanmış örneklerin basınç dayanımlarında çok fazla fark oluşmamıştır. Su kürü I'e göre kür edilen silindirlerin 32,5 MPa, su kürü II'ye kür edilenlerin ise 31,5 MPa'lık ortalama basınç dayanımına sahip oldukları belirlenmiştir. Başlıksız numunelere göre başlıklı olanların dayanım artış oranları bakımından karşılaştırıldığında ise kükürt + silis kumu harcı yönteminde hemen hemen aynı artışı göstermişlerken, öğütme hariç diğer üç yöntemde su kürü I'in su kürü II'ye göre daha fazla artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, su kürü I ortamında kür edilen betonlarda deney esnasında su basıncına neden olan kapiler boşluk ve agregadaki serbest suyun miktarının daha az olması ile ilişkili olabileceği değerlendirilmiştir.
- 10- Havada kür edilmiş örneklerin dayanımına oranla nemli ortam ve su içinde kür edilmiş olan betonların dayanımları artmıştır. Ayrıca, başlıksız olan ve küp numune de dâhil olmak üzere tüm başlıklama yöntemleri için su içinde

bekletilmiş örneklerdeki dayanım artışlarının nemli ortamda saklanmış olanlardan daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

- 11- Yine havada kür edilmiş örneklerin dayanımına oranla su kürü I ile su kürü II ortamlarının silindir örneklerin basınç dayanımlarında artış üzerinde başlıklama tipinin etkisi net olarak belirlenememiştir. Nitekim bazı başlıklama türleri için su kürü I, bazıları için ise su kürü II yönteminin daha yüksek sonuç vermiştir. Kum kutusu yönteminde ise her iki ortam da hemen hemen aynı oranda artış göstermiştir.
- 12- Başlıklı/başlıksız betonların dayanım oranlarına göre yapılan değerlendirmelerde tüm kür ortamları için, manuel öğütme yöntemi hariç, başlıklama işleminin silindir örneklerin dayanımlarını arttırdığı tespit edilmiştir. En yüksek artış ise tüm başlıklama yöntemleri için geçerli olmak üzere nem küründe görülmüştür. Diğer taraftan, kum kutusu ve elmas testere ile kesme yöntemlerindeki dayanım artışlarının diğer başlıklama yöntemlerinden biraz daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu iki yöntemdeki artışlar birbirine yakındır. Çalışma kapsamına en yüksek artış oranı ise 2,16 ile elmas testere ile kesilmiş ve nem kürü uygulanmış örneklerde görülmüştür.
- 13- Manuel öğütme yöntemi ile başlıklanan örneklerin genelde dayanımlarının düşük çıkması önemsenmesi gereken bir sonuçtur. Otomatik cihazlar kullanılmadan zımpara makinaları vasıtası ile numunelerin perdah yüzeylerini aşındırarak başlıklama yapmak, beklenilenin tam tersi sonuç doğmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, başta TS EN 12390-3 (Anonim 2019a) olmak üzere ilgili teknik mevzuata, manuel aşındırma yolu ile silindir örneklerin başlıklanmasının sakıncaları ile ilgili uyarı ifadelerinin konulmasının yararı olacağı düşünülmektedir.
- 14- Betonların silindir/küp dayanımı oranları üzerinde hem başlıklama yöntemi hem de kür ortamının etkisi olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada başlıklama yönteminin etkisinin daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bu iki etkiye bağlı olarak silindir/küp dayanımı oranı literatürde normal betonlar için belirtilen oran olan 0,8'in üstüne de çıkabilir altına da inebilir. Bununla birlikte silindir/küp dayanımı oranının 1'in üzerinde olduğu 3 karışımın bulunması dikkat çekmiştir. Bu karışımlar, en iyi sonucu vermiş olan kum kutusu ve elmas testere ile kesme yöntemlerinde elde edilmiştir.

- 15- Kum kutusu yöntemi ile başlıklanan örneklerin ortalama basınç dayanımı, hemen hemen bütün kür koşullarında, en yüksek çıkmıştır. Kum kutusu yönteminde numunenin her iki başı da başlıklanmaktadır. Ayrıca perdah yüzeyi başta olmak üzere numune yüzeylerindeki pürüzlülük ile geometrik düzensizliklerin tolere edilebilmesi nedeniyle bu yöntemde yükün yüzeylere uniform yayılmasının sağlandığı değerlendirilmektedir. Bu nedenle, silindir örneklerin dayanımını gerçeğe yakın belirlemede en verimli yöntemin kum kutusu olduğu söylenebilir. Ancak, bu sonuç, çerçevesi bu çalışma ile belirlenen kapsamda geçerlidir. Çünkü otomatik cihazla öğütme başta olmak üzere diğer başlıklama yöntemleriyle karşılaştırma yapma imkânı bulunamamıştır. Diğer taraftan, hem işlem zamanının çok kısa olması ve hem de dayanım artışına kum kutusuna benzer düzeydeki katkısı nedeniyle elmas testere ile kesme yönteminin kullanılması da önerilebilir.
- 16- Başlıksız olanlar ve manuel öğütme ile başlık kısmı aşındırılan numunelerdeki çatlak oluşumları, pürüzlülük ve düzensizliklerden dolayı genellikle perdah yüzeyinde ve bu yüzeye yakın bölgelerde yoğunlaşmıştır. Ayrıca küp numunelerin birçoğu da tatmin edici olmayan şekilde kırılmıştır.
- 17- Eksenel basınç deneyi altında örneklerde görülen kırılma biçimleri kür ortamına ve başlıklama yöntemine bağlı olarak değişiklik arz etmiştir. Kükürt + silis kumu, kalsiyum alüminatlı çimento harcı, manuel öğütme ve elmas testere ile kesme yöntemleri ile başlıklanan numunelerin tamamı TS EN 12390-3 (2019a)'da belirtilen tatmin edici olmayan kırılma formlarında kırılmışlardır. Kükürt ile başlıklanmış ve su kürü I ve su kürü II ortamında saklanan ikişer numuneden birer tanesi ise tatmin edici biçimde kırılma göstermişlerdir. Buna karşın, kum kutusu yöntemi ile başlıklanan silindirlerin %50'si tatmin edici şekilde kırılmıştır. Kum kutusu ile başlıklanan örneklerin basınç dayanımlarının diğer başlıklama yöntemlerine göre daha yüksek çıkmasının, örneklerin tatmin edici şekilde kırılması ile de ilişkili olduğu değerlendirilmiştir. Numunelerdeki çatlak oluşumunda kür yönteminden kaynaklı olduğu düşünülen net bağlantılar kurulamamıştır.
- 18- Bundan sonraki araştırmalar için otomatik öğütme cihazı ile manuel aşındırma yöntemlerinin mukayese edildiği çalışmalar yapılması önerilir. Yapılacak çalışmada numune sayısının fazla tutulması (en az 3) ve daha büyük boyutlu örneklerin ($\varnothing 15 \times 30$ cm $\times$ cm gibi) de çalışma kapsamına dahil edilmesi önerilir.
- 19- Çalışmada elde edilen bulgular, araştırma hipotezini doğrulamıştır.

KAYNAKÇA

- Aitcin, P.C., 1998. Modern Concrete Technology 5. High-performance concrete. E&FN SPON, 569, London, New York.
- Ajdkiewicz, A., Radomski, W., 2002. Trends in the Polish research on high-performance concrete. Cement & Concrete Composites, 24, 243-251.
- Akkan, İ., 2018. Beton Basınç Dayanımını Neden 28 Gün Sonra Test Ederiz?. <https://www.sanalsantiye.com/beton-basinc-dayanimini-neden-28-gun-sonra-test-ederiz/> (14.02.2022).
- Alyamaç, K.E. ve İnce, R., 2007. Farklı kür metotlarının betonun kırılma parametreleri üzerine etkisi. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(3), 347-355.
- Anonim, 1978. TS 3068/Mart1978: Laboratuvarda beton deney numunelerinin hazırlanması ve bakımı. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 1981. TS 3502/Mart 1981: Betonda statik elastisite modülü ve poisson oranı tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2000. TS EN 500: Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2003. TS EN 1008: Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2009. TS 706 EN 12620+A1: Beton agregaları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2012a. TS EN 197-1: Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2012b. TS 1248: Betonun Hazırlanması, Dökümü ve Bakımı Kuralları - Anormal Hava Şartlarında. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2012c. TS EN 933-1: Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini-Elleme metodu. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2013a. TS EN 1097-6, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler Bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2013b. TS EN 934-2+A1: Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2016. TS 802: Beton karışımı hesap esasları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2019a. TS EN 12390-3: Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2019b. TS EN 12350-6: Beton-taze beton deneyleri-Bölüm 6: Yoğunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2019c. TS EN 12390-2: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2019d. TS ISO 3310-1: Deney elekleri - Teknik özellikler ve deneyler - Bölüm 1: Metal tel örgülü deney elekleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2019e. TS EN 12350-2: Beton-taze beton deneyleri-Bölüm 2: Çökme (slamp) deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2020. Beton Basınç Dayanımları ve Dayanımları Etkileyen Faktörler. İnsapedia, <https://insapedia.com/beton-basinc-dayanimlari-ve-dayanimlari-etkileyen-faktorler/> (13.11.2021).

- Anonim, 2021a. Factors Affecting Strength of Concrete. <https://theconstructor.org/concrete/factors-affecting-strength-of-concrete/6220/#:~:text=Concrete%20strength%20is%20affected%20by,humidity%20and%20curing%20of%20concrete.> (20.12.2021)
- Anonim, 2021b. Beton Karışım Ve Temas Suyu. Feblab Yapı Malzemeleri, <https://www.feblab.com/pratik-bilgiler/220/beton-karisim-ve-temas-suyu/> (20.12.2021)
- Anonim, 2021c. TS EN 206+A2: Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2021d. Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2022a. Türkçe Bilim Terimleri Sözlüğü. <http://terim.tuba.gov.tr/> (14.02.2022).
- Anonim, 2022b. Alçının tarihi. <http://www.alcider.org.tr/alcinintarihi.html> (14.02.2022).
- Anonim, 2022c. Vikipedi. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Durometre> (15.02.2022).
- Anonim 2022d. Akademik Bilim Terimleri Sözlüğü. <https://terimler.org/> (14.02.2022)
- Anonymous, 1994. Study of compressive strength of concrete cylinders tested with neoprene capping versus hydrostone capping. Michigan Transportation Commission.
- Anonymous, 1996. High performance concrete 1993. U.S. Department Transportation federal Highway Administration, <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/96112/conc93.cfm> (17.11.2021).
- Anonymous, 2014. ASTM C39/C39M-14: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International, West Conshohocken, USA.
- Anonymous, 2015. ASTM C617/617M-15: Standard practice for capping cylindrical concrete specimens. ASTM International, West Conshohocken, USA.
- Anonymous 2017. ASTM C1231/C1231M-00e1: Standard Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Concrete Cylinders. ASTM International, West Conshohocken, USA.
- Anonymous, 2021. Benefits of Gypsum Capping. Indian Cement Review, <https://www.indiancementreview.com/economy-and-market/benefits-of-gypsum-capping> (14.11.2021).
- Ararat, Ö., 2015. Beton basınç dayanımına boyut ve cidar etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arioğlu, E., Arioğlu, N. ve Girgin, C., 1999. Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda numune şekil-boyut etkisi. Hazır Beton Dergisi, Ocak-Şubat, 40-50.
- Aydın, F., Akça, K.R., Sarıbyık, M. ve İpek, M., 2017. Silindir beton ve karot numunelerde yeni bir başlıklama malzemesinin kullanılması. 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Bakü-Azerbaycan.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Aydın, S., 2015. Beton. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No:334, 825s, İzmir.
- Başka, M. A., 2006. Betonun Basınç Dayanımının Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Baylavlı, H. ve Gödek, E., 2019. Başlık malzemesi türünün ve başlık sayısının beton basınç dayanımı ve elastisite modülüne etkisi. Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9(İMSTEC), 47-55.
- Bayqura, S.H., 2018. Numune şekli ve boyutunun lif ve lif içermeyen beton karışımlarının dayanımına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Binici, H., Çağatay, İ.H. and Kaplan, H., 2000. Experiment study on effect of various factors on compressive strength of concrete. Journal of engineering sciences, 6(2-3), 203-209.

- Carino, N.J., Guthrie, W.F. and Legergren, E.s., 1994. Effects of testing variables on the measured compressive strength of high-strength (90MPa) concrete. National Bureau of standards, (NIST research library), NISTIR 5405, ABD.
- Chang, Y., 2007. Grinding Machine. Taiwan Capstone, <https://www.twcapstone.com/en/why-gypsum-capping/#Capping%20Criteria> (15.11.2021).
- Chowdhury, A., Hasan, A.S.M.Z., Alam, M.Z. and Masum, A.A., 2013. Effect of size on compressive strength of concrete cylinder specimens using sand and sulfur cap. Global Journal of Researches in Engineering, 13(27).
- Clason, M., 2021. ASTM C617: Capping Concrete Cylinders With Sulfur Mortar. Owlcation, <https://owlcation.com/humanities/ASTM-C617-Capping-Concrete-Cylinders-With-Sulfur-Mortar> (14.11.2021).
- Çankaya, G., Arslan, M.H. and Ceylan, M., 2013. Determination of concrete compressive strength by using image processing and artificial neural network methods. Selçuk University Journal of Engineering Science and Technology, 1(1), 1-12.
- De Larrard, F., Belloc, A., Renwez, S. and Boulay, C., 1994. Is the cube test suitable for high performance concrete?. Materials on Structures, 27, 580-583.
- Dumitru, I., Song, T., Caprar, V. and Mukhin, V., 2014. Compressive strength of concrete cylinders by sulphur, rubber capping and grinding methods. Boral Construction Materials(NSW/ACT).
- Eggers, J. and Torres, S., 2006. Evaluation of capping systems for high-strength concrete cylinders. Louisiana Transportation Research Center.
- Engin, Y., 2015. Beton Gevrek Bir Malzeme Midir?. Beton ve Çimento, <https://www.betonvecimento.com/beton-2/beton-gevrek-malzeme> (30.12.2021).
- Etsuzo O., Nobuyoshi M., 2000. Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete — the possibility of NDE. Ultrasonics. 38(1-8),546-552.
- Faber, J.H., Coates, N.H. and Spencer, J.D., 1970. Symposium on fly ash utilization, 2d, Pittsburgh.
- Felekoğlu, B. ve Türkel, S., 2004. Yükleme hızının beton basınç dayanımına ve elastisite modülüne etkisi. DEU Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 6(1), 65-75.
- Filiz, M.H., 2006. Beton Karot Dayanımları İle Standart Silindir Dayanımları Arasındaki İlişkinin Kür Koşullarına Bağlı Olarak Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- French, C. and Mokhtarzadeh, A.1993. High strength concrete: Effects of materials, curing and test procedures on short-term compressive strength. PCI Journal, 38(3), 76-87.
- Gawatre, D.W., Kumar, A., Giri, S.D., Jadhav, R.N. and Bonde, B.B., 2017. Effect of capping material on strength of concrete cylinders/cores. IOSR Journal of Mechanical and civil engineering, 14(4), 52-59.
- Ghaffari, A., 2014. Geleneksel betonlarda kohezyon ve içsel sürtünme açısının deneysel olarak belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Gök, G., 2010. Değişik geometrideki betonların basınç dayanımlarının çeşitli su/çimento oranlarına ve çimento miktarına göre incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Güneyli, H., Karahan, S., Güneyli, A. and Yapıcı N., 2017. Water content and temperature effect on ultrasonic pulse velocity of concrete. Russian Journal of Nondestructive Testing. 53, 159–166.
- İstanbuluoğlu, S., 1988. Betonun basınç dayanımını etkileyen faktörler ve ramble betonunun seçimi ile ilgili bir çalışma. Bilimsel Madencilik Dergisi, 27(3), 19-31.

- Kaymak, İ., 2015. Kür Koşulları ve Süresinin Beton Numunelerin Basınç Dayanımına Etkileri. DocPlayer, <https://docplayer.biz.tr/253453-Kur-kosullari-ve-suresinin-beton-numunelerin-basinc-dayanimina-etkileri.html> (13.11.2021).
- Kolcu, K., 2008. Yükleme hızının lifli polimer sargılı betonun eksenel yükler altındaki davranışına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Köseoğlu, A., 2010. Beton Karot Dayanımlarına Agrega Çapının Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Küden, B., 2011. Çimento dozajı ve agrega granülometrisinin betonun çarpma dayanımı üzerindeki etkisinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Lerner, L.R., Ott, M.J., Führ, L.M., Ehrenbring, H.Z., Pacheco, F. and Tutikian, B.F., 2020. Influence of the molding process and different surface regulariztion methodsnon the compressive strength of concrete specimens. *Revista de la Construcción*, 19(1), 159-169.
- Lobo, C.L., Mullings, G.M. and Gaynor, R.D., 1994. Effect of capping materials and procedues on the measured compressive strength of high-strength concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, 16(2), 173-180.
- Malhotra, V. M., 1976. Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods. ACI Monograph No. 9, ACI. Iowa Sate University Press. Ames. Iowa.
- Medeiros, R., Pereira, B.A., Sipp,G. and Delfino, T., 2017. Inverstigation of the influence of different surface regularization methods for cylindrical concrete specimens in axial compression tests. *IBRACON Structures and materials Journal*, 10(30), 568-591.
- Noguchi, T., 1997. Various testing conditions affecting measured compressive strength of concrete. *Concrete Journal*, 35(9), 12-18.
- Öztekin, E., Eker, Ç. ve Derin, E., 2012. Betonun basınç dayanımının ölçülmesinde 150/300 veya 100/200 mm silindir numune kullanımı. *Hazır Beton Dergisi*, Mart-Nisan, 75-78.
- Özyıldırım, H.Ç., 1982. Use of neoprene pads in testing concrete cylinders. *Virvinia Highway and Transportation Rescarch council*, Charlottesville, Virginia.
- Park, Y.S. and Suh, J.K., 2008. Comparative study on compressive strength of concrete with new sand-cap and neoprene pad. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2(1), 15-19.
- Park, Y.S., Suh, J.K., Shin, Y.S. and Lee, J.H., 1998. Effect of sand-cap in compressive strength of high strength concrete cylinders. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 18(1-5), 673.
- Saucier, K.L., 1972 .Effect of method of preparation of ends of concrete cylinders for testing. U.S.Army Engineer Waterways Experiment Station, Viksburg, Mississipi.
- Sert, H., 2011. Betonun karot dayanımları ile standart silindir dayanımları arasındaki ilişkinin karot çapına bağlı olarak belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Sönmezoğlu, C., 2000. Hafif Betonun Mekanik Özellikleri Üzerine Kür Şartlarının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Suryakanta, 2015. How to Cap concrete cylinders? (4 methods of capping). civilblog.org, <https://civilblog.org/2015/02/25/how-to-cap-concrete-cylinders-4-methods-of-capping/> (15.11.2021)
- Şanal, I. ve Sarıalioğlu, D., 2007. Beton basınç dayanımında küçük ebatlı küp beton numunelerin yaygın kullanımı için şekil-boyut etkisinin detaylı incelenmesi. THBB Beton Kongresi.
- Talaat, A., Emad, A., Tarek, A., Masbouba, M., Essam, A., and Kohail, M., 2021. Factors affecting the results of concrete compression testing: A review. *Ain Shams Engineering Journal*, 12 (1), 205-221.

- Toprak, M., 2021. Beton Basınç Dayanımı: Silindir ve Küp Numune Farkları Nelerdir?. Sanal  antiye, <https://www.sanalsantiye.com/beton-basinc-dayanimi/> (30.12.2021).
- Türkel, A., 2006. Betonun basınç dayanımına numune boyutunun etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uysal, M., Mercan, N., ve Yılmaz, K., 2011. Farklı Dozlarda  retilen Beyaz Betonların Basınç Dayanımına Farklı Kür  artlarının Etkisi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 15,139-145.
- Vandegrift, D. and Schindler, J.A.K., 2005. The effect of test cylinder size on the compressive strength of sülfür capped concrete specimens. Auburn Universty.
- Zia, P., Ahmad, S. and Leming, M., 1989-1994. High-Performance Concretes.U.S.Deportment of Transportation Federal Highway Administration, <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/97030/index.cfm> (13.11.2021).



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı: Hamza ÇİNAR

Eğitim

Lisans: Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği (2017)

Yüksek lisans: Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Malzemeleri Bilim Dalı (2022)

Atatürk Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Bilim Dalı (2022)