

**DIJİTAL ÜRETİMLİ ÇİMENTO ESASLI  
KOMPOZİTLERİN DONMA-ÇÖZÜLMESİ  
DİRENCİ VE BOŞLUK  
YAPILARININ İNCELENMESİ**

**Yeşim TARHAN**

**Danışman: Prof. Dr. Remzi ŞAHİN  
Doktora Tezi  
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı  
2020**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**DİJİTAL ÜRETİMLİ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN DONMA-ÇÖZÜLME  
DİRENCİ VE BOŞLUK YAPILARININ İNCELENMESİ**

(Investigation of Freeze-Thaw Resistance and Pore Structure of Digitally Fabricated Cement-  
Based Composites)

DOKTORA TEZİ

Yeşim TARHAN

Danışman: Prof. Dr. Remzi ŞAHİN

Erzurum  
Ekim, 2020

## KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Prof. Dr. Remzi ŞAHİN danışmanlığında, Yeşim TARHAN tarafından hazırlanan bu çalışma, 05/10/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir..

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Hakan Nuri ATAHAN <i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>	.....
Danışman:	Prof. Dr. Remzi ŞAHİN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	.....
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN <i>Hacettepe. Üniversitesi</i>	.....
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Hikmet ALTUN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	.....
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. A. Ferhat BİNGÖL <i>Atatürk Üniversitesi</i>	.....

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

**Unvan Ad SOYAD**

**Enstitü Müdürü**

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.  
Proje No: **FHD-2019-7411**

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak *Prof. Dr. Remzi ŞAHİN* danışmanlığında sunulan “Dijital Üretimli Çimento Esaslı Kompozitlerin Donma-Çözülme Direnci Ve Boşluk Yapılarının İncelenmesi” 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	5	30
Kuramsal Temeller	11	30
Materyal ve Yöntem	16	35
Bulgular	4	20
Tartışma	0	20
Tezin Geneli	13	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
Yeşim TARHAN	Prof. Dr. Remzi ŞAHİN
5.10.2020	5.10.2020
İmza:	İmza:

\* 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

Lisansüstü çalışmalarına başladığım ilk günden beri akademik bilgisinden ve engin tecrübelerinden her daim istifade ettiğim, bugünlere gelebilmemde büyük emek ve sabır sarfeden, bana olan desteğini ve inancını her zaman derinden hissettiren çok kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Remzi ŞAHİN 'e can-ı gönülden teşekkür ederim.

Bu çalışmanın malzeme temini ve ön deneyleri Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından desteklenen “3D Beton Üretimi için Optimum Karışım Oranlarının Belirlenmesi” isimli Hızlı Destek Projesi (FHD-2019-7411) kapsamında yapılmıştır. Bu nedenle Atatürk Üniversitesi Rektörlüğü ve Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine çok teşekkür ederim.

Çalışmada deneylere esas olan 3D betonların üretimi İstanbul Büyükşehir Belediyesi iştiraklerinden İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları San. Ve Tic. A.Ş. (İSTON) 'da gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda İstanbul Büyükşehir Belediyesine, İSTON Hadımköy Fabrikası Yöneticilerine ve başta Dr. Fatih ÖZALP, Halit YILMAZ ve Serhat ZEYTUN olmak üzere İSTON bünyesinde çalışan teknik ekibe sonsuz teşekkür ederim.

Tez kapsamında mikroyapısal analiz çalışmaları Atatürk Üniversitesi Merkez Laboratuvarı olarak hizmet veren Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı (MERLAB) 'nda yapılmıştır. DAYTAM ve MERLAB teknik çalışanlarına teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince deneysel çalışmalarımda yardımları ve önerileri ile tezimin gelişmesine katkıda bulunan değerli vakitlerini benden esirgemeyen kıymetli arkadaşlarım Muhammet ŞAHİN, Burak GEDİK, Arş. Gör. H. Alperen BULUT ve Teknisyen İlhami AYHAN 'a teşekkürü bir borç bilirim.

Öğrenim hayatım boyunca gösterdiği sabır ve destekle bugünlere gelmemi sağlayan, varlığına her daim şükrettiğim canım annem Medine TOSUN 'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamın bütün aşamalarında çok büyük katkısı ve emeği olan, benim için sonsuz bir özveriyle çalışarak maddi ve manevi desteğini esirgemeyen sayın hocam ve sevgili eşim Arş. Gör. İsmail Hakkı TARHAN 'a sabrı, sevgisi ve emekleri için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu çalışma küçücük yaşına rağmen laboratuvar çalışmalarına katkıda bulunmak için çaba sarf eden oğlum Emir Arslanalp'a ithaf edilmiştir.

Yeşim TARHAN

## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

## DİJİTAL ÜRETİMLİ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN DONMA-ÇÖZÜLME DİRENCİ VE BOŞLUK YAPILARININ İNCELENMESİ

Yeşim TARHAN

Danışman: Prof. Dr. Remzi ŞAHİN

**Amaç:** Geleneksel betona nispetle sahip olduğu üstün özellikleri nedeniyle 3 boyutlu eklemeli imalat betonuna (3D beton) olan ilgi dünya genelinde hızla artmaktadır. Bu çalışmada 3D betonların fiziko-mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

**Yöntem:** Hava sürükleyici katkı maddesi (AEA) oranı, kür uygulaması ve karot doğrultusu parametre olarak seçilmiş ve bu faktörlerin, başta donma-çözülme (D-Ç) direnci ve boşluk yapısı olmak üzere, 3D betonların bir takım mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. D-Ç deneylerinde ASTM C 666/Prosedür B uygulanmıştır. Boşluk yapısı incelemeleri BET, MIP ve SEM analizlerine dayanılarak yapılmıştır. Çalışmada klasik taze ve sertleşmiş beton deneylerinin yanında 3D beton özelliklerini belirleyen ekstrüzyon kabiliyeti, inşa edilebilirlik, işlenebilirlik ve baskı alınabilme süresi deneyleri yapılmıştır. %0, %0,1, %0,15 ve %0,2'si oranlarında AEA kullanılarak üretilen kürlü ve kürsüz 600×600×150 mm'lik 3D beton plaklardan 28. gün sonunda yatay ve dikey doğrultularda karot numuneleri alınarak deneyler yapılmıştır.

**Bulgular:** Üretim aşamasında alınan küp örneklerin basınç dayanımı 11,8 MPa - 54,5 MPa arasında değişmiştir. Aynı karışımların karot dayanımları ise %6-%50 arasında değişen oranlarda bu değerlerden daha düşük çıkmıştır. Üretilen numunelerin büyük bir bölümü 70. çevrimden sonra tabakalar arası birleşim yerlerinden ayrılırlarak hasara uğramış ancak sınırlı sayıdaki örnek 300. çevrime kadar dayanabilmiştir.

**Sonuç:** D-Ç etkisine dirençli ve yeterli basınç dayanımına sahip 3D betonlar üretilmesi için düşük dozda (%0,1) AEA maddesinin kullanılması tavsiye edilmiştir. 3D beton elemanlar katman katman biriktirme yöntemiyle üretildiklerinden bitişik iki katman arasında kusurlu hatlar (soğuk derz) oluşmuştur. Bu kusurlu yapı 3D betonların belirgin anizotropik malzeme özelliği sergilemesine yol açtığından incelenen bütün özellikler yöne bağlı olarak değişmiştir. 3D betonlar için özel kimyasal katkı malzemelerinin üretilmesi ve geleneksel yöntemlere alternatif deney yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** 3 boyutlu eklemeli imalat betonu, 3D beton, donma-çözülme, karot, hava sürükleyici katkı, boşluk-boyut dağılımı

Ekim 2020, 213 sayfa

## ABSTRACT

### DOCTORAL DISSERTATION

#### INVESTIGATION OF FREEZE-THAW RESISTANCE AND PORE STRUCTURE OF DIGITALLY FABRICATED CEMENT-BASED COMPOSITES

Yeşim TARHAN

Danışman: Prof. Dr. Remzi ŞAHİN

**Purpose:** The interest in three-dimensional additive manufacturing concrete (3D concrete) is growing significantly across the worldwide due to its superior properties that providing advantages over conventional concrete. In this study, it is aimed to investigate the physico-mechanical properties of real-scale 3D concrete produced by a 3D printer.

**Method:** In the study, air-entraining additive (AEA) rate, applying of cure compound and core direction were selected as parameters and the effects of those parameters on engineering properties of 3D concrete, such as freeze-thaw (F-T) resistance and pore structure were investigated. ASTM C 666 / Procedure B method was applied in freeze-thaw experiments. The pore structure investigations were based on BET, MIP, and SEM analysis. In the study, in addition to standard fresh and hardened concrete tests, extrudability, buildability, workability and open time tests, which determining the properties of 3D concrete, were also performed. Samples with 4 different compositions which having 600×600×150 mm sizes were produced by using AEA of 0%, 0,1%, 0,15% and 0,2% of the binder amount. Experiments were conducted on core samples which taken from those samples in the horizontal and vertical directions at the end of the 28th day.

**Findings:** The compressive strength of the cube samples taken in the fresh concrete stage varied between 11,8 MPa- 54,5 MPa. The core strengths of the same mixtures were lower than these values at ratios varying between 6-50%. Most of the samples produced were damaged by separating from the joints between the layers after the 70th cycle, but a limited number of samples were able to durable until the 300th cycle.

**Results:** It is recommended to use low doses of AEA material to produce 3D concretes that are resistant to F-T effect and have sufficient compressive strength. Since 3D concrete elements are produced with layer by layer deposition method, defective lines (cold joint) have formed between two adjoint layers. This imperfect structure caused 3D printed concretes to exhibit distinctively anisotropic material properties. Therefore, all the engineering properties studied changed depending on the direction. In addition, it was concluded that special chemical additives for 3D concretes should be produced and experimental methods alternative to traditional methods should be developed.

**Keywords:** 3D additive manufacturing concrete, 3D concrete, freeze-thaw, core, air-entraining additive, pore-size distribution

October 2020, 213 pages

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	xv
GİRİŞ.....	1
Betonun Dijital Fabrikasyonu.....	1
Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing (AM)).....	3
Dünyadan 3D beton uygulama örnekleri.....	10
3D baskı betonu kullanımının getireceği zorluklar ve fırsatlar .....	18
Çalışmanın Hipotezi .....	22
Tezin Amaçları .....	22
KURAMSAL TEMELLER.....	25
3D Baskı için Beton Gereksinimleri.....	25
Ekstrüde edilebilirlik (Extrudability) .....	25
İnşa edilebilirlik (Buildability).....	26
İşlenebilirlik (Workability).....	28
Baskı alınabilirlik süresi (open time) .....	30
3D beton için literatür araştırması .....	31
Betonun Donma-Çözülme Mekanizması ve Hasarı .....	35
Donma-çözülmenin zararlı etkileri.....	36
Donma-çözülme teoremleri .....	37
Donma-çözülme etkisinin matematiksel modellenmesi .....	41
Donma-çözülme probleminin değerlendirilmesi .....	50
Donma-Çözülme Direncine Etki Eden Faktörler .....	52
Beton donma çözülmesi ile ilgili literatür araştırması.....	60
MATERYAL VE METOT.....	64
Kullanılan Malzemeler .....	64
Çimento .....	64
Agrega .....	65
Mineral katkı .....	65
Kaolin kili.....	65



Mikrofiber.....	66
Kimyasal katkıları.....	66
Parametreler, Sabitler, Numune Sayısı ve Kodlama .....	69
Seçilen parametreler .....	69
Sabit tutulan kriterler .....	70
Kodlama .....	72
Karışım Hesabı, Beton Üretimi ve Taze Beton Deneyleri .....	72
Ekstrüde edilebilirlik (extrudability) ve inşa edilebilirlik (buildability) testi .....	73
3D taze betonların reolojik özelliklerinin belirlenmesi .....	75
Yayıma tablası deneyi .....	76
3D betonların taze birim hacim ağırlıkları .....	77
Taze betonun hava içeriği deneyi .....	77
Baskı alınabilirlik (çalışılabilirlik) süresi (open time) deneyi .....	77
Basınç dayanımı .....	78
3D Beton Numunelerin Üretimi ve Sertleşmiş Beton Deneyleri .....	78
Karot alımı .....	80
Karot örneklerin basınç dayanımının belirlenmesi.....	83
Ultras ses geçiş hızının (UPV) tayini deneyi .....	84
Kılcal su emme deneyi .....	85
Donma-çözülme deneyi.....	86
Mikroyapısal Analizler .....	89
Cıvalı porozimetre (MIP) deneyi.....	89
BET yüzey alanı deneyi ile mikrogözenek boyutu belirleme .....	90
X-ışını kırınımı (XRD) analizi .....	90
Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleme .....	91
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	92
Taze Beton Deneyleri Sonuçları ve Değerlendirilmesi .....	92
Birim hacim ağırlık sonuçlarının değerlendirilmesi.....	92
Hava içeriği oranının değerlendirilmesi .....	93
Yayıma tablası deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi .....	95
Prize başlama sürelerinin değerlendirilmesi.....	96
3D betonların basınç dayanım sonuçlarının değerlendirilmesi .....	97
3D betonların reolojik özelliklerinin değerlendirilmesi .....	99
Sertleşmiş Beton Deneyleri Sonuçları ve Değerlendirmesi .....	103
Kılcal su emme ve birim hacim ağırlık deneyi sonuçları .....	105
Ultras ses geçiş hızı (UPV) sonuçlarının değerlendirilmesi .....	107

Basınç deneyi sonuçları ve değerlendirmesi .....	111
Donma – çözülme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi .....	115
Mikroyapısal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	134
BET yüzey alanı deneyi ile mikrogözenek boyutu belirleme analizi sonuçları .....	134
Civalı porozimetre (MIP) deneyi sonuçları .....	146
X-ışını kırınımı (XRD) analizi sonuçları .....	152
Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleme sonuçları .....	155
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	162
KAYNAKLAR .....	166
EKLER .....	179
EK-1. 3D Beton Karışımı Oluşturma Ön Çalışmaları .....	179
EK-2. BET Analizi Sonuçları .....	189
ÖZGEÇMİŞ .....	197

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b>Şekil 1.</b> Geleneksel ve 3D baskı ile inşaat üretim sürecinin karşılaştırılması.....	2
<b>Şekil 2.</b> AM yönteminde bilgisayardaki tasarımdan objenin oluşumuna kadar geçirilen evreler .....	4
<b>Şekil 3.</b> CC nozul ucu, bir CC cihazı konfigürasyonu ve çimentolu malzemelerle yapılan baskı işlemi .....	5
<b>Şekil 4.</b> D-shape işlem fazları: dijital model, 3D baskılama, temizleme ve cilalama .....	7
<b>Şekil 5.</b> D-Shape Yazıcı Sistemi .....	7
<b>Şekil 6.</b> CP yönteminin şematik gösterimi. ....	8
<b>Şekil 7.</b> CP yöntemiyle üretilen elemanlar (a: Wonder Bench (2×0.9×0,8 m), b: Akustik sönümleyici duvar elemanı (65× 65× 30 cm), c: Çift kıvrımlı 4 parçalı sandviç panel baskısı). ....	9
<b>Şekil 8.</b> Uygulamalar arasındaki benzerlikler ve farklılıklar. ....	10
<b>Şekil 9.</b> Winsun şirketi tarafından üretilen 3D elemanlar, duvar örneği ve çok katlı 3D yapılar .....	11
<b>Şekil 10.</b> CyBe firmasına ait mobil 3D Printer cihazı ve firma tarafından yapılan 3D Dubai Ar-Ge Laboratuvarı .....	11
<b>Şekil 11.</b> TU Eindhoven üniversitesi 3D beton yazıcı cihazı ve dünyanın ilk ticari 3D beton baskı ev projesi .....	12
<b>Şekil 12.</b> Apis Cor şirketi tarafından Rusyada üretilen 3D beton baskı ev .....	13
<b>Şekil 13.</b> TotalKustom tarafından yapılan 3D baskılı oyun şatosu .....	13
<b>Şekil 14.</b> MIT’ de genişletilebilir köpük kullanılarak üretilen çerçevesiz 3D baskı modeli....	14
<b>Şekil 15.</b> Emerging Objects tarafından üretilen Bloom (a), Cabin of 3D Printed Curiosities (3D baskı kabin) (b), (b) resmindeki kabinin bitki tutucu seramik kısımlarını gösteren detayı (c), Shed (kulube)(d), (d) resmindeki kulubenin cephe ve çatıda yeşil bir duvar oluşturmak için bitki örtüsünün büyümesine uyum sağlayacak şekilde uyarlanması gösterimi (e).Quake Column (f) .....	15
<b>Şekil 16.</b> WASP tarafından üretilen 3D baskılı örnek bir ev çalışması olan Gaia .....	16
<b>Şekil 17.</b> Vinci construction ve XtreeE tarafından üretilen 3D beton eserler (a: 3D Pavilion, b: Post In Aix-En-Provence, c: Yağmursuyu Kollektörü, d: Cirratus Vazosu).....	16
<b>Şekil 18.</b> Minibuilders tekniği inşaat adımları. ....	17
<b>Şekil 19.</b> İSTON’ da üretilen 3D beton şehir mobilyaları.....	17

<b>Şekil 20.</b> Dijital üretim ile geleneksel konstrüksiyon arasındaki karmaşıklıkla ilgili çevresel avantaj. Çevresel etki, m <sup>2</sup> beton duvar başına Küresel Isınma Potansiyeli (kg CO <sub>2</sub> eşdeğeri) yüzdesi ile ifade edilmiştir.....	20
<b>Şekil 21.</b> Tez kapsamında üretilmesi planlanan A şeklindeki 3D beton ürün ve maruz kalması muhtemel çevresel şartlar (Atatürk Üniversitesi Yerleşkesi / Erzurum). ..	23
<b>Şekil 22.</b> (a) Ekstrüzyon tabanlı 3D baskı işleminin şematik gösterimi, (b) tez kapsamında üretilen 3D betonların ekstrüde edilmesi.....	26
<b>Şekil 23.</b> (a) yeterli inşa edilebilirlik özelliği göstermesi için 10 dakika içinde 10 kat baskılı tabaka dökülmesi uygundur (Bao <i>et al.</i> 2018), (b) tez kapsamında üretilen 3D betonun inşa edilebilirlik özelliğinin gerçekleşmesi.....	27
<b>Şekil 24.</b> 40 mm × 10 mm dikdörtgen nozulla ekstrüzyon işlemi sırasında a) yırtılma belirtisi olmayan kaliteli beton tabakalar, b) işlenebilirliğin zayıf olmasından kaynaklanan ekstrüzyon sırasında yırtılma belirtileri olan beton tabakalar .....	29
<b>Şekil 25.</b> Zaman geçtikçe ekstrüde işleminde meydana gelen değişim .....	30
<b>Şekil 26.</b> Donma çözülme etkisiyle oluşan D-çizgisi çatlama hasarı.....	36
<b>Şekil 27.</b> Donma-çözülme çevrimleri neticesinde oluşan boşluk hacim artışı ve parça kopması.....	37
<b>Şekil 28.</b> Hava sıcaklığı donma seviyesine kadar düştüğünde oluşan yerel parça kopması hasarı.....	37
<b>Şekil 29.</b> Powers (1956) çalışmasında kritik kalınlık için oluşturulan model.....	42
<b>Şekil 30.</b> Powers (1949) donmuş çimento matrisi modeli .....	42
<b>Şekil 31.</b> Kılcal damardaki buzun, hava gözenegindeki donmamış suyu çekmesi .....	44
<b>Şekil 32.</b> Buz cebi oluşumu ve kılcal gözenekte negatif basınç.....	45
<b>Şekil 33.</b> Kapalı kap teorisine göre buz basıncı nedeniyle donması engellenen su içeren boşluklu birim hücre küresi .....	46
<b>Şekil 34.</b> Boşluk-boyut dağılımı.....	53
<b>Şekil 35.</b> Kapiler boşluk çapı donma sıcaklığı ilişkisi .....	55
<b>Şekil 36.</b> AEA moleküllerinin hava, su ve çimento tanelerine tutunmaları. ....	57
<b>Şekil 37.</b> 3D beton üretiminde kullanılan malzemeler ve harç mikseri .....	68
<b>Şekil 38.</b> Ön deneylerden görüntüler (sol üstteki İSTON’da üretilen 3D beton saksı örneği, diğerleri Atatürk Üniversitesi’ndeki denemelerden görüntüler) .....	73
<b>Şekil 39.</b> Ön deneyler aşamasında (a ve b) ve gerçek boyutlu numunelerin üretimi esnasında (c, d, e ve f) yapılan taze betonların ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik özelliklerinin belirlenmesi .....	74

<b>Şekil 40.</b> Anton Paar marka Rotasyonel Reometre cihazıyla 3D beton karışımlarının reolojik özelliklerinin belirlenmesi.....	76
<b>Şekil 41.</b> Yayılma tablası deneyi.....	76
<b>Şekil 42.</b> a: birim hacim ağırlık ölçümü, b: hava içeriği ölçüm cihazı ve c: çalışılabilirlik süresi tayini için yapılan priz süresi deneyi.....	77
<b>Şekil 43.</b> Ön deneyler esnasında üretilen 3D beton numunelerin basınç deneyi .....	78
<b>Şekil 44.</b> İSTON 3D yazıcı cihaz sistemi.....	79
<b>Şekil 45.</b> 3D beton üretim sürecinin aşamaları .....	80
<b>Şekil 46.</b> 3D betondan üretilmiş tabakalı eleman, karot yerleri, karotlar ve karotlardaki boşlukların şematik gösterimi.....	81
<b>Şekil 47.</b> Karot örneklerindeki boşluklar (A: Döküme dik yönde alınan numunelerde, B: Döküme paralel yönde alınan numunelerde, C: Döküme dik yönde alınan karot numunesinin ortadan ayrılmış görüntüsü).....	81
<b>Şekil 48.</b> Karot alım süreci (A: Döküm yönüne göre yatay yönde karot alınması, B: Dikey yönde karot alınması, C: Karot alındıktan sonra geriye kalan beton kısım, D: yatay yönde alınan ve E: Dikey yönde alınan karot numunelerinden örnekler).....	82
<b>Şekil 49.</b> Tüm karot numuneler, karotların kesilme işlemi ve kesildikten sonraki bir grubun görüntüsü. ....	83
<b>Şekil 50.</b> Basınç dayanımı deneyi ve deneyden sonraki kırılma şekilleri .....	84
<b>Şekil 51.</b> UPV cihazı, aparatları ve deney esnasından bir görüntü .....	85
<b>Şekil 52.</b> Kılcal su emme deney düzeneği ve deneye ait bir görüntü.....	86
<b>Şekil 53.</b> ASTM C 666'ya göre yapılan donma-çözülme deneyi, dondurucu ortam ve dijital termometre .....	87
<b>Şekil 54.</b> 1-100 arası çevrim (a), 101-200 arası çevrim (b) ve 201-300 arası çevrimde (c) uygulanan soğutma-ısıtma rejimleri.....	88
<b>Şekil 55.</b> BET analizi için kullanılan Micromeritic 3Flex Version 5.00 marka cihaz. ....	90
<b>Şekil 56.</b> Taze birim hacim ağırlık sonuçları .....	93
<b>Şekil 57.</b> Hava içeriği deney sonuçları.....	94
<b>Şekil 58.</b> Yayılma tablası deneyi sonuçları .....	95
<b>Şekil 59.</b> Priz başlangıç süresi tayini deney sonuçları.....	96
<b>Şekil 60.</b> Basınç dayanımı hava sürükleyici katkı ilişkisi.....	97
<b>Şekil 61.</b> Basınç dayanımı, birim ağırlık ve hava içeriği arasındaki ilişki.....	98
<b>Şekil 62.</b> Bütün grupların kesme gerilmesini gösteren grafik.....	101
<b>Şekil 63.</b> Bütün grupların vizkozite değişimlerini gösteren grafik .....	101

<b>Şekil 64.</b> Tüm numunelerin kılcal su emme katsayıları grafiği .....	105
<b>Şekil 65.</b> Kılcal su emme deneyinde 24 saat sonunda numunelerde oluşan su yükseklikleri .....	106
<b>Şekil 66.</b> Ultrases hızının numune türlerine göre değişimi .....	107
<b>Şekil 67.</b> 3D baskılı numunelerin ultrasonik darbe dalga iletim formları .....	109
<b>Şekil 68.</b> UPV ile basınç dayanımı arasındaki ilişki (a: bütün numuneler, b: yatay-dikey karot numuneler, c: kür katkısı uygulanan ve uygulanmayan numuneler) .....	110
<b>Şekil 69.</b> Basınç dayanımlarının beton gruplarına göre değişimi .....	111
<b>Şekil 70.</b> Karot alım yönüne göre numunelerin basınç dayanımlarının kıyaslanması .....	112
<b>Şekil 71.</b> 3D betonların döküm yönü ve karot alım yönleri .....	112
<b>Şekil 72.</b> 3D beton elemana x, y ve z yönünde uygulanan basınç dayanım testi ve sonuçları .....	113
<b>Şekil 73.</b> 3D beton tabakalarının yönelimine göre değişen yüklemeler.....	114
<b>Şekil 74.</b> 3D beton numunelerin dayabildikleri donma-çözülme çevrim sayıları.....	115
<b>Şekil 75.</b> a: Donma-çözülme uygulanan 3D beton numunelerde hasar oluşumu ve numunelerin kırılması, b: Numunelerde bulunan çeşitli boyutlardaki boşluklar ..	117
<b>Şekil 76.</b> Donma-çözülme çevrimlerinde numunelerdeki UPV değişimi .....	118
<b>Şekil 77.</b> Ultrasonik dalga iletim hızı ile genleşme arası ilişki .....	119
<b>Şekil 78.</b> Yatay ve dikey yönde karot alımının UPV değişimi üzerindeki etkisi.....	119
<b>Şekil 79.</b> Kür işleminin UPV değişimi üzerindeki etkisi .....	120
<b>Şekil 80.</b> Donma-çözülme çevrimlerinin tüm numunelerin ağırlık değişimine etkisi .....	122
<b>Şekil 81.</b> Karot alım yönünün ağırlık değişimi üzerindeki etkisi.....	123
<b>Şekil 82.</b> Kürü-kürsüz numunelerin ağırlıklarındaki değişim.....	124
<b>Şekil 83.</b> Donma-çözülme çevrimlerinin numunelerin boyları üzerindeki etkisi .....	125
<b>Şekil 84.</b> Karot alım yönünün boy değişimine etkisi .....	126
<b>Şekil 85.</b> Kür işleminin numunelerin boy değişimine etkisi .....	127
<b>Şekil 86.</b> Donma-çözülme çevrimleriyle numunelerin çap değişimi. ....	128
<b>Şekil 87.</b> Karot alım yönünün numunelerin çap değişimlerine etkisi .....	128
<b>Şekil 88.</b> Kür işleminin numunelerin çap değişimine etkisi.....	129
<b>Şekil 89.</b> Donma-çözülme çevrimlerinde boy değişimi ve çap değişimi arasındaki ilişki.....	130
<b>Şekil 90.</b> Donma-çözülme maruz kalan betonların bağıl dinamik elastisite modülü değişimi .....	131
<b>Şekil 91.</b> Adsorpsiyon izoterm tipleri .....	136
<b>Şekil 92.</b> İzoterm eğrileri (a: A0, b: A1, c: A1,5 ve d: A2 grubu) .....	137
<b>Şekil 93.</b> Tip IV izoterm eğrisi.....	138

<b>Şekil 94.</b> Mukayeseli BET izotermi (a: donma-çözülme uygulanmayan numunelerde hava sürükleyici katkının BET izotermine etkisi. b: donma-çözülme uygulanan numunelerde hava sürükleyici katkının BET izotermine etkisi. c: kür katkı ve donma-çözülme uygulanmayan numunelerde hava sürükleyici katkının BET izotermine etkisi. d: kür katkı ve donma-çözülme uygulanan numunelerde hava sürükleyici katkının BET izotermine etkisi).....	139
<b>Şekil 94.</b> Mukayeseli BET izotermi (a: donma-çözülme uygulanmayan numunelerde hava sürükleyici katkının BET izotermine etkisi. b: donma-çözülme uygulanan numunelerde hava sürükleyici katkının BET izotermine etkisi. c: kür katkı ve donma-çözülme uygulanmayan numunelerde hava sürükleyici katkının BET izotermine etkisi. d: kür katkı ve donma-çözülme uygulanan numunelerde hava sürükleyici katkının BET izotermine etkisi).....	140
<b>Şekil 95.</b> BET analizi ile boyut boşluk dağılımı (a: A0, b: A1, c: A1,5 ve d: A2 grubu) (devam).....	142
<b>Şekil 96.</b> Boşluk-boyut dağılımı üzerine hava sürükleyici katkının etkisi (a: donma-çözülme uygulanmayan, b: donma-çözülme uygulanan, c: kür katkı ve donma-çözülme uygulanmayan, d: kür katkı ve donma-çözülme uygulanan numuneler).....	143
<b>Şekil 96.</b> Boşluk-boyut dağılımı üzerine hava sürükleyici katkının etkisi (a: donma-çözülme uygulanmayan, b: donma-çözülme uygulanan, c: kür katkı ve donma-çözülme uygulanmayan, d: kür katkı ve donma-çözülme uygulanan numuneler).....	144
<b>Şekil 97.</b> MIP analizinden elde edilen boyut boşluk dağılım grafikleri.....	147
MIP analizi grafiklerinden görüldüğü üzere donma-çözülme işlemi hemen hemen tüm gruplarda boşluk-boyut dağılımı üzerinde oldukça etkili olmuştur.....	148
<b>Şekil 98.</b> Hava sürükleyici katkı etkisinin numunelerin boyut boşluk dağılımına etkisi (a: donma-çözülme uygulanmayan, b: donma-çözülme uygulanan, c: kür katkı ve donma-çözülme uygulanmayan, d: kür katkı ve donma-çözülme uygulanan numunelerde).....	149
<b>Şekil 98.</b> Hava sürükleyici katkı etkisinin numunelerin boyut boşluk dağılımına etkisi (a: donma-çözülme uygulanmayan, b: donma-çözülme uygulanan, c: kür katkı ve donma-çözülme uygulanmayan, d: kür katkı ve donma-çözülme uygulanan numunelerde) (devam).....	150
<b>Şekil 99.</b> Numunler üzerinden alınan XRD grafikleri ( a: A0, b: A1, c: A1,5, d: A2) .....	154
<b>Şekil 100.</b> A2 numunesinin XRD analiz sonucu.....	155

<b>Şekil 101.</b> Bütün numunelerin hava boşluk dağılımının SEM görüntüleri.....	156
<b>Şekil 102.</b> a: hava gözenekleri içinde etrenjit oluşumu, b: oluşan etrenjitlerin yakın görünümü, c: Numunede gözlemlenen düz plaka şeklindeki tobermorit görünümü, d: tobermoritin yakın plan görüntüsü, e: bazı hidrasyon ürünlerinin görüntüsü, f: üretilen beton numunelerin agrega ve çimento hamuru iç yapılarının görünümü.....	158
<b>Şekil 103.</b> Hava gözenekleri içerisinde etrenjit oluşumu.....	160
<b>Şekil 104.</b> Hava boşluklarında gözlemlenen etrenjitin boşluğu doldurması ve bu alanda yapılan EDX analizi.....	160
<b>Şekil 105.</b> a: NocuÒ-Wczelik, W. (1999), b: Li <i>et al.</i> (2018), c: Abid <i>et al.</i> (2019) tarafından gözlemlenen tabaka şeklindeki tobermorit jel yapıları.....	161
<b>Şekil 106.</b> 3D beton örneklerin içindeki pp liflerin SEM görüntüsü .....	161



## TABLolar DİZİNİ

<b>Tablo 1.</b> Betonun Dona Dayanıklılığının Değerlendirilmesinde Kullanılan Bozulma Kriterleri .....	50
<b>Tablo 2.</b> TS EN 206-1' e Göre Donma Çözülme Etkisine Maruz Kalacak Betonlar İçin Belirlenen Çevresel Etki Sınıfları.....	59
<b>Tablo 3.</b> Çimentonun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri .....	64
<b>Tablo 4.</b> Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri .....	65
<b>Tablo 5.</b> Kalsine Kaolin Kilinin Özellikleri.....	66
<b>Tablo 6.</b> Kimyasal Katkıların Teknik Özellikleri .....	68
<b>Tablo 7.</b> Numunelerin Kodlanması.....	72
<b>Tablo 8.</b> 3D Beton Üretimi İçin Belirlenen Malzemelerin Miktarları (kg) .....	72
<b>Tablo 9.</b> Kullanılan Reometrenin Teknik Özellikleri .....	75
<b>Tablo 10.</b> Taze Beton Deney Sonuçları .....	92
<b>Tablo 11.</b> 3d Betonların Akma Gerilmeleri ve Vizkoziteleri .....	100
<b>Tablo 12.</b> Histeresiz Grafiğinin Altında Kalan Alandan Elde Edilen Tiksotropi Değerleri .....	102
<b>Tablo 13.</b> Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları .....	104
<b>Tablo 14.</b> Ultrases Geçiş Hızı Yöntemiyle Beton Kalitesinin Değerlendirilmesi .....	109
<b>Tablo 15.</b> ASTM C 666'ya Göre Hesaplanan Bağlı Dinamik Elastisite Modülleri .....	132
<b>Tablo 16.</b> BET Analizi Sonucu Belirlenen Yapısal Özellikler .....	135

# GİRİŞ

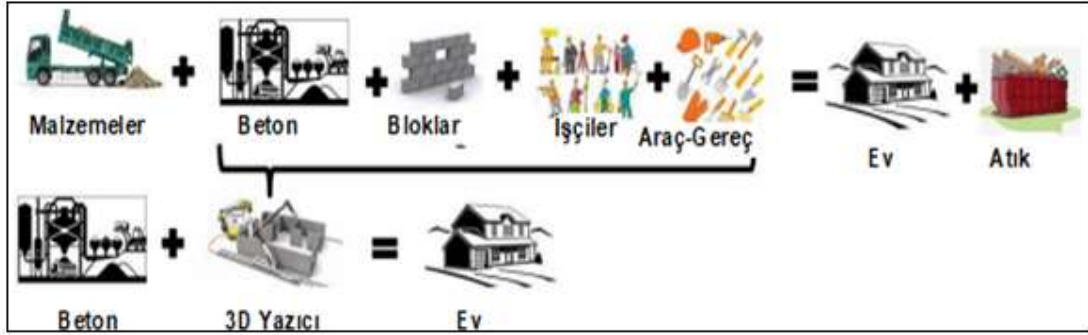
## Betonun Dijital Fabrikasyonu

Agrega, su ve çimento bileşenlerinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen beton, ticari açıdan en çok tüketilen malzemelerin başında gelmektedir. Betonun en önemli bileşeni olan Portland çimentosu ve varyantları yirminci yüzyılın başından bu yana görülmemiş bir gelişme yaşamıştır. 2013 yılında dünya çimento üretimi yaklaşık 4 milyar ton olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda yaklaşık 26,7 milyar ton agrega ile 2,7 milyar ton su tüketildiği düşünüldüğünde sadece 2013 yılında yaklaşık 33,4 milyar ton beton tüketildiği açıkça görülmektedir (Tangüler vd. 2015; Justnes and Hammer 2016). Yollar, köprüler, tüneller, barajlar, enerji santralleri, limanlar, havaalanları, hendekler, deniz duvarları, atık ve tatlı su santralleri ve şebekeleri, tüm bu binaların kendisi ve altyapıları betonun yaygın kullanımına yol açmaktadır. Enerji sektöründeki gelişmeler ve devam eden iklim değişikliği büyük olasılıkla betona olan ihtiyacın giderek artmasına neden olacaktır. Rüzgâr çiftlikleri gibi yenilenebilir enerji tesisleri uygulamaları için önemli miktarlarda beton gerekmektedir ve okyanus seviyesinin yükselmesi, muhtemelen binlerce kilometrelik barajın inşasını gerektirecektir (Damme 2018).

Günümüzde 3D yazıcı teknolojisi birçok alanda kullanılmakta ve her geçen gün farklı kullanım alanlarına kavuşmaktadır. Bu alanlara örnek olarak endüstriyel imalat, tıp ve sağlık, havacılık ve uzay, mimarlık ve inşaat, askeri uygulamalar, tekstil, gıda ve eğitim sıralanabilir. Ancak diğer alanlara kıyasla inşaat endüstrisi hala 3D baskının gelişiminde geridedir.

İlk kez 1984'te Charles Hull tarafından sayısal bilgi kullanılarak 3D obje üretimi geliştirilmiştir (Nadarajah 2018). Bu yöntemde 3D sayısal model, stereolitografi (STL) formatına dönüştürülür ve 3D yazıcıya gönderilir. 3D yazıcı, katman katman inşa ederek somut objeyi oluşturur. Önceden "Hızlı Prototipleme" olarak bilinen 3D yazıcı teknolojisi ile az miktarda malzeme kullanımı, hafif ve çok fonksiyonlu bileşenlerin tasarımı mümkün kılınmıştır. Onlarca yıldır imalat endüstrisinde benimsenen bu teknoloji, son zamanlarda konut ve villaların 3D yazıcılarla hızlı ve pratik bir biçimde üretilmesi için inşaat endüstrisinde de kullanılmaya başlanmış ve oldukça ilgi görmüştür. Teknoloji, istenilen ve farklı geometrilere yapı üretimi imkânı sunmasının yanında inşaat süresini, maliyetini ve iş gücünü azaltarak inşaat endüstrisine önemli faydalar sağlamaktadır (Wolfs 2015; Wu *et al.* 2016). Hager *et al.* (2016) 3D baskı teknolojilerini, geometrik karmaşıklık içeren yapıları uygulamaya dökmek için neredeyse sınırsız olanaklar sunan çevre dostu bir ürün olarak nitelendirmektedir. Bu nedenle,

beton yapıların 3D baskısı, bugünkü inşaat teknolojisinde ileri teknolojik gelişmelerden birisi olarak değerlendirilmektedir. Şekil 1’de geleneksel üretim yöntemlerine göre 3D yazıcılarla üretimin avantajları gösterilmiştir.



Şekil 1. Geleneksel ve 3D baskı ile inşaat üretim sürecinin karşılaştırılması (Nadarajah 2018).

3D beton yazıcısı ile beton üretimi, geleneksel üretim yöntemleri ile beton yapıların inşa edilme sürecinde mümkün olmayan birtakım avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlar aşağıda özetlenmiştir (Gebler *et al.* 2014; Bos *et al.* 2016; Özalp vd. 2018):

- Karmaşık geometrilerin üretimi beton yazıcılar ile daha kolay gerçekleştirilebileceğinden kalıp kısıtlamaları olmaksızın ürün tasarımında yeni bir mimari özgürlük mümkün olacaktır (tasarım özgürlüğü)
- Üst üste eklemeli üretim yöntemi olan 3D baskı, sadece ihtiyaç duyulan yerlerde beton baskı yapılmasına ve beton tüketiminden tasarruf edilmesine olanak sağlamaktadır (malzeme tasarrufu nedeniyle maliyetin düşmesi ve daha az kaynak talebi)
- Robotlarla üretimde betonun vibrasyonla yerleştirilmesine gerek duyulmamaktadır (vibrasyon maliyetinin ve gürültü kirliliğinin ortadan kalkması)
- Kalıp gerektirmemesi nedeniyle üretkenliğin artması beklenmektedir (zamandan, malzemedan ve işgücünden tasarruf)
- 3D yazıcılar 7 gün 24 saat çalışabilir (inşa süresinin kısalması)
- Binaların bilgi modelleriyle mükemmel şekilde eşleşen dijital bir tasarım türü ile birlikte çalışabilir (Dijital üretim ve diğer teknolojik uygulamalarla entegrasyon)
- Yerinde (in-situ) üretim
- Yaklaşık %30'a kadar azaltılmış malzeme atığı
- Daha düşük enerji kullanımı
- Tüm ürün ömrü boyunca daha az CO<sub>2</sub> emisyonu

- Üretilen elemanların, üretim masraflarında veya sürelerinde belirgin bir artış olmadan defalarca değiştirilebilmesi

Bununla birlikte, bu yöntemin endüstriyel uygulamalarında malzeme-karışım formülasyonunun karmaşıklığı, standart eksikliği ve üst üste binen katmanlar arasındaki ara yüzey bağlantı kalitesi gibi problemleri mevcuttur. Ayrıca, 3D beton üretimi için malzeme bilimi, mimarlık/tasarım, mühendislik ve robot üretim bilgisi gibi disiplinler arası bir çaba gerekmektedir (Ghaffar *et al.* 2018). Yine bu üretim süreci, hassasiyet gerektirmesi, yüzey kalitesi, kullanılacak malzemelerin özenle seçilmesi gerekliliği ve mekanik özelliklerin düşük olması gibi geleneksel inşaat ve üretim işlemlerine karşı dezavantajları da içermektedir (Hopkinson *et al.* 2006).

3D yazıcı ile ürün ortaya çıkarmanın çeşitli yöntemleri vardır. Bu yöntemlerin hemen hepsi nesneyi tabaka tabaka dökerek ortaya çıkarmaya dayandığı için **Eklmeli İmalat** (Additive Manufacturing, AM, (ASTM F2792-12a (Anonymous 2012) olarak isimlendirilmektedir.

### **Eklmeli İmalat (Additive Manufacturing (AM))**

Nesne oluşturma işlemlerinin temel olarak bilinen dört türü vardır: i- keserek çıkarma, ii- şekillendirme, iii- kalıpla döküm ve iv-katmanlı imalat.

3D üretim, üç boyutlu nesnelerin, malzemenin tabaka tabaka eklenmesiyle oluşturulması (eklemeli/katmanlı imalat) esasına dayalı bir üretim yöntemidir. ASTM F2792-12a' da katmanlı üretim "3D model verilerinden nesnelere üretmek için genellikle tabaka tabaka birbirlerinin üzerine dökülmesi suretiyle malzemeleri birleştirme işlemi" olarak tanımlanır. Aynı standartta bu yöntemin eş anlamlı kullanımlarının eklemeli üretim (additive fabrication), eklemeli süreç (additive processes), eklemeli teknikler (additive techniques), eklemeli tabakalı üretim (additive layer manufacturing), tabakalı üretim (layer manufacturing) ve kalıpsız üretim (freeform fabrication) olduğu belirtilmektedir.

Yaygın olarak kullanılan AM teknolojileri, bir bilgisayara ilave olarak 3D modelleme yazılımı (Bilgisayar Destekli Tasarım, CAD), makine ekipmanı ve katman malzemesinin birlikte kullanımını içerir. Bir CAD taslağı üretildikten sonra, dosya AM ekipmanına aktarılır ve makine verileri CAD dosyasından okur ve malzemeyi üst üste katmanlar halinde yerleştirerek nesneyi üç boyutlu oluşturur (Şekil 2). Bu nesnelere oluşturmak için kullanılan malzeme toz, sıvı veya levha olabilir (Chang 2016).



**Şekil 2.** AM yönteminde bilgisayardaki tasarımdan objenin oluşumuna kadar geçirilen evreler (Campbell *et al.* 2011)

Eklemeli imalat işlemi 1960'lı yılların ortasından beri kullanılmaktadır ve kullanılan malzemeler konusunda çeşitli gelişmeler olmuştur. 1990' ların ortasından beri ise beton yapımında kullanılmaya başlanmıştır (Bos *et al.* 2016). Eklemeli imalat terimi; Hızlı Prototipleme (Rapid Prototyping, RP), Doğrudan Dijital Üretim (Direct Digital Manufacturing, DDM), Tabakalı Üretim (Layered Manufacturing, LM) ve 3D baskı (3D printing) gibi benzer nesnelere üretebilen birkaç teknolojiyi içerir. Günümüzde yaygın olarak 3D baskı olarak bilinen eklemeli imalat, üretim maliyetinde ve üretim sürecinde masrafın azaltılmasında çok etkili olmuştur (Nadarajah 2018).

AM süreçleri genellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde ürün tasarımında, gittikçe artan bir şekilde tıbbi uygulamalarda ve mimari modellemelerde, genellikle küçük parçalar üretmekte kullanılmaktadır. Serbest biçimli yapı üretme araştırmaları 1997'de başlamıştır. Pegna (1997), inşaat sürecinin karmaşıklığının bir dizi temel işlemle yeniden yapılandırılarak basitleştirilebileceğini ve bir tabaka üzerine reaktif malzeme tabakası (Portland çimentosu) bırakarak tabakalı üretimle 3 boyutlu form elde edilebileceğini göstermiştir. Çimento esaslı malzemelerin AM yönteminde kullanılmaya başlandığı bu girişimden sonra AM tekniklerini benimseyen büyük ölçekli yapılar üretilmeye başlanmıştır.

AM'nin kullanımı tasarımcının çalışma metodu ve dizayn proseslerine göre değişiklik gösterebilir. Bu bağlamda hâlihazırda dünya çapında üç farklı büyük ölçekli AM süreci vardır. Bunlar; i-Contour Crafting (Amerika), ii- D-Shape (İtalya) ve iii- Concrete Printing (İngiltere)'dir. Her üç süreç de büyük ebattaki bileşenlerin başarılı bir şekilde üretilebildiğini kanıtlamış olup inşaat ve/veya mimari uygulamalar için uygundur (Hague *et al.* 2003). Aşağıda bu yöntemler açıklanmıştır.

### ***Contour crafting (CC)***

İnşaat endüstrisi için geliştirilen ana AM teknolojilerinden biri de, robotik kollar ve ekstrüzyon nozulları kullanan katmanlı bir üretim teknolojisi olan Contour Crafting'dir (Lim *et*

al. 2012). Tekniğin ilk kullanımı Khoshnevis'in (Güney Kaliforniya Üniversitesi) 1988 yılında yayınladığı yayınlarda (Austin and Khoshnevis 1988; Khoshnevis and Bekey 1998) görülmüş olup o zamandan bu yana yöntem üzerinde ciddi ilerlemeler kaydedilmiştir. CC süreci, geleneksel inşaat sürecini taklit eden, ancak kısmi olarak otomasyonla gerçekleştirilen bir işlemdir. Öncelikle çimento esaslı bir bileşikle (beton veya harç) doldurulacak olan özel bir malzeme kullanılarak kalıcı bir perde oluşturulur. Sonrasında bazı güçlendirme prosedürlerine uygun olarak U şeklindeki bağlantı çubuklarının yatay ve dikey olarak yerleştirilmesiyle şekil ortaya çıkmaktadır (Şekil 3). CC işleminde kalıp bertaraf edilmez ve duvarın bir parçası haline gelir. Sistem; kalıplama, güçlendirme ve yerleştirme olarak üç ayrı basamak gerektirir. CC süreci polimer, seramik hamur, çimento ve başka malzemeler ve karışımlar kullanarak büyük ölçekli nesnelere oluşturmak için kullanılan katmanlı üretim yöntemidir (Wolfs 2015). CC yönteminde büyük agrega, takviye elyaflar, katkı maddeleri gibi çeşitli malzemeler de kullanılabilir ayrıca nozul (baskı ağızlığı) saptırılarak kubbe ve tonoz gibi eğrisel yüzeyler oluşturabilir.



**Şekil 3.** CC nozul ucu, bir CC cihazı konfigürasyonu ve çimentolu malzemelerle yapılan baskı işlemi (Khorranshahi and Mokhtari 2017; Ghaffar *et al.* 2018)

İçinde bulunduğumuz 21. yüzyılın sonlarına doğru insan kolonisinin hedeflediği Ay ve Mars gibi diğer gezegenlerde inşaat yapıları için birkaç uygulanabilir yaklaşımdan en muhtemel olanı CC'dir (Khoshnevis 2004). Bu yöntem ile Amerika Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) da ilgilenmiş ve finansman sağlamıştır. İnsanlar gelecekte Ay'a ve Mars'a yerleşebilecektir ancak inşaat önerilerinin çoğu yeryüzünden yapısal öğelerin taşınması ve hedef sahada bir araya toplanması üzerine kurulmuştur. Bu durum, pahalı bir yaklaşımdır. Bunun yerine, 3D baskı ile yerinde malzeme kullanılması önerilmiştir. CC, regolit adı verilen kükürtlü beton ve sinterlenmiş Ay toprağı kombinasyonunu kullanmayı amaçlamaktadır. Her ikisi de kolayca yerinde elde edilebilir ve bu da nakliye maliyetlerinden tasarruf sağlayacaktır. Görüldüğü üzere CC yöntemi, Ay inşaatı yöntemi konusunda da ümit vadetmektedir (Khoshnevis and Zhang 2012; Cesaretti *et al.* 2014; Özalp vd. 2018).

CC tekniği şu anda büyük ölçüde basınca çalışan dikey elemanlar üretmekte kullanılmakta olup kapı veya pencere boşluğunu doldurmak gerektiğinde bir lento yerleştirilir

ve üzerine duvar inşa edilmeye devam edilir. Makineler bir XYZ portal sistemine, üç yönde hareketli kontrol bileşenine sahip bir nozul düzeneğine ve altı eksenli bir koordineli hareket sistemine sahiptir. CC'nin temel özelliği, imal edilen nesne üzerinde pürüzsüz ve doğru yüzeyler oluşturmak için düzlemsel yüzey olarak işlev gören karşılıklı iki mala kullanılmasıdır (Ghaffar *et al.* 2018).

### ***D-shape***

İtalyan mühendis Enrico Dini 2004 yılında bir bilgisayarın sağladığı grafik dosyasına göre, mürekkep püskürtmeli yazıcı kafası vasıtasıyla toz tabakalarının her birini diğerinin üstüne yayararak biriktiren Z-Corp adında bir 3D yazıcı üretmiştir. Toz yataktan küçük bir nesne çıkarıldığında, Enrico'nun bu üretim sürecinin mimari ölçekte uygulanabilecek potansiyelini fark etmesiyle D-Shape süreci başlamıştır. Tozu kum ya da çakıl ile değiştirerek işlemi ve makineyi ölçeklendirerek yazıcıyı büyük nesnelere basabilecek kapasiteye getirmiştir. Bu sayede üç boyutlu nesnelere bir "inşaat ekipmanına" dönüştürülmüş ve 3 boyutlu evler yazdırılmaya başlanmıştır. D-Shape, büyük ölçekli nesnelere için etkili bir baskı yöntemine sahip, fabrika tabanlı bir portatif toz yatak 3D baskı işlemidir. Yöntem, bağlayıcı maddenin kullanıldığı mürekkep püskürtmeli toz baskı işlemine oldukça benzeyen bir toz biriktirme işlemi kullanır. Böylece baskı malzemelerinden istenilen tabakalar sertleştirilerek şekil ortaya çıkarılmış olur (Cesaretti *et al.* 2014). Bu tür işlemlerin dezavantajı, daha fazla bakım, temizlik ve kontrol gerektirmesidir ve yapı, işlem sonrası şeklin ortaya çıkması için geri kalan tozlardan temizlenmek zorundadır (Ghaffar *et al.* 2018). D-Shape işleminde, bağlayıcı maddenin her katmandan içeri girmesi gerekmektedir ve enjeksiyon noktası çevresinde meydana gelen kuma derecesi (bleeding) gibi konular önemli parametrelerdir (Lim *et al.* 2012).

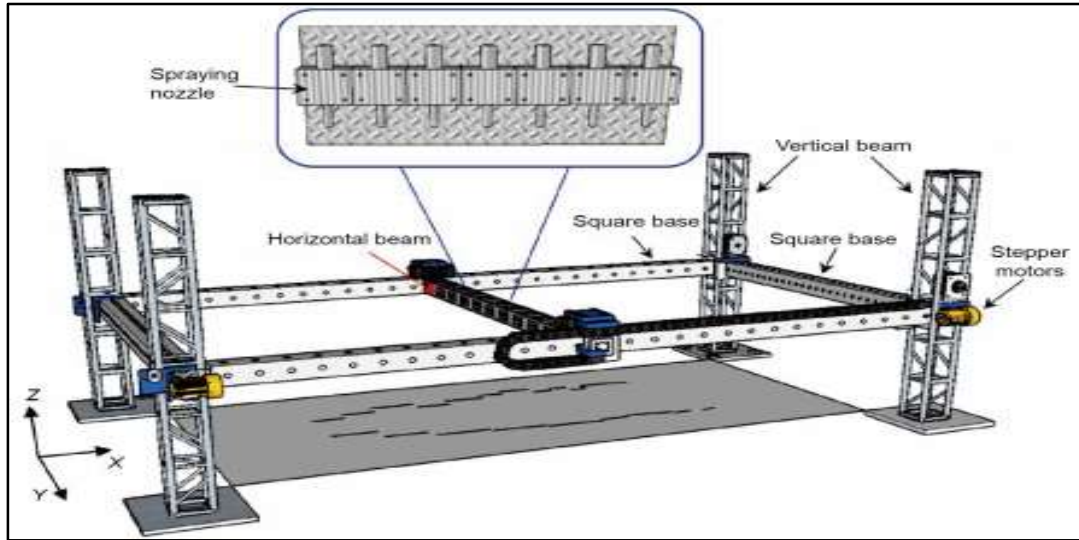
D-Shape yazıcılar, granüler materyalleri yayma kafasına iletmek için bir mikser ve bir besleme sisteminden oluşur. İsteğe bağlı olarak, binanın işlem sonunda açığa çıkması amacıyla bağlanmamış agregaların sökülmesi için bir vakum sistemi de bağlanabilir (Anonymous 2020a). D-Shape işlemi, malzeme tabakası içerisine bir bağlayıcı enjekte edilmesi esasına dayanır. Süreç, kum ve 5-10 mm katman derinliği olan inorganik bir bağlayıcı kullanılarak mimari eserler basmayı amaçlamaktadır. İşlem, kullanılmamış yapı tozunun uzaklaştırılıp yüzeyin taşlanması ve parlatılması ile sonlandırılmaktadır (Lim *et al.* 2009).

D-Shape, tek seferde, bodrum katan çatıya kadar dijital olarak tasarlayıp inşa edebilen orijinal ve büyük boyutlu 3D baskı işlemidir. Bu yapısını inşaatı sırasında kendi kendine devam eden malzeme biriktirme tekniği ile mümkün kılmaktadır. Bu şekilde, herhangi bir şekildeki binayı inşa etmek mümkündür (Anonymous 2020a).

Şekil 4’ de karmaşık biçimli bir yapı olan Radiolaria Pavilion isimli örneğin D-Shape şirketi tarafından yapılan üretim aşamaları görülmektedir. 3×3×3 m ölçülerindeki yapı, 2010 yılında İtalya'nın Pontedera kentinde inşa edilmiştir. Yapı suni bir kumtaşı malzemesinden yapılmıştır ve hiçbir iç donatı içermemektedir. Portland çimentosundan daha üstün olan bazı performans özelliklerine sahip inorganik bir bağlayıcı ile üretilmiştir. İşlem alttan başlayarak her seferde 5-10 mm katmanlar halinde ilerleyerek devam etmiştir. Katılaşma işleminin tamamlanması 24 saat sürmüştür, imalat sırasında yapıyı destekleyen ve sonrasında atık olarak ortaya çıkan malzemeler yeniden kullanılabilir nitelikte olmuştur. Yapının geometrik morfolojisi, kalıp kullanmadan, yazıcının sağladığı herhangi bir karmaşık geometriyi inşa etme potansiyelini yansıtmaktadır (Anonymous 2020b). Şekil 5’ de ise D-Shape yazıcının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4. D-shape işlem fazları: dijital model, 3D baskılama, temizleme ve cilalama (Anonymous 2020a).



Şekil 5. D-Shape Yazıcı Sistemi (Ma et al. 2018a)

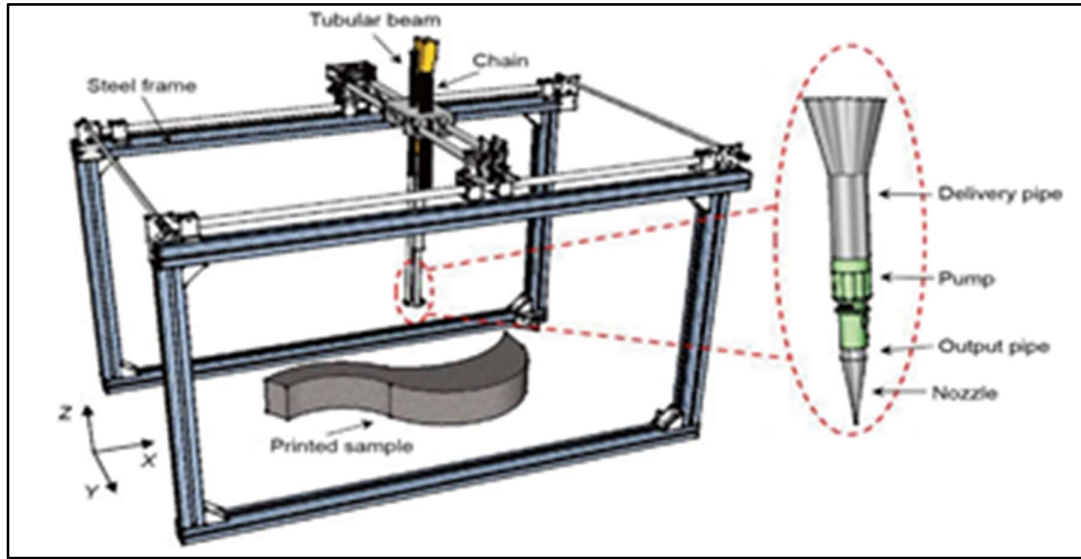
### ***Concrete printing (CP)***

Concrete Printing (beton baskı) bir diğer büyük ölçekli 3D inşaat işlemidir. Baskı nozulu önceden programlanmış bir yol boyunca hareket eder ve beton malzemelerin sürekli olarak ekstrüzyonunu yapar. CC ile karşılaştırıldığında CP yönteminin karmaşık geometrilerin daha



iyi kontrol edilmesini sağladığı görülmüştür (Ma *et al.* 2018a). CP, D-Shape'den farklı olarak, sadece gerekli malzeme hacminin yapı için depolandığı anlamına gelen tek bir biriktirme nozulü kullanır. Bununla birlikte, tek nozul yaklaşımı kaçınılmaz olarak biriktirme oranını sınırlar. Çünkü nozul tüm yapı alanını dolaşmak zorundadır (Lim *et al.* 2012). İşlemin çoğu veri hazırlama, malzeme hazırlama ve çimento bazlı bir harcı ekstrude ederek yazdırma esasına dayanmaktadır (Lim *et al.* 2011).

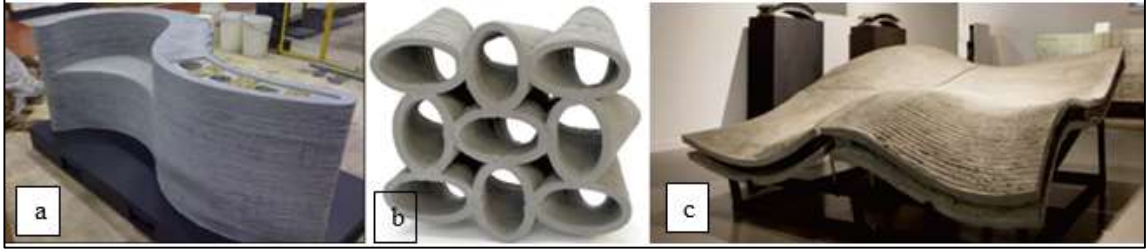
Şekil 6 beton baskının işlem sürecini göstermektedir. Çelik borudan oluşan bir kirişe monte edilmiş baskı kafası X, Y ve Z yönlerinde serbestçe hareket edebilir durumdadır. Taze beton ilk önce dağıtım borusundan bir pompaya verilir. Daha sonra beton malzeme, baskı nozulüne pompa yardımı ile sorunsuz şekilde iletilir. Son olarak, beton lifler, yapısal bileşenlerin enine kesitini sürekli olarak izleyerek nozuldan çıkar ve tasarım ortaya çıkmış olur (Ma *et al.* 2018a).



Şekil 6. CP yönteminin şematik gösterimi (Ma *et al.* 2018a).

Loughborough Üniversitesi'nde CC'ye benzer bir yöntemle CP tekniği geliştirilmiştir. Bu yöntemle 28. günde 100 MPa'lık basınç dayanımı ve 10 MPa'lık eğilme dayanımına ulaşmanın yanı sıra işlenebilirlik, ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik gerekliliklerini sağlayan yüksek performanslı bir 3D baskılanabilir beton geliştirilmiştir. CEM I 52,5 tipi çimento, uçucu kül ve silis dumanı bağlayıcı bileşenleri olarak belirlenen karışımlara uzunluk/çap oranı 12 mm / 0,18 mm olan polipropilen mikro fiber ilave edilmiştir. Baskı ürünlerinin boyutları 5,4 × 4,4 × 5,4 m'dir. Bu boyutlar, prekast beton kolonlar ve prekast temel beton bileşenleri basmak için kapasitenin yeterli olduğunu göstermektedir. Bu teknik, iç ve dış geometrilerin daha iyi kontrol edilmesine izin verdiği için daha yüksek boyutlu elemanlar elde

etmeyi mümkün kılmıştır. CP yönteminin ölçeğini göstermek için bu yöntemle üretilen bazı elemanlar ve boyutları Şekil 7’ de verilmiştir.



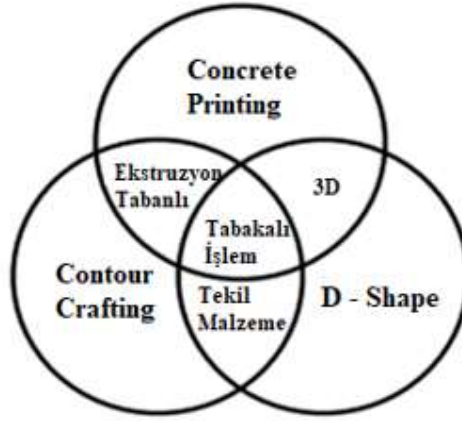
**Şekil 7.** CP yöntemiyle üretilen elemanlar (a: Wonder Bench (2×0.9×0,8 m) (Lim *et al.* 2011), b: Akustik sönümleyici duvar elemanı (65× 65× 30 cm) (Gosselin *et al.* 2016), c: Çift kıvrımlı 4 parçalı sandviç panel baskısı (Lim *et al.* 2016)).

### ***Yöntemlerin (CC, D-shape ve CP) karşılaştırılması***

Baskı ölçeği ve boyutlandırma açısından CC, çok eksenli robotik kolunun sağladığı faydalar nedeniyle gerçek hayattaki yapıyı gerçekleştirebilme potansiyeli bakımından diğer iki yöntemden daha uygun gözükmetedir. CC ile karşılaştırıldığında, diğer iki işlemin üretim boyutunun, biriktirme yöntemleriyle ve özellikle mekanik çerçeveye büyük ölçüde sınırlandırılmış olduğu görülecektir. Baskı hızı açısından, CC ve CP işlemi şu anda tek ve büyük çaplı bir nozulla yapılmaktadır, bu da yüksek katman birikim hızına neden olmaktadır. CC ve CP işlemi oldukça hızlı olmasına rağmen, düşük baskı çözünürlüğü (en küçük ayrıntıyı yapabilme özelliği) ve katman kalınlığı bakımından sınırlandırılmaktadır. CC ile karşılaştırıldığında, CP yöntemi daha az kaplama çözünürlüğüne (katman derinliği açısından 4 - 6 mm) sahiptir ve bu da karmaşık geometrilerin daha hassas kontrolünü sağlar. D-Shape yöntemi ise, küçük çaplı çok sayıdaki nozuldan faydalandığı için daha yüksek baskı çözünürlüğüne sahiptir (Ma *et al.* 2018b). Hem CP hem de D-Shape, çıkıntılar ve diğer serbest form özellikleri oluşturmak için ilave desteğe ihtiyaç duymaktadır. Şöyle ki; D-Shape, toz bazlı bir işlemdir ve konsolide edilmemiş malzemeyi destek için kullanmaktadır. CP ise Eriyik Yığılma Modeli (Fused Deposition Modelling) sürecine benzer şekilde ikinci bir malzeme kullanmaktadır (Lim *et al.* 2012). D-shape temel olarak kuru bir işlem iken CC ve CP ıslak işlemlerdir. Üç yöntemde de kontrol edilebilir olan bir kütleme işlemi söz konusudur.

Genel olarak her üç yöntem de büyük boyutlu bileşenlerin yapımında kullanılabilir (Gahffar *et al.* 2018). Her üç işlemde de katman derinliği, yapım hızı ve istenen yüksekliği oluşturmak için gereken katman sayısı ile ters orantılıdır. Minimum özellik boyutu (yani inşa edilebilecek en küçük detay), yüzey kalitesi ve malzeme özellikleriyle doğrudan ilgilidir. Ekstrüzyon işlemleri; karışım tasarımından, ekstrüzyon inceliğini sınırlayan partikül boyutundan ve ekstrüzyona tabi tutulmuş liflerin sürekliliğinden büyük ölçüde etkilenmektedir.

Baskı hassasiyetinin artırılması daha ince bir nozul kullanılmasına ve dolayısıyla birim zamanda baskılanan malzeme miktarının azalmasına neden olarak baskı süresini uzatır ve yazdırmak için daha fazla katman gerektirir. Dolayısıyla, uygun baskı hızı ve çözünürlüğünü elde etmek bir ikilemdir. Biriktirme yolu açısından CC, nozulun iki geçişi olan bir tabakanın dışını çizerek tabakalar arasındaki çalışma süresini azaltmaktadır. Bu işlem, duvar benzeri bileşenlerin ve yapıların üretiminde çok iyi sonuçlar vermektedir. D shape, tüm kesiti sadece tek bir hareketle basarken, CP tek bir biriktirme nozulu kullanır ve tüm inşaat alanını çok sayıda devirle geçerek tamamlamaktadır (Ma *et al.* 2018a). CC ve CP tekniklerinde pürüzsüzleştirme döküm esnasında kendiliğinden sağlanırken, D-Shape işleminde, böyle bir yüzey isteniyorsa taşlama ve parlatma gerektiren bir son işlem yapılmalıdır (Lim *et al.* 2012). Bu üç yöntem arasındaki ilişki Şekil 8’ de gösterilmiştir.



**Şekil 8.** Uygulamalar arasındaki benzerlikler ve farklılıklar (Lim *et al.* 2012).

### **Dünyadan 3D beton uygulama örnekleri**

Son birkaç yıl içinde dünyanın çeşitli bölgelerinde 3D printing concrete çalışmaları hız kazanmıştır. Beton ve çimento esaslı malzemelerin 3D yazıcılar ile birlikte kullanımı her geçen gün ilgi çekici çalışmalarla artmaya devam etmektedir. Küçük ve yapısal olmayan uygulamalarla başlayan 3D beton baskılama süreci, yöntemi benimseyen ve geliştiren büyük firmalar vasıtası ile gelişerek büyük ölçekli yapıların üretilmesine neden olmuştur. Dünya çapında 3D beton uygulamalarının geldiği aşamayı gösterebilmek için aşağıda çeşitli ülkelerdeki uygulamalardan örnekler verilmiştir. Uygulamalar şirketler tarafından yapıldığından şirket isimleri de yazılmıştır.

i) Çin’den örnek uygulamalar:

Ying Chuang Building Tech (Shanghai) Co., Ltd (Winsun): Winsun şirketi, ticari projelerde 3D baskı kullanan Çin’deki yenilikçi bir inşaat şirkettir. Firma büyük ölçekli yapı elemanlarını fabrikalarında yüksek hızda yazdırmak için 150 (boy) × 10 (genişlik) × 6,6

(yükseklik) metre boyutlu bir yazıcı geliştirmiştir. Contour crafting'e benzer bir metotla iç ve dış yan duvarlar basılarak, ardından zikzak şeklinde bir iç yapı oluşturularak yapı tamamlanmaktadır. Şekil 9' da görüldüğü üzere bu teknikle firma, 6 katlı apartman ve 1.100 metrekarelik genişliğe sahip büyük bir bina inşa etmiştir. CC tekniği şantiyede bütün bir binanın basılmasını hedeflerken, Winsun firması bir fabrikada büyük bir binanın parçalarını basarak, onları şantiye alanına taşımayı ve son olarak bunları inşaat alanında birleştirmeyi yeğlemektedir. Şekil 9' da ilk iki resimde gösterilmiştir. Winsun, bir günde on adet 3D baskı ev inşa edebilme potansiyeline sahiptir. Ayrıca çok katlı apartman ve villa yapımı konusunda yeni projeler başlatmıştır.



**Şekil 9.** Winsun şirketi tarafından üretilen 3D elemanlar, duvar örneği ve çok katlı 3D yapılar (Anonymous 2020c)

ii) Hollanda'dan örnek uygulamalar:

CyBe Constructions: CyBe Constructions, beton ve harç ile 3D baskı beton çözümleri sunan ve CC tekniğini benimseyen bir Hollanda şirkettir. İnşaat sektöründeki ana inşaat uygulamalarında dijital üretim sürecini daha fazla ön plana çıkarmaya odaklanmıştır. Şirket, 3D baskı betonu daha kullanıcı dostu yapma ve mevcut beton baskı teknolojilerini geliştirmeyi hedeflemektedir. Ayrıca, otomatik, pratik ve kullanıcı dostu olmasının yanı sıra sürdürülebilir bir üretim süreci olan 3D baskı betonunu tanıtmak için Hollanda'daki diğer şirketler ve üniversitelerle projeler yapmaktadır. Şekil 10' da şirketin kullandığı 3D beton baskı cihazı ve bu yöntemle üretilen bir AR-GE laboratuvarı görülmektedir.



**Şekil 10.** CyBe firmasına ait mobil 3D Printer cihazı ve firma tarafından yapılan 3D Dubai Ar-Ge Laboratuvarı (Anonymous 2020d)

CyBe harcı, 3D baskı betonu için özel olarak tasarlanmıştır ve Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında çok üstün özelliklere sahiptir. Harç, ekstrüzyondan beş dakika sonra,

sonraki katın herhangi bir çökme meydana gelmeden üste yerleştirilmesini mümkün kılar ve yerleştirme işleminden bir saat sonra yapısal mukavemeti sağlar. 28 günlük kür süresine sahip geleneksel beton harcına kıyasla 3D baskı beton harcının kür süresi 24 saattir. Bu hızlı dehidrasyon süresi, duvarın 24 saat sonra sıva ile bitmesini sağlar ve bu da projenin bitiş süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır.

TU Eindhoven: Hollanda' daki Eindhoven Teknoloji Üniversitesi' ndeki 3D Concrete Printing (3D CP) tesisi ilgili alanda çok sayıda araştırma yapmıştır. Son zamanlarda 3D beton için katkı maddesi üretimi konusunda çalışmalar yürütmektedir. 3DCP' nin büyük ölçekli inşaat projelerinde kullanılmasının önündeki en büyük engelin, betonun extrudability (ekstrüde edilebilirlik) ve buildability (üst üste taşınilabilirlik) özellikleri olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, open time (çalışılabilirlik süresi), extrudability, rapid hardening (hızlı sertleşme) ve beton katmanları arasında temas gibi 3D baskı betonun sahip olması gereken özellikler konusunda çalışmalar yürütülmektedir.



**Şekil 11.** TU Eindhoven üniversitesi 3D beton yazıcı cihazı ve dünyanın ilk ticari 3D beton baskı ev projesi (Anonymous 2020e).

iii) Rusya' dan örnekler:

Apis Cor: Apis Cor ve PIK şirketleri, Aralık 2016' da başarıyla tamamlanan bir araştırma projesi olarak Moskova bölgesi Stupino kasabasında 3D baskı teknolojisi ile türünün ilk örneği olan evler inşa etmişlerdir. Apis Cor, tüm evin 24 saat makine baskı süresi içerisinde inşa edildiğini belirtmiştir. Şirket 38 metrekare alana sahip yapıda yazıcının eksi 35 °C dereceye varan sıcaklıklarda çalışabileceğini göstermiştir. Kullandıkları yazıcının tasarımı, yazıcının hem içinde hem de dışında baskı işlemini gerçekleştirmesini sağlayan, bir kule vinç gibidir. Şekil 12' de üretilen evin üretim aşaması, iç ve dış görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 12.** Apis Cor şirketi tarafından Rusyada üretilen 3D beton baskı ev (Anonymous 2020f).

iv) Amerika' dan örnekler:

Amerikalı müteahhit Andrey Rudenko tarafından Minnesota' da kurulan TotalKustom şirketi, CC yöntemine benzer ancak ona göre çok daha küçük bir tabaka (5 mm) yüksekliğine sahip yapılar basabilmektedir. Şirket, Çin menşeli Winsun şirketinin aksine, küçük bir zaman diliminde inşa edilen ucuz bir evin doğru bir uygulama olmadığını savunmaktadır. Daha hızlı üretilen ve daha ucuz binalardan ziyade daha uzun sürecek ama kaliteli evlerin inşası ile inşaat sürecine sıhhi tesisat, yalıtım ve elektriksel unsurların dahil edilmesinin daha faydalı olacağını belirtmişlerdir (Anonim 2019i). Bu düşüncelerinden hareketle Rudenko yazıcı boyutunu yükseltmiş ve çok çeşitli hedefleri olan TotalKustom şirketini kurmuştur. Şirket sıfır enerji ile evler, tarihi eserlerin kopyalarını, 3D baskı beton evlerden oluşan yerleşkeler üretmeyi ve hatta Ay' da inşaat sektörü için bir 3D yazıcı geliştirmeyi amaçlamaktadır. (Kreiger *et al.* 2015). Rudenko, tekniğinin potansiyelini 3D olarak, arka bahçesinde ölçekli bir model şato inşa ederek göstermiştir. Şekil 13' de gösterilen 'Serbest biçimli' kule bileşenleri yerde basıldıktan sonra kalenin duvarlarının üst kısmına kaldırılmıştır, ancak Rudenko gelecekteki tüm binaları tek seferde yazdırmayı hedeflemektedir.



**Şekil 13.** TotalKustom tarafından yapılan 3D baskılı oyun şatosu (Anonymous 2020g)

Massachusetts Institute of Technology (MIT) (Massachusetts Teknoloji Enstitüsü) araştırmacıları, tüm binanın temel yapısını 3 boyutlu olarak basabilecek bir sistem tasarlamışlardır. Sistem, ucunda daha küçük, hassas hareket eden bir robot kol bulunan büyük bir endüstriyel robot kol taşıyan paletli bir araçtan oluşmaktadır. Robotik baskı makinesi hem

yapısal duvarlar için beton kalıbı hem de ısı yalıtım katmanı olarak ikiye ayrılan ve hızlı kürleşen köpüksü bir beton malzeme çıkarmaktadır. Bu teknik hız, özel geometri ve maliyet gibi geleneksel yapım yöntemlerine göre birçok fayda sağlamaktadır. Ayrıca kablolama ve sıhhi tesisat gibi bina yardımcı programlarının doğrudan entegrasyonu baskı sürecine dâhil edilebilir niteliktedir. Bu robotik bu 3D baskı sistemi ile 50 metreye 12 metre boyutlarında bir kubbenin duvarlarını 14 saatten daha kısa bir sürede inşa etmişlerdir. MIT laboratuvarı ve The Mediated Matter Group (MMG), 3D yapıların tasarlanması ve inşa edilmesi üzerinde ortak ekip çalışmaları yapmaktadır. İç kirişler veya pencereler için elemanlar oluşturmak ve yapının kendisini ve yapının dış yüzeyini inşa etmek için 3D baskı tekniğini kullanmaktadırlar. Ekip tarafından 3D duvarları oluşturmak için betonla doldurulmuş poliüretan içi boş köpük bloğu yazdırılmıştır. Malzemenin 30 saniye içinde sertleştiğini ve testin 14 saat içinde tamamlandığını belirtmişlerdir. Gelecekte bu dijital platform için çeşitli olasılıklar olduğunu ve bu tekniğin Mars' ta inşaat sektöründe işe yarayabileceğini vurgulamışlardır. Şekil 14' de MIT' nin kullandığı 3D beton baskı tekniği görülmektedir (Anonymous 2020h).



**Şekil 14.** MIT' de genişletilebilir köpük kullanılarak üretilen çerçevesiz 3D baskı modeli (Anonymous 2020h)

Diğer taraftan, D-Shape'e benzer bir teknik Rael San Fratello Architects'in iştiraki Emerging Objects (EO) tarafından uygulanmaktadır. EO, karışımın çalışabilirliğini geliştirmek için yapıştırıcılar uygulayarak, küçük boyutlu agregalara sahip, elyaf takviyeli bir çimento karışımı kullanmaktadır. Bu baskı yönteminde, yüksek yapışkanlık ve karıştırma özelliklerine ve yüksek gerilme mukavemetine sahip suda çözünür bir sentetik polimer olan alkol bazlı bir bağlayıcı kullanılmaktadır. Bu da karışımın daha hızlı kürlenmesine yardımcı olacak ve daha yoğun olmasına ve daha fazla bükülme mukavemetine sahip olmasını sağlamaktadır. Malzemeyi daha da güçlendirmek için ikincil bir bağlayıcı eklenir, bu bağlayıcı hem malzemeyi nemlendirir, hem de elyafları beton karışımına birleştirir. Sonuç, 3D yazıcıyla üretilen hibrit bir beton polimeri olmuştur. Emerging Object şirketi, Nesnel tekniğini kullanarak çeşitli yapı bileşenleri basmıştır. Örneğin, bir depremin dinamik kuvvetlerini, kolonun kenetleme bileşenlerine taşıyan çimento polimerinden Quake Column'u (Deprem Kolonu) ve suyu emen ve havanın bir odayı pasif olarak soğutması için çukur geçişine izin veren seramik Cool Brick'i (Soğuk Tuğla) üretmişlerdir (Şekil 15). Bu şekiller Dini' nin D-shape tekniğine benzer bir

teknikle üretilmekte olup kullanılmayan kuru toz, baskı işlemi sırasında destek yapısı olarak işlev görür ve daha sonra geri dönüştürülebilir (Rael and San Fratello 2011).



**Şekil 15.** Emerging Objects tarafından üretilen Bloom (a), Cabin of 3D Printed Curiosities (3D baskı kabin) (b), (b) resmindeki kabinin bitki tutucu seramik kısımlarını gösteren detayı (c), Shed (kulube)(d), (d) resmindeki kulubenin cephe ve çatıda yeşil bir duvar oluşturmak için bitki örtüsünün büyümesine uyum sağlayacak şekilde uyarlanmasının gösterimi (e).Quake Column (f) (Anonymous 2020i)

v) İtalya'dan örnek uygulamalar:

World's Advanced Saving Project (WASP), az gelişmiş ülkelerde 3D baskı betondan barınak yapmayı amaçlayan İtalyan şirketi, farklı ölçekli ev modellerini basarak gösterdiği yazıcılarını satmayı amaçlamaktadır. Elde edilen gelirin ise, ihtiyaç duyulan ülkelerdeki evleri üretmek için kullanılması düşünülmektedir. Büyük yapıları yazdırmak için yerel toprağı kullanabilen 6 metre yüksekliğinde bir yazıcı kullanmaktadırlar (Krassenstein 2014). Şekil 16' da WASP'nin sahadan alınan % 25'lik topraktan (% 30 kil,% 40 silt ve % 30 kum),% 40'ını kıyılmış pirinç samanı,% 25 kum ve % 10 hidrolik kireç kullanarak oluşturduğu bir karışımla, neredeyse sıfır çevresel etkiye sahip, hem enerji hem de iç mekan sağlığı açısından yüksek performanslı olan ev modeli gösterilmiştir. Yönlendirilmiş olan doğal atık malzemelerin kullanımına özel önem veren yeni bir eko-sürdürülebilir mimari model olarak düşünülen bu ev örneği, biyo-iklimsel ve sağlıklı bir bakış açısıyla 3D duvar dökümü tekniği sayesinde birkaç hafta içinde basılmıştır. Hem kışın hem de yazın içinde ılık ve konforlu bir sıcaklık sağladığı için ısıtma veya klima sistemine ihtiyaç duymayan ev geliştirmekte olan üçüncü dünya ülkelerinde yaşayan insanlar için son derece uygundur (Anonymous 2020j). Şekil 16' da WASP



şirketi tarafından bağlayıcı olarak çimento yerine yöresel killi bir karışım kullanılarak üretilen ev ve üretim aşaması gösterilmiştir.



**Şekil 16.** WASP tarafından üretilen 3D baskılı örnek bir ev çalışması olan Gaia (Anonymous 2020j)

vi) Fransa'dan örnek uygulamalar:

Bir Fransız inşaat firması olan Vinci Construction iklim kontrollü stadyumlardan siklonlara ve taşkınlara dayanacak şekilde tasarlanmış köprülere kadar uzanan geniş bir proje portföyüne sahiptir. Şirket, gelişmiş 3D baskılı beton yapılar üretmek için Fransız bir 3D baskı çözümleri sunan XtreeE ile işbirliği yapmıştır. Bu işbirliği sayesinde büyük boyutlu yapıların üretiminde 3D baskı beton sistemi ile profesyonel bir şekilde büyük ve farklı geometrilere ürünler üretilmiştir. Dassault Systems 3D Experience laboratuvarında üretim yapılmaktadır. Bazı etkileyici 3D beton projelere sahip olan Vinci, XtreeE'nin 3D baskı uzmanlığından yararlanarak inşaat endüstrisindeki ileri teknolojiye liderlik etmeyi düşünmektedir. Şekil 17' de Vinci- XtreeE'nin yaptıkları eserler gösterilmektedir.

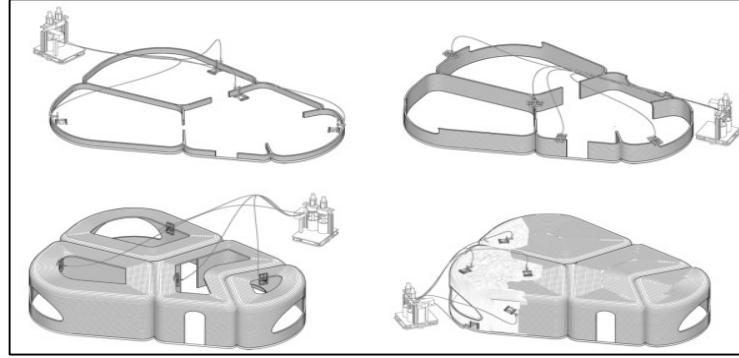


**Şekil 17.** Vinci construction ve XtreeE tarafından üretilen 3D beton eserler (a: 3D Pavilion, b: Post In Aix-En-Provence, c: Yağmursuyu Kollektörü, d: Cirratus Vazosu) (Anonymous 2020k)

vii) İspanya'dan örnekler:

Katalonya İleri Mimarlık Enstitüsü (IAAC), 3D yazıcı teknolojisi ile üretime uygun minyatür basım tekniğini geliştirmiştir. Bu yöntem, herhangi bir boyutta beton yapıları bir arada yazabilen üç küçük robot ailesini kullanmaktadır. Bir veya daha fazla Temel Robot, yapının taban alanını oluşturur, bunu, taban alanına sabitlenen ve daha önce basılan katmanlarla destek

bularak yapıyı genişleten Kavrama Robotları izler. Robotlar yatay baskıya izin vermek için hızlı sertleşme özelliğini kullanırlar ve yukarılara tırmanırlar. Bu şekilde, tavanlar ve pencere/kapı lentoları basılabilir. Son olarak, bir Vakum Robotu basılı yapı üzerinde hareket eder ve ilave katmanlar uygulayarak onu güçlendirir. Bu katmanların paralel olması gerekmez, ancak serbest formda olabilir ve yalnızca yapının gerektirdiği yerde uygulanabilir. Teknik hala gelişme aşamasında olmasına rağmen, basılı elemanların katmanlı oluşumunun neden olduğu anizotropik davranış nedeniyle ortaya çıkan problemlerin giderilmesinde ümit vericidir (Anonymous 2020l). Şekil 18’ de Minibuilders tekniği inşaat adımları gösterilmiştir.



**Şekil 18.** Minibuilders tekniği inşaat adımları (Anonymous 2020l).

viii) Türkiye’ de 3D beton:

Ülkemizde 3D beton çalışmaları henüz başlangıç evresindedir. Öncü çalışma niteliğindeki birkaç uygulama İstanbul Büyükşehir Belediyesi’ ne ait İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları San. Ve Tic. A.Ş. (İSTON) tarafından gerçekleştirilmiştir. İSTON tasarım ve Ar-Ge ekibinin ürünü olan 3D beton baskı teknolojisi ile üretilen kent mobilyaları, “World Cities Congress Istanbul’18” Akıllı Şehirler Fuarı’nda sergilenmiştir. Şekil 19’ da bu ürünlerden bir kaçı gösterilmiştir. İSTON bünyesinde 300×250×200 cm çalışma alanına sahip 3D yazıcı ile 200×100×60 cm ölçülerinde bir ürün yaklaşık 40 dakikada üretilmektedir.



**Şekil 19.** İSTON’ da üretilen 3D beton şehir mobilyaları (Anonim 2020m).

Yukarıda verilen bilgilerden de anlaşılacağı üzere, bir takım dezavantajlarına rağmen, sağladığı olağanüstü imkânlar nedeniyle özellikle gelişmiş ülkelerde dijital beton üretim teknolojisine ciddi bir yönelim söz konusudur. Bu yönelme yalnızca mimarlık ve inşaat sektörü

ile sınırlı olmayıp endüstriyel imalat, tıp ve sağlık, havacılık ve uzay, askeri uygulamalar, tekstil, gıda ve eğitim gibi diğer alanları da kapsamaktadır. Öyle ki, diğer alanlara kıyasla, inşaat endüstrisinde 3D baskının gelişiminin daha geride olduğu söylenebilir. Bu nedenlerden dolayı, sunulan bu doktora tez çalışması gibi, dijital çağın teknolojisi olan dijital beton üretimi üzerinde yapılacak çalışmaların hem ulusal hem de küresel ölçekte bilimsel açıdan ayrı bir önem ve anlam taşıdığı söylenebilir.

### **3D baskı betonu kullanımının getireceği zorluklar ve fırsatlar**

Son yıllarda otomatik tabaka tabaka üretim süreci olan Additive Manufacturing (AM) ve 3D concrete printing teknolojisi inşaat endüstrisinde dikkat çekmeye başlamıştır. AM nin gelişimi inşaat endüstrisinde yeni bir dönem olarak gösterilmektedir. Ancak, 3D baskılamanın inşaat endüstrisinde kullanımı hala gelişim aşamasındadır. Bu sebeple 3D baskılama henüz inşaat endüstrisindeki tüm problemlerin üstesinden gelebilen izole edilmiş (net) bir çözüm değildir. İnşaatta uygulanmasına yönelik birkaç çalışma yapılmış olmasına rağmen baskılama teknolojisinin gelişimini tamamlayarak maksimum potansiyeline ulaşması için çok sayıda ileri araştırmaya ihtiyaç duyulmakta ve tamamlanması gereken birçok eksikliği bulunmaktadır. Bu eksiklikler 3D baskılamanın inşaat endüstrisindeki kullanımını sınırlamaktadır. Öte yandan bu sınırlamaların aşılabilmesi adına teknoloji geliştirildikçe özellikle de robotik alanındaki gelecek gelişmeler ile 3D baskılamanın uygulanabilirliği de genişleyecektir.

Yapılan ilk çalışmalarda 3D baskılama teknolojilerinin büyük ölçekli model veya yapıları oluşturmak için uyumlu olmayabileceği düşünülmüştür (Wu *et al.* 2016). Bu düşünceler teknolojinin başlangıç döneminde çoğu 3D yazıcının küçük boyutlu olmasıyla ikiye katlanmıştır. Öte yandan son yıllarda yeni 3D yazıcıların gelişimiyle Şekil 9-19' dan de görüldüğü üzere bu büyük ölçekli 3D yazıcıları kullanarak baskılanan çok sayıda büyük ölçekli model veya yapılar oluşturulmuştur.

Yazıcıların boyutuna ilave olarak 3D baskılamada malzemeler de çok önemli bir role sahiptir. İnşaat endüstrisinde eklemeli üretim çalışmalarında neredeyse tamamıyla betona odaklanılmıştır. Bu durum uygulamada güncel olarak sahip olunan malzeme paletinin çok sınırlı olmasına neden olmuştur. Malzemelerin 3D baskı malzemesi olarak kullanılabilmesi için hızlı sertleşme gibi bazı temel özelliklere sahip olması gerekmektedir. Güncel baskı malzemeleri kullanılarak üretilen basılı ürünlerin dayanım ve stabilitesinin, teknolojinin büyük ölçekli model ve yapılarda kullanılmasını engelleyebileceğini belirten çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Yüksek dayanımlı baskı malzemesine ulaşılabilirliğin düşük olması da ayrıca 3D baskılamanın büyük ölçekli model ve yapılarda kullanılamayacağı düşüncelerine yol açmıştır. Ama güncel olarak çeşitli malzemeler modifiye edilmiş ve yüksek dayanımlı baskı

malzemeleri gibi etkili oldukları kanıtlanmıştır. İlave olarak, baskılanabilen beton için büyük ölçekli yapılarda hali hazırda kullanılan beton dayanımı kadar dayanım elde edilebilmiştir (Wu *et al.* 2016; De Schutter *et al.* 2018).

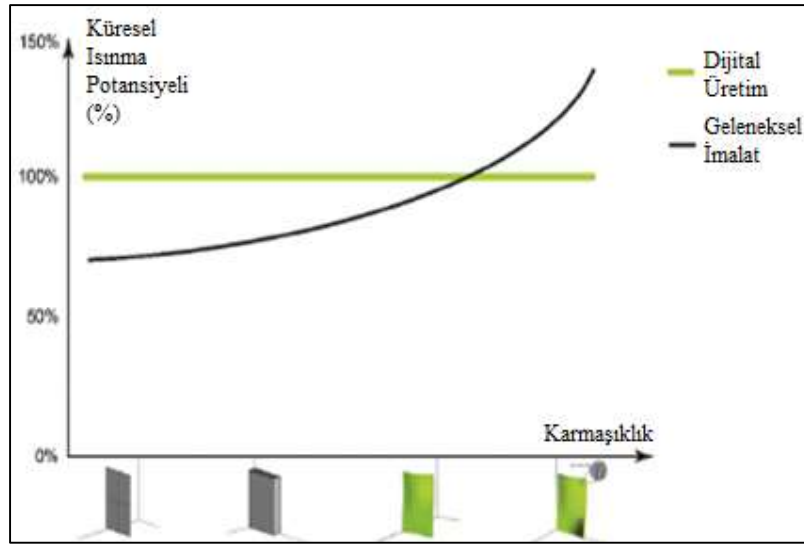
3D baskı malzemelerinin güncel durumuna bakıldığında malzeme özellikleri üzerine hala yeterince odaklanılmadığı görülmektedir (De Schutter *et al.* 2018). Beton üzerine çalışmalar genel olarak ilk dayanım ve uzun dönem dayanımı olmak üzere esas olarak yük dayanım kapasitesi parametresiyle ilgilidir. 3D baskılama teknolojisi için kullanılan malzemeler yük dayanım kapasitesi bakımından incelenmesine rağmen çok nadir olarak yangın dayanımı, durabilite ve termal özellikler bakımından incelenmektedir (Labonnote *et al.* 2016). Malzeme performansı detaylıca kontrol edildiğinde bazı mekanik ve fiziksel özelliklerinde yetersiz performans göstergeleri görülebilmektedir. Yapılan çalışmalardan edinilen bilgilere göre beklenen performansın sağlanabilmesi için uygun bir karışım tasarımı ve etkili kür önlemleri geliştirilmelidir. 3D beton üretimi için bazı gelişmeler olmasına rağmen elde edilen karışımlar sahip oldukları fiziko-kimyasal yapı sebebiyle oldukça hassastırlar. Yani, çimento tipindeki veya agrega doğasındaki bir değişiklik beton karışım tasarımının veya katkı tipinin yeni bir adaptasyonunu gerektirebilir (De Schutter *et al.* 2018). Bunlara ilave olarak, bir baskı malzemesi olarak betonun kullanılması durumunda yazıcının ucundan çıkarılabilmesi için kabul edilebilir derecede ekstrude edilebilmesi gerekir. İlave olarak her bir tabakanın oluşturulabilmesi için beton birbirine bağlanmalı, betonun doğru bir şekilde uzanabilmesi için yeterli inşaa edilebilirlik özelliklerine sahip olmalı, diğer tabakaları çökmeden destekleyebilmesi için yeterince rijit olmalıdır (Wu *et al.* 2016).

3D basılı yapı veya elemanda ardışık tabakalar arasında oluşan arayüzeyler ürünün mekanik performansını, bağ davranışını, taşıma ve durabilite özelliklerini önemli düzeyde etkileyecektir. 3D baskılı betonun anizotropik doğası yapısal ve durabilite tasarımı için güncel yaklaşımları zorlaştırmaktadır. Güncel yapısal ve durabilite tasarım kodları betonu bir homojen malzeme olarak düşünür. Ancak bu durum daha fazla tabakalı yapıya ve daha zayıf arayüze sahip olması ile anizotropik davranışından dolayı 3D baskılı beton elemanlar için geçerli olmayacaktır. Artık yapısal tasarım aşamasında kesme yükü gibi yeni tasarım modelleri gerektiren tabakalı yapının göz önünde bulundurulması gerekecektir (De Schutter *et al.* 2018).

Agustí-Juan *et al.* (2017) yapmış oldukları çalışmada özellikle karmaşık beton geometrilere uygulandığında, dijital imalat yöntemlerinin çevresel etkilerini araştırmayı amaçlamışlardır. Bir duvar yapısına uygulanan yeni bir robotik katkı prosesi Yaşam Döngüsü Analizi (Life Cycle Assessment, LCA) yöntemi ile değerlendirilmiştir. Değerlendirmenin sonuçları, dijital fabrikasyonun karmaşık yapılara uygulandığında çevresel faydalar sağladığını

göstermiştir. Buna göre çevresel değerlendirme sonuçları yüksek derecede karmaşık geometriye sahip yapılar için dijital üretimin geleneksel inşaata göre yüksek çevresel yarar sağladığını söylemek yanlış olmayacaktır. Aşağıdaki Şekil 20’ de görüldüğü gibi dijital üretimin çevreye etkisi, yapının kompleksliğinin artmasıyla değişmemektedir.

Geleneksel inşaat sürecinde ise geometri karmaşıklığı arttıkça daha fazla kaynak kullanımı gerekeceği ve daha fazla inşaat atığının ortaya çıkacağı ayrıca inşaat sürecinin de uzayacağı düşünüldüğünde çevreye etkisinin artacağı açıktır (De Schutter *et al.* 2018). Eklemeli inşaat daha az atık üretmekle beraber sonraki aşamalarında atıkların çoğunu tekrar kullanmak suretiyle geri dönüşümünü yapmaya da olanak vermesiyle çevreyle barışık bir inşaat yöntemidir (Labonnote *et al.* 2016). Yalnızca Şekil 20’ ye bakıldığında kompleks geometrilerin her zaman avantajlı olmadığı düşünülebilir. Ancak, optimizasyon araçları ile elde edilecek yapı geometrisinin karmaşıklığı arttıkça kullanılan malzemeden maksimum performansta yararlanılarak malzeme kullanımı ciddi anlamda azaltılabilecektir. Bu şekilde tasarlanan yapının inşası için de dijital üretim sabit çevresel etki ve maliyet ile geleneksel inşaata göre oldukça avantajlı gözükmektedir (De Schutter *et al.* 2018). Ayrıca eklemeli üretimin insan erişiminin zor, imkânsız ya da tehlikeli olduğu zor çevrelerdeki yapıların inşası için kayda değer yararlar sağlaması beklenmektedir. Bu sayede böyle uygulamalarda stresli iş yükünün azalması ve muhtemel kazaların önüne geçilebileceği düşünülmektedir (Labonnote *et al.* 2016).



**Şekil 20.** Dijital üretim ile geleneksel inşaat arasındaki karmaşıklıkla ilgili çevresel avantaj. Çevresel etki, m<sup>2</sup> beton duvar başına Küresel Isınma Potansiyeli (kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri) yüzdesi ile ifade edilmiştir. (De Schutter *et al.* 2018 “Agustí-Juan *et al.* 2017”).

Kompleks geometrili kalıp kullanımı arttıkça inşaatın zorluğu, kalıbın tasarımı ve üretimi için gerekli zaman ve iş gücü gereksinimi artar bunların bir sonucu olarak toplamda inşaat süreci uzar. Bu teknolojinin kalıp gerektirmemesi, iş gücü ihtiyacını azaltması ve kısa

sürede büyük ölçekli yapıların üretimini mümkün kılması gibi avantajları sayesinde zaman tüketimi ve iş gücü maliyeti önemli ölçüde azaltılabilir (Camacho *et al.* 2018). İlave olarak teknolojinin inşaat süreci ve bileşenlerin yüksek bir şekilde optimize edilmesine olanak tanınması gibi avantajları sayesinde kullanılan malzeme miktarını önemli düzeyde azaltarak yapının ağırlığını ve yapıda kullanılan inşaat malzemelerinin maliyetini de önemli bir şekilde azaltması beklenmektedir (Labonnote *et al.* 2016). Özellikle de kompleks yapıların inşaatında geleneksel yöntemlere göre maliyetin azalması beklenmektedir. Dahası 3D baskılama ile üretilen yapıların maliyetinin yapı kompleksliğinin artışından bağımsız olması beklenmektedir (De Schutter *et al.* 2018).

3D baskılama teknolojisi daima sınırlı kişiselleştirmeye sahip bir endüstri olarak düşünülen inşaat endüstrisine bu anlamda önemli bir yenilik olarak oldukça çok sayıda kişiselleştirme alternatifi sunmaktadır (Wu *et al.* 2016). Bu sayede mimarların hayal gücünü sınırlayan geleneksel yöntemlerin aksine inşaat sektörü çok çeşitli kişiselleştirmelere açılabilir (Labonnote *et al.* 2016; Camacho *et al.* 2018). İnşaat endüstrisinde 3D baskılamanın başarısı iki duruma bağlıdır; müşteri ihtiyacının kendine özgülüğü ve müşteri tarafından istenilenin ne derece karşılanabildiği. Örneğin kore inşaat endüstrisinde son 30 yıldır ev inşaatı sektöründe kütle kişiselleştirme temel pazarlama stratejisidir. Bu anlamda inşaat endüstrisinde müşterinin kütle kişiselleştirmeye isteğinin günümüzde giderek arttığı ve 3D baskılama ile müşteri tarafından istenilen kişiselleştirmenin yüksek oranda karşılanabileceği düşünüldüğünde 3D baskılı üretimle inşaat teknolojisinin başarılı olacağını söylemek zor değildir (Wu *et al.* 2016). Bu sebeplerle yazarlar 3D baskılama teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen inşaat uygulamalarının yakın gelecekte katlanarak artacağı yönündeki düşüncelere katılmaktadır (De Schutter *et al.* 2018).

Ayrıca geleneksel yöntemlerle standart inşaat prosedürleri kullanılarak oluşturulması zor ve pahalı olan karmaşık geometriye sahip bir yapı 3D baskılama teknolojisi sayesinde kolaylıkla üretilebilir (Labonnote *et al.* 2016; Camacho *et al.* 2018). 3D baskılama teknolojisi yüksekle muhtemeldir ki sadece birkaç yıl önce teknolojik ve ekonomik olarak mümkün olmayan yenilikçi inşaatların gelişimini hızlandıracaktır (Labonnote *et al.* 2016). Bu, 3D baskılama teknolojisinin inşaat sektöründeki potansiyelini maksimize edecek ve onun yararlarını ortaya çıkaracak olan yeni yapısal formların araştırılması ihtiyacını günyüzüne çıkarmaktadır (Camacho *et al.* 2018). Bu durum, malzeme sarfiyatını ve çevresel etkiyi azaltma, estetik görünüm elde etme, tasarım serbestliği gibi birçok avantajlar getirmesine rağmen inşaatların aynı mekanik kurallara uyması gerektiği de unutulmamalı mevcut inşaat kodları tarafından beklenen güvenlik ve güvenilirlik seviyeleri sağlanmalıdır. Yöntem daha fazla

yenilikçi tasarıma cesaretlendirecek ama bu tasarımlar daha da fazla mantıklı olmak zorunda olacaktır (Labonnote *et al.* 2016; Camacho *et al.* 2018).

### **Çalışmanın Hipotezi**

Bu tez çalışmasının hipotezi şudur: Dijital üretimli çimento esaslı kompozitlerde eklemeli imalat ve vibrasyonsuz yerleştirmenin doğal sonucu olarak tabakalar arasında soğuk derz oluşması ihtimali söz konusudur. Bu derzli yapı, ana kütle içerisinde boşluk yapısı bakımından birbirinden farklı bölgelerin meydana gelmesine neden olabilir. Diğer taraftan, hava sürükleyici katkı maddesinin betonun donma-çözülme direncini artırdığı beton teknolojisinde bilinen bir husustur. Ancak;

i- Bu katkı maddesi, derzli yapısı nedeniyle, ana kütle içerisinde boşluk yapısı bakımından birbirinden farklı bölgeler barındıran 3D betonların donma-çözülme direnci üzerinde geleneksel betonlardaki ile aynı sonucu vermeyebilir.

ii- Yine farklı boşluk yapısı nedeniyle 3D betonların mühendislik özellikleri yöne bağlı değişebilir.

### **Tezin Amaçları**

Çalışmanın amaçları ve bu amaçlar doğrultusunda belirlenen hedefleri aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir:

1. Katmanlı üretim nedeniyle 3D betonu oluşturan tabakalar arasında soğuk derz oluşması, aderans kaybına ve ana kütlede boşluk yapıları birbirinden farklı hatların oluşmasına yol açacaktır. 3D betonlarındaki bu boşluklu yapı, beton özelliklerinin anizotrop olmasına neden olacaktır. Diğer taraftan, başta donma-çözülme direnci olmak üzere, betonun hemen hemen tüm mühendislik özellikleri onun boşluk yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle betonların boşluk yapılarının incelenmesini amaçlayan çalışmalar beton teknolojisinde ayrı bir önem taşımaktadır. Bu çalışmada, döküm yönünde ve döküm yönüne dik olarak alınacak karot numuneler üzerinden 3D betonların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri ile boşluk yapılarının incelenmesi planlanmıştır. Bu sayede 3D betonların içyapılarının daha iyi tanınması amaçlanmış olup literatürde bulunan boşlukların giderilmesine katkı sunulması hedeflenmiştir.

2. 3D baskı betonun yaygın kullanım alanlarından biri de, değişik mimari tasarımlara imkân vermesinden dolayı, şehir mobilyalarıdır (banklar, çiçeklikler, çöp kutuları, bisiklet parkları vb.). Şehir mobilyaları ise genellikle açık alanlarda bulunduğundan tahrip edici çevresel etkilere maruzdurlar. Özellikle soğuk iklime sahip bölgelerde donma-çözülme (D-Ç) etkisi altında kalacak olan 3D beton ürünlerin ciddi düzeyde hasara uğraması hatta tamamen

tahrip olması söz konusudur. Nitekim 3D beton elemanların servis koşullarını gösteren bir kaç resim Şekil 21’ de verilmiştir. Bu çalışma ile donma-çözülme direnci yüksek 3D beton elemanların üretilmesi hedeflenmektedir. 3D beton elemanların donma-çözülme direncinin araştırıldığı çalışma sayısı ise son derece sınırlıdır. Öyle ki, yapılan literatür araştırmasında yalnızca iki makaleye (Tian and Han 2018; Lu *et al.* 2019) rastlanmıştır. Bu çalışmalardan birinde hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmamış ve yalnızca  $> 0.1\text{mm}$  boşluklar incelenmiş diğerinde ise spreylü 3D beton çalışması yapılmış ve hava sürükleyici katkının 3D betonun reolojik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada ise farklı beton bileşenlerine ve karışım hesabına sahip hava sürükleyici katkı maddesi içeren 3D betonların donma-çözülme direnci araştırılacak olup betondaki tüm erişilebilir boşlukların boşluk-boyut dağılımı incelenecektir.



**Şekil 21.** Tez kapsamında üretilmesi planlanan A şeklindeki 3D beton ürün ve maruz kalması muhtemel çevresel şartlar (Atatürk Üniversitesi Yerleşkesi / Erzurum).

3. 3D beton yazıcılarla üretilen ürünlerin mekanik ve fiziko-kimyasal etkiler altındaki davranışları üzerine dünya genelinde temel araştırmalar devam etmektedir. Fakat henüz yetersiz seviyelerdedir ve herhangi bir ülke ya da kuruluş tarafından bir standart belirlenmemiştir (Sadece ASTM tarafından kavramsal içerikli bir standart yayınlanmıştır: ASTM F2792-12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (Anonymous 2012)). Bu tez çalışması ile hem dünya çapında 3D baskı beton üzerinde yapılacak çalışmalara derinlik kazandırmak hem de, ülkemiz de dâhil, konu üzerine standart geliştirme çabalarına katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Nitekim hava sürükleyici katkıların 3D betonlarda don direncini artırmak için kullanılabilirliği henüz yeterince araştırılmamış olup bu konuda literatürde boşluk bulunmaktadır. Diğer taraftan, literatürde açıkça farklı doğrultularda karot numunesi alınmak suretiyle 3D betonun özelliklerinin incelendiğinin belirtildiği bir çalışmaya da rastlanılmamıştır. Bu çalışma ile karotla ilgili sunulacak olan bir takım teknik bilgiler/önerilerin (karot alım yönü gibi) uygulamaya yönelik hazırlanacak olan teknik dokümanlarda (standart vb.) veri olarak kullanılması söz konusudur.

4. Birkaç öncü üniversite ile dünya çapında farklı firmaların yapmış oldukları bir takım çalışmalara rağmen, yapı endüstrisi 3D katmanlı (eklemeli) üretim tekniğinin geliştirilmesinde



ve uygulamasında henüz tam anlamıyla istenilen düzeye ulaşamamıştır. Bununla birlikte, geleceğin beton teknolojisi olarak tanımlanan 3D betonuna olan ilgi/yönelim, geleneksel betona göre avantaj sağlayan üstün özellikleri nedeniyle, dünya genelinde hızla artmaktadır. Ülkemizde ise bu konudaki çalışmalar yok denecek kadar az olup 3D betonun yaygın kullanımına da henüz geçilememiştir. Bu tez çalışması ile 3D yazıcısı vasıtasıyla gerçek (1/1) ölçekli 3D baskı beton elemanlar üretilmesi ve bu elemanları oluşturan betonların mühendislik özelliklerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmanın hedeflerinden biri de, farkındalık oluşturmak suretiyle, 3D betonun ulusal ölçekte tanınabilirliğini ve kullanımının yaygınlaşmasını sağlamaktır.

## KURAMSAL TEMELLER

3D beton ve betonun donma-çözülme mekanizması ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir.

### 3D Baskı için Beton Gereksinimleri

Beton harcının 3D yazıcıda kullanılabilmesi için reolojisinin dikkatlice kontrol edilmesi gereklidir. 3D beton yapısal elemanları üretmek için kademe kademe döküldüğünden bir nozuldan ekstrüde edilebilecek (pompalanabilir) kıvamda olmalı ve baskı işlemi boyunca sıkılabilir ve şekil alabilir olmalıdır. Daha önce bahsedildiği gibi 3D beton yazdırma işlemi, geleneksel beton üretim yöntemlerinden farklı olarak, kalıplama yapılmadan inşa edebilen yeni bir dijital kontrollü beton üretim yöntemidir. Yapılan çalışmalar, bu betonda en kritik taze beton özelliklerinin, ekstrüde edilebilirlik (extrudability), pompalanabilirlik (pumpability), üst üste taşıtabilirlik (inşa edilebilirlik=buildability) ile bu özelliklerle ilişkili olan işlenebilirlik (workability) ve baskı alınabilirlik süresi (open time) olduğunu göstermiştir. Ayrıca üretilen beton harç katman katman basıldığında şeklini koruması ve üst tabakaları tutması gereklidir. Tabakalar arası yapışkanlığı korumalı, beton yapı inşasının dayanıklılığı maksimum olmalıdır.

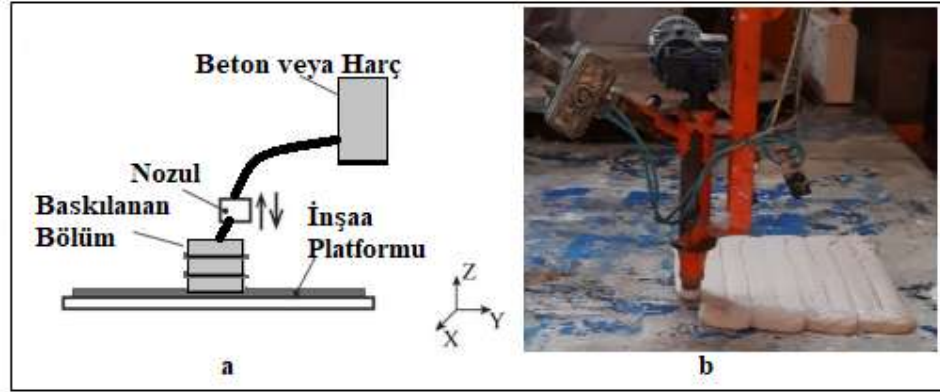
3D betonun bu özellikleri, kullanılan temel bileşen malzemeleri ve katkı malzemeleri (süperakışkanlaştırıcı, priz geciktirici, priz hızlandırıcı ve elyaflar vb) ile karışım hesaplarıyla belirlenebilmektedir.

### Ekstrüde edilebilirlik (Extrudability)

Ekstrüzyon işlemi betonun, beton pompasından, iletim hortumlarından ve püskürtücü nozuldan fiziksel özellikleri değişmeden geçme kabiliyetidir. Betonun işlenebilirliğinin göstergesi olan ekstrüzyonun, karışım oranlarından (bağlayıcı/agrega oranı, su/bağlayıcı oranı, katkı kullanımı, lif miktarı) etkilendiği ifade edilmiştir. İyi ekstrüde edilebilirlik, kendiliğinden yerleşen beton ve püskürtme beton ilkelerinin karışım tasarımına birlikte uygulanmasıyla elde edilmektedir (Le *et al.* 2012a).

Beton, yazıcıdan üst üste katmanlar halinde dökülebilmesi için akıcı kıvamda olmalıdır. 3D yazıcı sistemlerin baskı hızının, betonun kıvamına ve baskı alınabilirlik süresine (open time) göre ayarlanabileceği belirtilmiştir. Yapının çokça mimari detayı varsa, baskı hızı buna uygun olarak ayarlanmalıdır. Böylece sistem ekstrüzyon malzemesini boşa harcamaz ve beton baskılı malzemenin kalitesi kusursuz olur. Baskı sırasında betonun aşırı birikmesi, zayıf yüzey kaplamasına neden olmaktadır (Nadarajah 2018). 3D yazıcı teknolojisinde taze beton bir partikül akımı olarak sistemden çıkmaktadır. Bu beton özeliğini değerlendirmek için uygun bir

deney yöntemi henüz tanımlanmamıştır. Ekstrüzyon işleminin şematik gösterimi ve nozuldan ekstrüde edilen 3D baskılanabilir beton görüntüsü Şekil 22’ de verilmiştir.



**Şekil 22.** (a) Ekstrüzyon tabanlı 3D baskı işleminin şematik gösterimi, (b) tez kapsamında üretilen 3D betonların ekstrüde edilmesi.

### **İnşa edilebilirlik (Buildability)**

İnşa edilebilirlik; bir sonraki beton katmanı basılmış katmanın üzerine yerleştirilmeden önce, alttaki beton tabakasının sertleşerek diğer tabakaları taşıyabilme kapasitesine ulaşması olarak tanımlanabilmektedir. Böylece betonun her katının üzerine inşa edilebilmesi için uygun bir platform sağlanmış olur. Ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik 3D betonun en önemli özellikleridir. Her iki gereklilik de betonun işlenebilirliği ile ilişkilidir. Bos (2016), ekstrüzyondan sonra hızlı bir şekilde ayarlanabilen ve üst üste katmanlar halinde inşa edilebilen, kimyasal katkılarına sahip, çökme yapmayan betonun 3D beton için en uygun özellikler olacağını belirtmiştir. Le *et al.* (2012a) ise 3D kademeli üretim yönteminde, alt tabakaların üst tabakanın ağırlığıyla şekil değiştirmemesi, aynı zamanda alt katmanın tabakalar arası aderans oluşabilmesi için üst katmanlarla iyi bir şekilde bağlanması gerektiğini belirtmişlerdir. İnşa edilebilirlik, başlangıçtaki işlenebilirliğe ve çalışılabilirlik süresine bağlıdır. Ayrıca iyi bir ekstrüde edilebilirlik ve sürekli bir akış hızını korumak için uygun işlenebilirlik ve uzun bir çalışılabilirlik süresi gerekmektedir. Dolayısıyla 3D betonun, bu ikilemi çözen optimum beton özelliklerine sahip olması gerekmektedir. İşlenebilirlik süresi kısa olursa malzeme sertleşecek, betonun akış hızı ve baskı hızı yavaşlayarak iletim hortumunda tıkanmaya (blokaj) neden olacaktır. Uzun bir işlenebilirlik durumu ise tabakaların daha fazla yayılmasına yani deforme olmasına sebep olacaktır (Le *et al.* 2012a). 3D betonların buildability özelliğinin değerlendirilmesine dair resimler Şekil 23’ de verilmiştir.



**Şekil 23.** (a) yeterli inşa edilebilirlik özelliği göstermesi için 10 dakika içinde 10 kat baskılı tabaka dökülmesi uygundur (Bao *et al.* 2018), (b) tez kapsamında üretilen 3D betonun inşa edilebilirlik özelliğinin gerçekleşmesi.

İlk beton katmanının bir sonraki katmana basılmadan önce sertleşmesi, yapının inşa edilebilirlik özelliği için hayati bir gerekliliktir. 3D baskıda naylon veya diğer plastik gibi sentetik malzemeler kullanıldığında, bir sonraki tabaka basılmadan önce birinci katı sertleştirmek için ultra viyole ışığı kullanılabilir. Betonun hızlı bir şekilde sertleşmesi ise aşağıdaki etmenlerin katkısıyla sağlanabilir (Nadarajah 2018):

*i-Kimyasal katkılar:* Betonun 3D baskı koşullarına uyum sağlaması için karışımına çeşitli miktarlarda priz hızlandırıcı ve geciktirici gibi kimyasal katkılar eklenebilir. Geciktiriciler, betonun kıvamını korumak için betonun karıştırıldığı sırada eklenebilirken, hızlandırıcılar ise beton baskı alanına ulaştıktan sonra, betonun hızlı bir şekilde sertleşmesini sağlamak için basılırken ya da baskıya başlamadan hemen önce karışıma eklenebilir.

*ii- Sıcaklık:* 3D baskı betonu için ideal bir sıcaklık ortamının sağlanması, doğrudan betonun hidratasyon işlemine başlaması ve baskı işlemi sırasında beton katmanlarının erken dayanım kazanması için çok önemlidir.

*iii- Daha erken priz yapan çimento kullanılması:* Çimentoda normalde kullanılan alçı taşı, çimento kütleinin % 3-5' i kadardır. Alçıtaşı minimum miktardan (% 3) daha az içeren bir çimento türü tercih edilirse, betonun hidratasyon süreci hızlanacaktır. Beton, 3D basılacak yapıyı oluştururken katmanlar daha hızlı sertleşerek iyi ve sert bir temel elde edilmiş olacaktır. Aynı durum çimentodaki  $C_3A$  miktarı için de geçerlidir. Yine normalden daha fazla  $C_3A$  içeren bir çimento türü tercih edilerek çimentonun daha erken hidratasyona başlaması sağlanabilir.

*iv-Tabakalar arası aderansın artırılması:* Betonun üst üste yerleştirilmesinde, katı bir yapı elde etmek için tabakalar arası aderansın kuvvetli olması gerekmektedir. Bu nedenle beton sertleşmiş durumda olmamalıdır, bunun yerine beton önceki katın yüzeyine yerleştirildiğinde betonun hidratasyonu devam etmelidir. Yani arada soğuk derz oluşmamalıdır. Bunu sağlamak için bazı araştırmacılar katmanların şeklinin önemini vurgulamışlardır. Yani düz şekilde dökmek yerine girintili çıkıntılı olarak dökmek aradaki aderansı arttıracaktır. Ayrıca nozulun

şekli de önemlidir. Nozul şekli daireselden ziyade kare veya dikdörtgen tercih edilerek yapının stabilitesini sağlamak için adersans bir miktar daha arttırılmış olur. Kare ve dikdörtgen şeklindeki nozulların, keskin köşeleri olması hasebiyle daha düzenli baskı yapılabilmesini sağladığından, baskı için daha kararlı ve güvenilir şekiller ortaya çıkardığı kanıtlanmıştır.

*v-Agregalar:* Agregalar, 3D beton sürecinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Nozul ebatları, 20 mm ile 40 mm arasında değişiklik göstermektedir. Buna göre, agrega boyutlarının nozulun tıkanmaması için 4 - 6 mm'den daha büyük olması tercih edilmez. Daha büyük boyutlu agregaların kullanılması, baskı yapısında kararsızlığa neden olarak yapı oluşumunun çökmesine neden olur. Birçok araştırmacı, çoğu zaman kaba agregalar yerine ince agregalar önermektedir. İri agregaların beton yüzeyinde kaba görüntülere sebep olacağı açıktır bu da basılı yapının estetik kaygısında istenmeyen bir durum oluşturur.

Nadarajah (2018)'in yukarıdaki tespitlerine karşılık Bos *et al.* (2016) ise iri agrega boyutlarının 4 ila 16 mm arasında değişebileceğini, 16 mm'lik agrega boyutunun aşılması durumunda agregaların nozul içinden dışarı atılmaya uygun olmayabileceğini ve bitmiş betonun kötü bir dokuya sahip olabileceğini belirtmiştir. Dahası, araştırmacılar, basılan katmanlarda maksimum kalınlık istenmesi durumunda agrega boyutunun 20 mm' ye kadar seçilebileceğini bildirmişlerdir.

*vi- Su/Çimento oranı:* Su/Çimento oranı çeşitli araştırmacılar tarafından 0,25-0,44 arasındaki oranlarda denenmiş ve süper akışkanlaştırıcılarla en az miktarda su oranının kullanılmasının, betonun daha iyi yapışabilir özelliklere sahip olması için önemli olduğu belirtilmiştir.

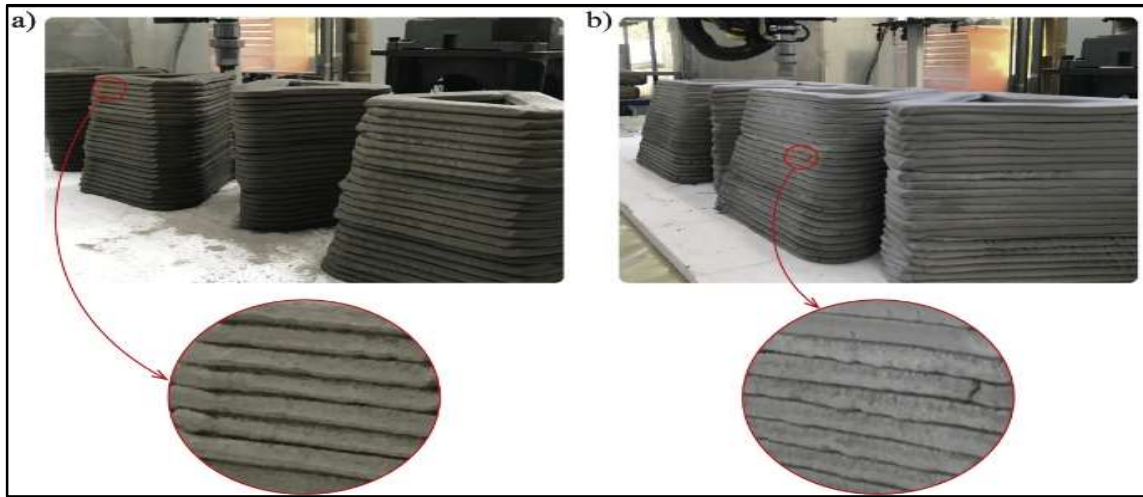
*vii- Puzolanik katkı:* Yapılan literatür taramasında toplam bağlayıcı hacminin %5-30'u miktarınca karışıma uçucu kül, silis dumanı ve cüruf gibi puzolanik malzemelerin eklenmesinin fayda sağladığı tespit edilmiştir.

3D betonunun malzeme bileşimi ve özellikleri hakkında henüz çok az şey yayınlanmıştır. Ancak bilinen bir gerçek vardır ki 3D beton, tabaka-tabaka yapısal bileşenleri oluşturmak için bir nozuldan ekstrüde edilecek (pompanabilir) şekilde tasarlanmalıdır. Bu karışımın işlenebilirliği arttırmak için bir plastikleştirici gerektirdiği ve nozul çapından rahatlıkla akabilmesi için küçük parçacık boyutlarına sahip malzeme kullanılması gerektiği sonucu ortaya çıkmaktadır.

### **İşlenebilirlik (Workability)**

Gerçek ölçekli uygulamalarda, 3D baskı betonunun işlenebilirliği, çevresel koşullardaki küçük değişikliklerden (sıcaklık, ortam nemi, hammadde nemi vb.) etkilenmektedir

(Papachristoforou *et al.* 2018). 3D beton karışımının işlenebilirliğini arttırmak için bir plastikleştirici eklenmeli ve nozul çapına uyması için karışım küçük parçacık boyutuna sahip olmalıdır. 3D betonun pompalanabilirlik ve ekstrüde edilebilirlik için işlenebilirliğinin ayarlanması, özel beton türü olan püskürtme betonun ıslak işlem üretimi ile benzerdir (Lim *et al.* 2011). Viskozite düzenleyici katkıların 3D beton baskıda kullanılması elzemdir. Çünkü bu katkılar betona, tiksotropik özellik katarak reolojisini değiştirmektedir. Böylece, betonun viskozitesi güç uygulandığında azalmakta, betona rahat işlenebilme ve iyi bir pompalanabilme sağlamakta, güç uygulanması durduğunda viskozite artmakta, böylece betonda iyi bir kayma direnci oluşmaktadır. Betonun çalışılabilirlik süresi uzatılırken kayma dayanımının artırılması temel ilkelerinden birisidir. Bu amaçla, karışıma ilave edilen katkılar betonun viskozitesini arttırmadan betona kaymayı önleyici özellik katarak kayma dayanımını arttırmaktadır. Viskozite düzenleyici katkının başlıca işlevi betonun kayma dayanımını artırmak ve üst üste eklenen beton tabakaların kaymasını önlemektir. Böylece, çalışılabilirlik süresi de artmaktadır (Özalp vd. 2018; Pekmezci ve Atahan 2014). Şekil 24’ de işlenebilirliği güçlü ve zayıf olan 3D beton karışımlarının baskılanabilirlik kaliteleri gösterilmiştir.



**Şekil 24.** 40 mm × 10 mm dikdörtgen nozulla ekstrüzyon işlemi sırasında a) yırtılma belirtisi olmayan kaliteli beton tabakalar, b) işlenebilirliğin zayıf olmasından kaynaklanan ekstrüzyon sırasında yırtılma belirtileri olan beton tabakalar (Buswell *et al.* 2018)

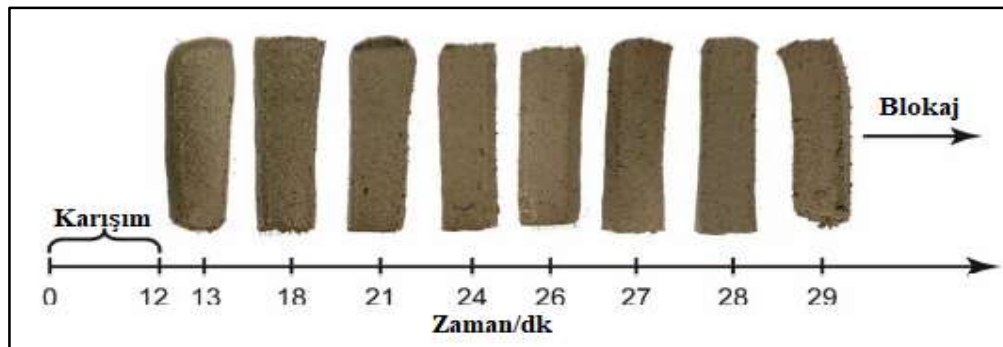
İşlenebilirliği değerlendiren geleneksel yöntemler çökme, sıkıştırma faktörü ve akış testlerini içermektedir. Ancak, bunlar temel fiziksel özellikleri ölçmekte yeterli değildir. Basit ve kolay şekilde uygulanabilir bir deney yöntemi olan çökme deneyi çok yaygın olarak taze betonun kıvamını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Ancak, çökme deneyi betonun reolojik değişkenlerinden sadece kayma dayanımı ile korelasyon göstermekte, beton için önemli ikinci reolojik değişken olan plastik viskozite hakkında bilgi vermemektedir. Tek değişkenle ilişkili bu deney “tek noktalı deney” olarak ifade edilmektedir (Özalp vd. 2018). Alternatif bir yaklaşım olarak, betonun akışkan davranışını, kayma dayanımı ve plastik viskozitesi açısından

karakterize edebilen “iki noktalı deney” daha iyi bir reolojik değer vermektedir. Bingham sıvısı davranış modelini, kayma mukavemeti ve tork viskozitesi açısından karakterize edebilen bu iki noktalı deney daha sağlam bir reolojik sonuç verebilmektedir (Le *et al.* 2012a).

### **Baskı alınabilirlik süresi (open time)**

Baskı alınabilirlik süresi, 3D beton için taze betonun ekstrüde edilebilirliğini koruyacak düzeyde olduğu zaman dilimi olarak tarif edilebilir (Le *et al.* 2012a). Bu süre, 3D betonun pompalanabilirlik ve inşa edilebilirlik özelliklerinin kabul edilebilir toleranslar dâhilinde geçerli olduğu süredir.

Çimento esaslı malzemelerin baskı alınabilirlik süresi, genellikle bir Vicat aparatı ile ölçülen, priz süresi ile ilişkilidir. Bu ekipman prize başlama ve bitiş zamanını belirlemek için tasarlanmış olup taze betonun zamanla işlenebilirlik değişiminin karakterize edilmesinde kullanılmaz. İşlenebilirliğin zamanla değişimini çökme testi kullanarak izlemek için çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Ancak baskı alınabilirlik süresini belirlemek için yalnızca çökme testinin yapılması uygun değildir. Kayma kuvvetinin zamanla değişiminin ölçülmesi, işlenebilirliğin ölçülmesi açısından daha bilgilendirici sonuçlar vermektedir. Baskı alınabilirlik süresini belirlemek için taze betonun işlenebilirliği, Kanatlı Kesme Deneyi (Shear Vane) yapılarak her 15 dakikada bir ölçülebilir. Ayrıca, 3D yazıcı tekniği ile üretilen betonun kaymasını engellemek ve baskı alınabilirlik süresini uzatarak verimi arttırmak için reoloji düzenleyici, kıvamı ayarlayan katkıların kullanılması gerekmektedir. Bu katkılar da betonun kaymasını yüksek oranda önlemektedir. Betonda su tutma özelliği olan kıvam ayarlayıcı kimyasalların kullanılması ile harç içerisindeki belirli bir miktar su, arzu edilen bir süre için kimyasalın bünyesinde hapsedilmekte böylece harcın çalışma süresinin ayarlanabilmesine imkân sağlanmaktadır. Özellikle baskı alınabilirlik süresinin artırılmasında betonun reolojisini düzenleyen bu katkılar gereklidir (Özalp vd. 2018). Şekil 25’ de zaman geçtikçe ekstrüde edilen tabakalarda meydana gelen değişim gösterilmiştir.



**Şekil 25.** Zaman geçtikçe ekstrüde işleminde meydana gelen değişim (Bong *et al.* 2018)

### 3D beton için literatür araştırması

3D beton ile ilgili literatüre her geçen gün yeni bir çalışma eklenmektedir. Bilim dünyasında gittikçe popüleritesi artan konu üzerine yapılan çalışmalardan önemli görülenlerin bir kısmının kısa özetleri aşağıda verilmiştir.

Hager *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmada 3D yazıcıların yapı sektöründe kullanılması üzerine güncel gelişmeler sunulmaktadır. Çalışmada, 3D yöntemi ile geleneksel yöntemler kıyaslandığında karmaşık geometri ilişkileri için neredeyse sınırsız olasılıkların türetilebileceği savunulmuş olup yöntemin çevre dostu olduğu vurgulanmıştır. Maliyet, çevre kirliliği ve yaralanmaları azaltma gibi çok sayıda avantajı olduğundan bahsedilmiş ancak hala pek çok sınırlamalara da sahip olduğu belirtilmiştir. 3D yazıcılar için uygun olacak bir modeli oluşturmak amacıyla pek çok farklı modelleme programı olduğuna değinilmiş ve en popüler formatın STL olduğu belirtilmiştir.

Wu *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmada 3D yazıcı üretim faydalarından bahsedilmiştir. Teknolojik potansiyelinin büyük ölçekli uygulamaların eksikliği nedeniyle sınırlı olduğunu vurguladıkları çalışmada yapı gelişimi bilgi modellemesi, kullanıcı tanımlı kütle gereksinimleri ve basılmış projelerin yaşam döngü maliyetleri alanlarında çalışılması gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışmada yapı endüstrisi için 3D baskının tanımı ve özellikleri, 3D baskının tarihçesi, 3D baskı işlemi ve üretilen inşaat parçaları, üretilmiş olan mimari modeller, yapılan bina projeleri, 3D baskının inşaat endüstrisindeki zorlukları ve geleceği, büyük ölçekli modeller veya binalar, 3D yazdırma ve Bina Bilgisi Modellemesi (BIM), 3D baskı ve isteğe göre düzenleme ve yaşam döngüsü maliyeti üzerine araştırmalar yapılmıştır.

Gosselin *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmada ultra yüksek performanslı beton için eklemeli imalat (AM) işlemi tanıtılmıştır. Mevcut en büyük 3D baskılı beton parçalardan bazılarını oluşturan, iki adet yapısal eleman üretilmiştir. 3D yazıcı cihazının detaylı şekilde anlatıldığı çalışmada, Portland çimentosu CEM I 52,5N (%30–%40), kristal silika (%40–%50), silis dumanı (% 10) ve kalker tozu (% 10) kullanılmıştır. Yeterli reolojik parametreleri sağlamak ve tabakalar arası arayüzey kalitesini artırmak aynı zamanda da priz süresini düzenlemek için polimer bazlı reçine ilave edilmiştir. Çeşitli şekillere sahip multifonksiyonel duvar elemanları da üretilerek mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir.

Shakor *et al.* (2017) tarafından yapılan çalışmada 3D baskı işlemi için benzersiz bir çimento karışımı (150 µm'lik elekten geçen bir kalsiyum alüminat çimentosu, CAC, ve sıradan bir Portland çimentosu, OPC, kullanarak) geliştirilmiştir. Ayrıca, priz süresini azaltmak amacıyla bazı numunelere lityum karbonat eklenmiştir. Çalışmanın amacı, hedeflenen toza (Z-tozu) yakın uygun çimentolu tozu bulmak ve bu malzemenin mekanik özelliklerini



değerlendirmektir. 2 cm<sup>3</sup> lük küp numuneler üzerinde basınç deneyi yapılmış farklı günlerde ve farklı kür koşullarındaki dayanımları irdelenmiştir. Maksimum basınç dayanımı, hem kabuk hem de çekirdek için 8,26 MPa, minimum porozite % 49,28 olarak bulunmuştur. Sönmüş kireç ortamında (Ca(OH)<sub>2</sub>) ve su ortamında kür yapılan numunelerin yanı sıra kürsüz numuneler de değerlendirmeye alınmıştır. Bu tip çimentolu (CAC & OPC) malzemeler kullanılarak farklı yapılar tasarlanabileceğinden ve yazdırılan numunenin mekanik mukavemeti ve porozitesinin kesin olarak belirlenebilmesi için farklı açılar ve yönlerde deneyler yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

Panda *et al.* (2017)'a göre 3D beton baskıda temel sorun yapısal stablitedir. Bu ihtiyaçtan basılabilir lif takviyeli beton tasarlayarak kurtulunabilir. Bu yüzden makalede kısa cam lifler (3, 6 ve 8 mm uzunluklarda ayrıca % 0,25 ve % 1 oranlarında) eklenerek deneysel araştırma yapılmıştır. Deneysel sonuçlar neticesinde lif yüzdesindeki artışla basılı örneklerin özellikleri gelişmiştir. Yenilikçi dijital inşaat teknolojisi olarak bu çalışmada farklı lif uzunluklu ve içerikli 3D basılı geopolimerlerin yönsel özellikleri araştırılmıştır. Açık bir şekilde görülmektedir ki lif ilavesi basınç dayanımını sınırlı olarak geliştirmiş ama lif etkisi eğilme ve çekme dayanımı bakımından daha iyi görülebilir nitelikler sağlamıştır.

Zareiyana and Khoshnevisb (2017) tarafından yapılan çalışma deneysel yaklaşımlar kullanarak CC yapı tabakaları arasındaki bağ dayanımı üzerinde birbirine kenetlenme etkisini araştırmaktadır. Var olan ekstrüde sistemi ile uyumlu bir beton karışımı kullanılmıştır ve farklı kilitleme konfigürasyonları test edilmiştir. Sonuçlar bağ dayanımının kilitlenmeye duyarlı olduğunu ve kayma testi ile gösterildiği gibi ortalama % 26 kadar arttırılabileceğini göstermiştir.

Ma *et al.* (2018b) atık veya geri dönüştürülebilir malzemelerin 3D baskıda çimentolu malzeme üretmek için hammadde olarak kullanılmasını inceledikleri çalışmalarında, 3D baskının maksimum maliyet-fayda analizinde büyük ölçüde desteklenebilir olduğunu belirtmişlerdir. Bu makale ekstrüzyona dayalı baskı işlemiyle uyumlu çevre dostu bir çimentolu karışım önermektedir. Bakır atık %0'dan %50'ye kadar kum ile ikame edilmiştir. Taze ve sertleşmiş betonda ekstrüde edilebilirlik, inşa edilebilirlik, akışkanlık ve baskı alınabilirlik süresi testleri uygulanmış ve en uygun karışımın, doğal kumun %30 oranında bakır atığı ile ikame edilmesiyle oluşan karışım olduğu belirlenmiştir. Bu araştırmayı sonuçlandırmak için, tasarımın optimize edilmesi adına ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik katsayıları önerilmiştir. 42,5 R Portland çimentosunun kullanıldığı numunelerde uçucu kül ve silis dumanı ilave edilmiştir ve 3 günlük basınç dayanımı 22 MPa bulunmuştur. Yüzey alanı 0,101 m<sup>2</sup>/g olan dere kumu ve yüzey alanı 0,141 m<sup>2</sup>/g olan bakır artıkları ince agrega olarak kullanılmıştır.

Chen *et al.* (2018) tarafından yapılan çalışmada hidroksipropil metil selülozun (HPMC), su azaltıcı katkının (WRA) ve lityum karbonatın ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) modifiye edilmiş 3D baskı sülfaloüminatlı çimentolu malzemelerin reolojik ve mekanik özellikleri üzerine yoğunlaşmıştır. Ayrıca, 3D baskı çimento hamurunun karışım süresi ve hibrit katkılarla birlikte reolojik özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak, katkı maddelerinin kullanılması ile basılabilir özellikte ve reolojik davranışları kontrol edebilen 3D baskı sülfaloüminatlı çimentolu malzemelerin geliştirilmesinin mümkün olduğu belirtilmiştir.

Camacho *et al.* (2018) inşaat endüstrisiyle ilgili olan AM kullanımına dair bir derleme sunmaktadır. Bu şekilde AM'nin popüler olma süreçleri, kullanılan malzemeler, AM uygulamasının yöntemlerini ve potansiyel ilerlemelerini tartışmaktadır. Araştırmacılara göre AM'nin inşaat endüstrisindeki geleceği ümit vericidir. Ama hala yeni malzemelerin ve süreçlerin üretimi, daha hızlı yapılabilirlik ve kalite için disiplinler arası araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Hala gelişim aşamasında olan bu alanda güncel ilerlemeleri karşılaştırmak ve değerlendirmek için standartlaşmış deney ve kalite kontrol kriterleri bulunmamaktadır. İlk projeler patentli olduğundan yayımsal olarak ulaşılabilirlik zordur.

Weng *et al.* (2018) 3D yazılabilir inşaat malzemeleri belirgin bir akış direncine sahip olduğundan ardışık tabakaların ağırlıklarıyla ayakta durabilen malzemeleri sağlamak için bir teslimat sistemi ile iletilmeleri gerektiğini belirtmişlerdir. Bu ihtiyaçları karşılamak için malzeme reolojik özellikleri optimize edilmelidir. Bu çalışmada 5 farklı değişkenin malzeme reolojik özellikleri üzerine etkisini değerlendirmek için su/bağlayıcı oranı, kum/bağlayıcı oranı, uçucu kül/çimento oranı, silis dumanı/çimento oranı ve lif dozajını parametre olarak belirlemişlerdir. Bu değişkenlere göre tüm reolojik parametrelerin değişimi sunulmuştur. 3D yazdırma sürecinde düşük viskozitenin ve yüksek akış direncinin gerekli olduğu vurgulanmıştır.

Panda and Tan (2018)'in yaptıkları çalışmada ise 3D beton yazdırma uygulaması için geliştirilen geopolimer harcın taze özellikleri ve malzeme tasarımı sunulmaktadır. Ekstrüde edilebilirlik, şekil verilebilirlik, inşa edilebilirlik ve tiksotropik çalışma zamanı, 3D yazdırılabilir geopolimer için kritik erken dönem özellikleri olarak tanımlanmıştır. En iyi yazdırılabilir karışımı elde etmek için 5 farklı geopolimer karışım tasarımı sistematik bir deneysel yaklaşımla test edilmiştir.

Paul *et al.* (2018) yazdırma yönü ve zamanının yazdırılan objenin toplam yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini belirtmişlerdir. Tabakalı beton, örneklerde zayıf bağlantılar oluşturabilir ve basınç, çekme ve eğilme hareketlerinde yük taşıma kapasitelerini azaltır. Bu çalışmada 3D yazdırılmış örnekler büyük 3D beton yazıcıdan farklı

oryantasyonlarda toplanmış ve mekanik özellikleri test edilmiştir. Test edilen malzemeler için, 3D basılı örneğin basınç ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin yazdırma yönü vasıtasıyla kontrol edilebildiği anlaşılmıştır. 3D malzemelerde daha iyi pompalanabilirliği sağlamak için tiksotropi değerinin 10000 N mm rpm'den daha büyük olması gerektiği bulunmuştur.

Rahul *et al.* (2019) karışımlara, inşa edilebilirlik, ekstrüde edilebilirlik ve sağlamlık için testler uygulamışlardır. Çalışmada pompa tipi, nozul boyutu ve ekstrüzyon hızı gibi parametreler baz alınmıştır. Parametre olarak belirlenen %10 silis dumanı, %0,1 viskozite değiştirici ajan (VMA) ve % 0,1 - 0,3 nanokil ilavesinin sağlamlığı artırdığı belirlenmiştir.

Ma *et al.* (2019) yaptıkları çalışmada, geopolimer kompozitin üretilmesi esnasında lif (12 mm) katılması işlemi için bir çelik kablonun doğrudan sürüklenmesinin uygulanabilirliğini deneysel olarak incelemişlerdir. Kompozite dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Sonuçlar, mikro kablo ve geopolimerin iyi yapışmasını kanıtlamıştır. Geopolimer kompozitin mukavemeti, tokluğu ve çatlama sonrası deformasyonunda belirgin bir gelişme gözlenmiştir.

Tian and Han (2018) tarafından yapılan çalışmada donma-çözülme döngüleri sonucu tahrip olmuş ve hava sürüklenmemiş betonun X-ışını Bilgisayarlı Tomografi (CT) taraması ve boşluk karakteristikleri ( $>0,1\text{mm}$ ) incelenmiştir. Boşluk yapısının dağılımının, donma-çözülme (D-Ç) ortamındaki betonun hasar mekanizmasında ve mekanik özellikleri üzerinde önemli faktörler olduğu belirtilmiştir. D-Ç çevrimleri altında oluşan iç hasarın evrimini incelemek için CT kullanılmıştır. CT ile tanımlanan gözenek yapıları dijital sanal modeller olarak yeniden yapılandırılmış ve bu gözenek yapılarının gözeneklilik ve gözenek dağılımı görüntü analizi ile incelenmiştir. CT ile tanımlanmış portatif yapılar içeren üç boyutlu baskı (3DP) örnekleri hazırlanmış ve bu dijital sanal modeller kopyalanarak çoğaltılmıştır. Hem normal beton numunelere hem de 3DP numunelere tek eksenli basınç testleri yapılmıştır. 42,5 R Portland çimentosunun kullanıldığı çalışmada 5-30 mm boyutlarında kırma taş ve 0-5 mm boyutlarında dere kumu kullanılmıştır. Ayrıca naftalin esaslı akışkanlaştırıcı kullanılarak  $10\times 10\times 10\text{ cm}^3$  boyutlarında numuneler üretilmiştir. Deneylerde donma çözülme çevrimleri  $-18\text{ }^\circ\text{C} / +5\text{ }^\circ\text{C}$  aralığında yapılmıştır. Çalışmada donma çözülme etkisi incelenmiştir. Fakat hava sürükleyici katkı gibi donma çözülme direncinin artırılmasına yönelik bir iyileştirme metodu uygulanmamıştır. Tez kapsamında gerçek boyutlu üretilmiş olan 3D elemanlardan alınan karot örnekleri üzerinden donma çözülme dirençleri araştırılarak hasar direncini artırmak için literatüre yöntemler önerilmeye çalışılmıştır.

Lu *et al.* (2019) yaptıkları çalışmada uçucu kül ve hava sürükleyici katkı içerikli sprey bazlı 3D yazdırılabilir çimentolu materyalleri araştırmışlardır. Bu çalışma ile, sprey bazlı 3D

baskının boyutsal doğruluğunu geliştirmek için çimentolu malzemenin geliştirilmesine katkıda bulunmayı hedeflemişlerdir. Optimum karışım tasarımını elde etmek için uçucu kül (cenosfer) ve hava sürükleyici katkının optimum değerini bulmak için, püskürtme testleri; karışımlar arasında en küçük sıçrama genişliğine ve en düzgün malzeme dağılımına sahip oldan ideal karışımı bulmaya yönelik yapılmıştır. Biriktirme işleminin analizi, püskürtülmüş malzemenin dağılımının, çimentolu malzemelerin spreylere bazlı baskısında reolojik özelliklerinin yakından ilişkili olduğu ortaya konulmuştur. Yapılan çalışma spreylere bazlı 3D betonların reolojik özelliklerini inceleyen bir çalışmadır. Tez kapsamında ise 3D baskı tabanlı betonların hava sürükleyici katkı etkisindeki reolojik ve fizikomekanik özellikleri kapsamlı bir biçimde incelenmiştir.

### **Betonun Donma-Çözülme Mekanizması ve Hasarı**

Beton, diğer yüksek derecede gözenekli ortamlar gibi, nemi emme ve tutma yeteneğine sahiptir. Su ile temas eden korunmasız beton yapılar genellikle donma hasarına karşı hassastırlar. Beton gibi taneli kompozit malzemelerin donma-çözölmeye karşı gösterdiği direnç onlarca yıldır birçok çalışmada ele alınmıştır (Zuber and Marchand 2000). Bilindiği üzere su donup buza dönüştüğünde hacminde yaklaşık % 9'luk bir artış meydana gelmektedir. Bu hacim artışı nedeniyle betonun bünyesinde bulunan su donduğu takdirde betonu hasara uğratmaktadır. Tekrarlanan donma-çözölme döngülerine maruz kalan doymuş betonun iki tip bozulmadan etkilenebileceği belirlenmiştir: iç mikro çatlamalar ve buz çözücü tuz etkisiyle pullanma. Her iki bozulma aynı anda meydana gelebileceği gibi, her bir olgunun diğerinden bağımsız olarak meydana gelebileceği de belirtilmiştir (Pigeon *et al.* 1996).

Sadece su varlığında donma etkisinde (tuz olmadığı durumlarda) yüzey genellikle sağlamken hasar içseldir. Betonun kohezyonu ve bütünlüğü bir miktar veya tamamen kaybedilebileceğinden iç donma hasarı çok ciddidir. Bu durum basınç dayanımı, çekme mukavemeti, kırılma enerjisi ve elastisite modülünün ciddi şekilde azalabileceği anlamına gelmektedir (Hanjari *et al.* 2013).

Tuzlu su, buz çözücü tuz veya deniz suyu varlığında donma durumunda görünür hasar yüzeyin pullanmasıdır. Muhtemelen, iç hasar da meydana gelir, ancak yüzey hasarı çok daha belirgin olduğu için nadiren fark edilir. Tuz nedeniyle oluşan donma hasarında (en kötü senaryoda) betonarmede paspayı kaybı oluşabilir. Ayrıca, paspayının sadece bir kısmının kaybolması, donatının erken korozyonuna neden olabilmektedir (Fridh 2005).

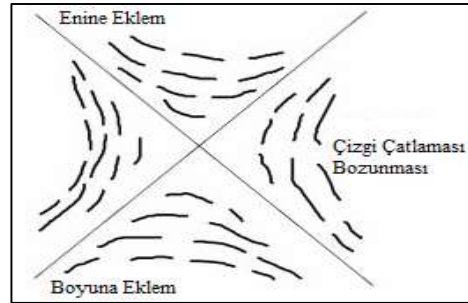
Betonda donma hasarı, donmaya dayanıklı olmayan agregaların veya donmaya dayanıklı olmayan çimento matrisinin veya her ikisinin bir sonucu olabilir. Beton karışımında

uygun şekilde seçilen donmaya dayanıklı agregalar kullanıldığında, don hasarı sadece matris kısmının donma sırasında ortaya çıkan iç basınçları karşılama çabaları sonucu oluşmaktadır (Pinto and Hover 2001).

### Donma-çözülmenin zararlı etkileri

Tekrarlanan donma-çözülmeye maruz kalan betonda iç veya yüzeye yakın hasarlar oluşmaya başlayabilir, ancak, bu hasarlar arasındaki ayrımlar genellikle çok net değildir. Yaygın belirtiler arasında; komşu birleşim yerlerindeki çatlamlar (D- veya D-çizgisi çatlamları olarak bilinir), genel yüzey pullanması ile tabakalanma (delaminasyon) ve lokal parça kopuşları (pop-out) yer alır (Richardson 2007). Adı geçen kaynak esas alınarak bu hasar türleri aşağıda açıklanmıştır:

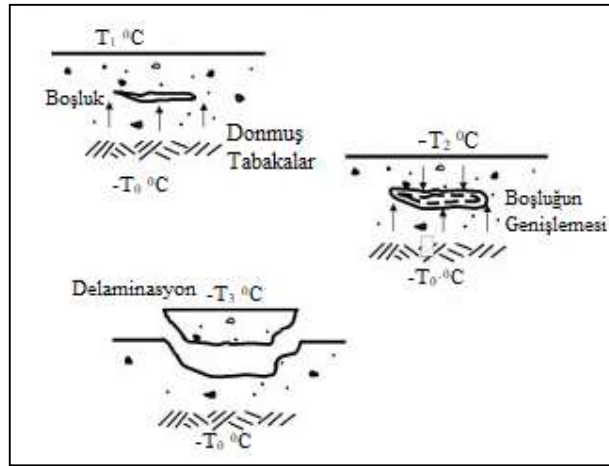
i-) *D-Çizgisi Çatlamları*: D-çizgisi çatlamları genellikle kaldırım kaplamalarında görülür. Bu desen çatlakları serbest kenarlara ve derzlere bitişik bölgelerde meydana gelir. Hem boyuna hem de enine derzlere yaklaşık olarak paralel yönlendirilirler. Çatlaklar başlangıçta derz veya kaldırım kenarının yakınında görülür. Daha sonra donma-çözülme döngüleri, birleşim yerlerinde yüzeyde kendini gösteren ek çatlamlara neden olabilir. Bu olay iri agrega parçacıklarının derinlemesine genişlemesinden kaynaklanır ve maksimum agrega tane boyutunun ( $D_{max}$ ) bir fonksiyonudur. Toplam kayıp ne kadar büyük olursa, potansiyel zararlı etki de o kadar büyük olur. Şekil 26' da D-çizgisi çatlamlarının şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 26. Donma çözülme etkisiyle oluşan D-çizgisi çatlama hasarı (Richardson 2007)

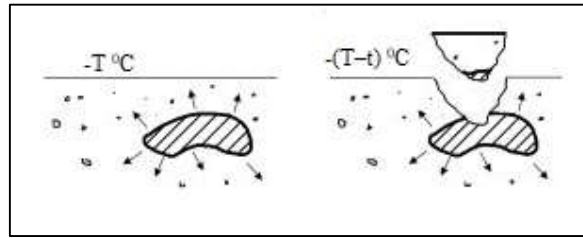
ii-) *Delaminasyon ve Pullanma*: Kendini yüzeyde pullanma olarak gösterebilen delaminasyon, donmuş bölgenin üzerindeki ve altındaki tabakaların farklı davranışlarından veya buz mercceklerinin oluşumundan kaynaklanabilir. Islak üst beton tabakaları yüzeye paralel ilerleyen donmuş tabakalarda donabilir. Örneğin, beton kaldırımlarda kaldırımın altındaki topraktan su çekilebilir ve dondurma işlemi beslenebilir. Donmuş tabakaların genişlemesi, topraklardaki donma tepkisine benzer bir olay olan delaminasyona yol açabilir (Henry 2000). Delaminasyona elverişli başka bir senaryo, uzun süreli düşük sıcaklıklara maruz kalan kaplamalarda meydana gelir. Yüzeysel katmanlar gün boyunca erimesine rağmen alt katmanlar günlerce donmuş kalabilir. Gece sıfır altı sıcaklıkları, alt donmuş katmanlara doğru hareket

eden yüzeyde bir buz cephесinin gelişmesine yol açabilir. İki donmuş bölge arasında sıkışan su merceği donabilir, genişleyebilir ve Şekil 27’ de gösterildiği gibi bir yüzey katmanını delamine eden gerilmelere neden olabilir.



**Şekil 27.** Donma-çözülme çevrimleri neticesinde oluşan boşluk hacim artışı ve parça kopması (Richardson 2007).

iii-) *Parça Kopması (Pop-Out)*: 'Pop-out' terimi, küçük konik şekilli beton parçalarının yüzeyden ayrılmasını tanımlamak için kullanılır. Donma-çözülmeye duyarlı iri agrega kullanıldığında bu durum meydana gelebilir. Yüzeğe yakın yüksek emici agrega parçacıkları doymuş hale gelebilir ve donma sırasında kırılabilir. Gerilmeler, örtü betonunu parçacık üzerinde çatlatır. Konik şekilli beton parçaları daha sonra yüzeyden ayrılır ve çıkışın tabanında kırık agrega ortaya çıkar.



**Şekil 28.** Hava sıcaklığı donma seviyesine kadar düştüğünde oluşan yerel parça kopması hasarı (Richardson 2007).

### Donma-çözülme teoremleri

Betonda oluşan donma-çözülme hasarının oluşumu üzerinde donma hızının etkisi farklı hipotezlerin öne sürülmesine neden olmuştur. Literatürde mevcut önemli don hasarı teorileri: (i) hidrolik basınç, (ii) osmotik basınç (buz merceği büyümesi), (iii) kapalı kap teorileridir.

Donma-çözülme hasarına karşı öne sürülen teorilerden ilki Powers (1945) tarafından ele alınan "hidrolik basınç teorisi"dir (Penttala 1998). Powers (1945) teorisinde buz oluştuğunda ortaya çıkan hacim genişlemesinden dolayı gözeneklerde bulunan donmamış suyu harekete

zorladığını açıklamıştır. Buzun genişmesi ile ortaya çıkan hidrolik basınç etkisiyle oluşan suyun hareketi ile betonda hasar oluştuğu belirtilmiştir. Hidrolik basınç teorisinin günümüzde sadece çok doygun koşullarda geçerli olduğu kabul edilmektedir.

Daha sonra Powers and Helmut (1953) yaptıkları çalışmada hava sürüklenmiş çimento hamurunda donma anında oluşan ani genişlemeyi gözlemleyerek hidrolik basınç teorisini geliştirmişlerdir. Hava sürüklenmiş betonlarda ise donma-çözülme etkisi altında hacim artışı yerine büzülme elde edince “osmotik basınç hipotezi” veya “mikroskobik buz kristalleri gelişmesi” olarak bilinen yeni bir hipotez öne sürmüşlerdir. Sıcaklık sabit tutuldukça genişlemenin devam etmesi donmamış suyun donmuş alanlara doğru hareket ettiğini göstermiştir. Buz oluşumunun gözenek çözeltisinin konsantrasyonunu artırdığını ve böylece osmotik basınca neden olduğunu vurgulamışlardır. Osmotik basınç teorisi, özellikle çözücü tuzların negatif etkilerini açıklamakta önemli bir yere sahiptir (Fridh 2005).

Hidrolik basınç teorisinde oluşan buzun hacim genişmesi nedeniyle donmamış suyun kılcal boşluğun içinde buzun ilk oluşturulduğu kısımlarından beton matrisinin diğer kısımlarına doğru hareket ettiği düşünülmektedir. Ancak osmotik basınç teorisinde ise, test sonuçları ve teorik hususlar göz önüne alındığında, daha küçük gözenek boşluklarındaki donmamış boşluk suyu, gözenek sisteminde buzun ilk oluştuğu kısımlara doğru çekildiği yani donma sırasında su hareket yönünün tersi yönünde hareket ettiğini göstermiştir. Yani boşlukta buz oluştuktan sonra konsantrasyonun artması kılcal boşluklarda bulunan suyun buza doğru hareket etmesine neden olduğu savunulmuştur.

"Kapalı kap teorisi", geçirgenliğin sıfır olduğu ve malzemenin sünekliğinin sıfır olduğu duruma uygulanan hidrolik basınç mekanizmasının özel bir durumudur. Mekanizma, izin verilen maksimum donabilir su miktarını ve çok yoğun doymuş çimento hamurundaki veya gömülü doymuş iri gözenekli agrega parçacıkları içeren çok yoğun betondaki maksimum basıncı tanımlamak için Fagerlund (1997a, 1997b) tarafından önerilmiştir. Bu gibi durumlarda, düşük geçirgenlik nedeniyle donma alanından su akışı pratik olarak imkansızdır. Bu nedenle, buz oluşumunda hacimdeki% 9'luk artış, bu% 100 doymuş olduğunda malzemede büyük gerilimler yaratır. Gözeneklilik çok düşük olmadıkça hiçbir gözenekli malzeme bu gerilmelere dayanamaz. Bu modelin hidrolik basınçtan tek farkı ise, hücre duvarları geçirimsiz kabul edildiğinden, kapalı kaptaki suyun yalnızca bulunduğu yerde donmasıdır (Fridh 2005).

Öncü nitelikteki bu çalışmalardan sonra betonun donma-çözülme hasarı pek çok araştırmaya konu olmuştur. Fagerlund (1973a, 1973b, 1975, 1977a, 1977b, 1981) çalışmalarında “kritik derecede doygunluk teorisini” önermiştir. Bu teoriye göre, gerçek

doygunluk derecesi kritik değeri aştığında, donma-çözölme hasarı meydana gelir. Hasara neden olacak kritik doygunluk dercesi şu faktörlere bağlıdır;

- i. Betonun yaşı (hidratasyon derecesini ve gözenek yapısını belirler)
- ii. Boşluk- boyut dağılımı (yapay olarak oluşturulmuş hava gözenekleri dahil)
- iii. Çevresel koşullar (yani suyun buharlaşp buharlaşmaması)
- iv. Soğuma hızı ve donma-çözölme döngülerinin sıklığı (suyun yeniden dağıtılması)
- v. Donma özölme döngüleri arasında kurutma (ilave genleşme boşluğu sağlanması).

Fagerlund'un çalışmalarına göre, malzeme bir kez donsa bile, malzemede çatlak ve hasara neden olacak kritik doygunluk derecesi oluşmaktadır. Bu teori donma-çözölme hasarını açıklamak ve tahmin etmek için büyük ölçüde kullanılmıştır. Litvan (1971, 1972, 1973)'a göre ise kapiler boşluklardaki su yerinde donmaz, ancak donma olayı yapının dış yüzeylerinde gerçekleşir. Aşırı soğutulmuş su, gözenekli beton yapısında su hareketlerine ve kurumaya yol açarak donma-çözölme bozulmasına neden olabilir (Penttala 1998, Chan 2006). Daha sonra, Setzer (1997(a))' de ortaya koyduğu teori ile donma-çözölme çevrimleri esnasında çevreden emilen suyun da etkili olduğunu "mikro-buz mercekle teorisini (micro-ice lens theory)" öneren ilk kişi olmuştur. Pigeon *et al.* (1985) donma hızının etkisini araştırdıkları çalışmada deneysel olarak donma hızının etkisini ortaya koymuş ve Powers'ın hidrolik basınç hipotezindeki sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Çalışmada buz çözücü tuz kullanılmamıştır ve oluşan hasar içsel donma-çözölme hasarı olarak adlandırılmıştır. Donma hızının buz çözücü tuz kullanılması durumuna göre farklılık gösterdiği belirtilmiştir. Fagerlund (1994, 1997a, 1997b) ve Setzer (1997a, 1997b) tarafından yapılan çalışmalarda betonda don hasarına sebep olan temel mekanizmalar (hidrolik basınç, buz oluşumu ve büyümesi, hava-boşluk karakteristikleri ve kritik doygunluk derecesi) hakkında çokça teorik formül geliştirilmiştir. Penttala (1998, 1999, 2002) alışmalarında donma-çözölme çevrimleri esnasında, betonda ölçülen rölatif nem ve sıcaklıktan türetilen boşluk suyu basıncını termodinamik kurallara dayanarak hesaplamıştır. Boşluk suyu miktarı bilindiği takdirde, betondaki basıncın hesaplanabileceğini belirtmiştir. Termodinamiğe dayanan bu teoriye göre, buz kütesine doğru ilerleyen boşluk suyunun hareketinin ana sebebi buzı çevreleyen küçük boşluklardaki donmayan boşluk suyu ile buz arasındaki kimyasal potansiyel farklılıktır (Penttala 2006). Donma-özölme hasarını açıklamaya yönelik bir başka mekanizma ise boşluk içindeki kristalleşme ve bunun boşluk duvarı ile etkileşimi üzerine geliştirilmiştir (Scherer 1999). Erime sıcaklığında kristaller boşluk yüzeyini tamamen kaplar ve mekanik olarak denge halinde olurlar. Sıcaklık düştükçe, kristaller büyümeye çalışacak ve bu büyümeyi engellemek için boşluk duvarı da basınç kuvveti oluşturacaktır. Bu ilave basına kristalleşme basıncı denilir (Wardeh *et al.* 2010).



Yukarıda bahsedilen teorilerde (hidrolik basınç teorisi hariç), hava sürüklenme ihtiyacı, yeterli boşluk boyut dağılımı veya aralığı hesaplanmayabilir. Ancak, normal çevre koşullarında betonun donma-çözülme dayanıklılığının modellenmesinde hidrolik basınç teorisinin geçerli olduğu düşünülmemektedir (Penttala 2006).

Bu arada donamayan adsorbe su (bu su, çimento tanecikleri, yüzeyinde elektrostatik olarak tutulur, birkaç molekül kalınlığındadır ve donma derecesi  $-74\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' dir) ile buz arasında buhar basınç farkı meydana gelir. Bu basınçlar nedeniyle çimento hamurunda yerel olarak genleşmeler ve kurumalar sonucu yerel büzülme oluşur. Genleşme ve büzülme yanyana oluşu kayma gerilmeleri ve dolayısıyla çekme gerilmelerinin belirmesine yol açar, betonda çatlama gözlenir. Hamurun geçirimsizliği, donan yüzeye bünyedeki suyun ilerleme hızı hasar derecesini etkiler (Akman 1992).

Gevrek bir malzeme kritik doygunluk seviyesinde donmaya maruz kaldığında hasara uğrayacaktır. Çimentolu matristeki boşluk suyu veya agregaların absorbe ettiği nem donma esnasında zararlı genleşmelere sebep olabilir. Beton genleşmeleri karşılayabilecek esneklikteyse bu genleşmeler zarar vermeyebilir ancak hareketin kısıtlanması çekme gerilmelerinin oluşmasına yol açacaktır. Malzemenin çekme gerilmesinin aşılması durumunda ise malzeme çatlağa meydana gelecektir. Bu zararlı etki birikimli olarak ilerler. Çatlaklı betonun çözülme sırasında boşluklarına daha fazla su girecek ve donma sırasında buz hacmi artacak daha fazla gerilme ve çatlamaya neden olan bir kısır döngü gerçekleşecektir. (Richardson 2007).

Betonun iç hasarının ve yüzey pullanmasının değerlendirilebileceği çok sayıda test yöntemi vardır. Şu anda kullanılan testler ASTM C666, ASTM C671, ASTM C672, ASTM C682 ve CEN / TS 12390-9'u içermektedir. CEN teknik özellikleri (12390-9) İsveç Standartı SS 13 72 44, DAfStb Heft 422 ve RILEM önerisi TC 117-FDC'ye dayanmaktadır (Richardson 2007). Kritik dilatasyon testi ASTM C 671, hızlı dondurma ve çözme testi ASTM C 666, beton numunesinin iç hasarının değerlendirilebildiği en yaygın testlerdir. Tuz etkisinde pullanma testi ASTM C 672 buz çözücü tuzların varlığında numune yüzeyinin pullanmasını ölçer. Bunlara benzeyen, gerçek dondurma ve çözülme çevrimleri kullanılarak yapılan doğrudan testler olarak adlandırılan çok sayıda ulusal dondurma ve çözme testi vardır. ASTM C 672 standardında belirtilen iki donma-çözme testinde (CIF / CDF) hem iç hasar hem de yüzey pullanması aynı numune ile belirlenebilir ve aynı anda test edilebilir olmuştur (Setzer 1997a ve Penttala 2006).

Tüm bu fenomenler şu anda en azından kısmen anlaşılmaktadır, ancak sadece nitel anlamda. Bununla birlikte, bu çok sayıda etkinin pratik bir değerlendirmesi, matematiksel bir

model olmadan yapılamaz, çünkü dondurma işlemi ile üretilen gözenek basınçları, malzemenin mukavemeti ile karşılaştırılmalıdır (Richardson 2007).

### **Donma-çözülme etkisinin matematiksel modellenmesi**

Betonun dondurulması ve çözülmesinde yer alan bireysel temel fiziksel süreçleri düzenleyen denklemler bilinmesine rağmen, bu karmaşık fenomen için matematiksel bir model mevcut değildir (Bazant 1988). Donma-çözülme davranışının matematiksel modellenmesi henüz tam olarak gelişmemiştir. Bu nedenle, donma çözölmeye dayanıklı betonun, hizmet ömrü tahmininde matematiksel modellerin kullanılmasıyla dayanıklılık tasarımı şu anda mümkün değildir. Bununla birlikte, CEN / TS 12390-9' da ana hatları verilen donma-çözülme performansı için üç karşılaştırmalı test, dayanıklılık açısından performansla ilgili tasarım yöntemlerinin kullanılmasına zemin hazırlamaktadır (Richardson 2007). Donma-çözülme olayının geçerli matematiksel modellerinin formülasyonu, öngörülemeyen etkiler, döngüler sonucu oluşan hasar, laboratuvar testlerindeki karışım parametreleri ve yapıların hizmet ömrü deneyimi gibi ölçülme etkisinin doğrulama zorluğu nedenlerinden dolayı karmaşıktır.

### ***Hidrolik basınç teorisi***

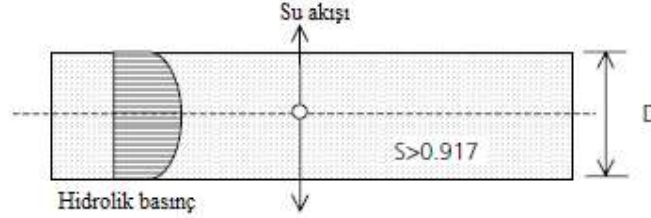
Hidrolik basınç mekanizması suyun buza dönüşmesiyle hacminde meydana gelen yaklaşık % 9' luk hacim artışıyla oluşur. Doymuş bir gözenek sisteminde bu, sudaki basıncın betonun gerilme mukavemetinden daha büyük bir artışa yol açacaktır. Mekanizma, artan su/çimento oranının donabilir su miktarını ve dolayısıyla iç basıncı arttırdığını belirtir. Öte yandan, artan su/çimento oranı da çekme mukavemetinde bir azalmaya neden olur. Bu nedenle, su/çimento oranı ne kadar yüksek olursa, beton donma çözülme eylemi için o kadar savunmasızdır denebilir - veya tam tersi. (Bager 2010).Teorik analizler, hidrolik basıncın şu faktörlere bağlı olduğunu göstermiştir: malzemenin geçirgenliği, buz oluşum hızı ve etkili doygunluk derecesi.

$$S_f = \frac{W_f}{W_f+a} \quad (1)$$

Burada  $W_f$  dondurulabilir su miktarıdır ( $m^3/m^3$ ) ve  $a$  hava dolu gözenek hacmidir ( $m^3/m^3$ ). Teoriye göre, hidrolik basınç sadece  $S_f > 0,917$  olduğunda ortaya çıkabilir; hava hacmi, donma sırasındaki hacim genişlemesinden daha küçük olduğunda.  $S_f < 0,917$  ise, fazla su, donmaya neden olmadan, basınç oluşturmadan halledilebilir.

Hidrolik basınç teorisi, tamamen doymuş bir malzeme parçasının kritik boyutunun varlığını öngörür ( $S_f = 1$ ). Kritik boyutun bir örneği olarak Powers (1956), malzemenin kalınlığı  $D$  olan ve çevredeki havaya açık yüzeyleri olan bir dilim kullanmıştır. Şekil 29'da gösterildiği

gibi. Etkili doygunluk derecesi 0,917'nin üzerindedir, bu da bir miktar suyun dilimin yüzeyinden dışarı zorlanması gerektiği anlamına gelmektedir. Bu da Darcy yasasında tanımlandığı gibi basınca sebep olur. Maksimum basınç dilimin ortasında görünür. Basınç (P) malzemenin gerilme mukavemetini aştığında dilim kırılır ( $P = f_t$ ).



**Şekil 29.** Powers (1956) çalışmasında kritik kalınlık için oluşturulan model (Fridh 2005).

Analiz oldukça basittir ve kritik kalınlık aşağıdaki şekilde hesaplanır;

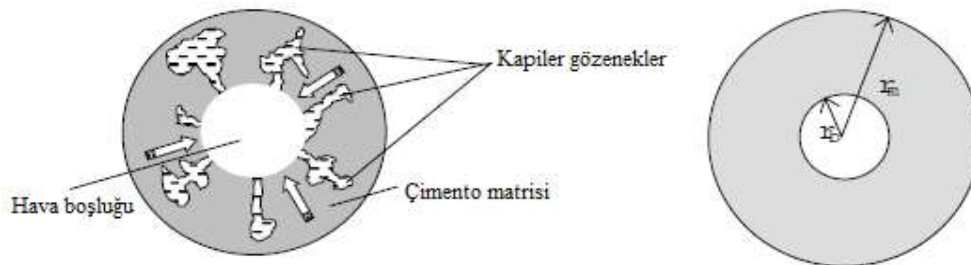
$$D_{CR} = \left( \frac{8K}{\eta} \right) \sqrt{\frac{f_t}{\left( 1,09 \frac{1}{s_f} \right) \frac{dw_f}{dt}}} \quad (2)$$

Burada permabilite katsayısı  $K$  ( $m^2$ ) Darcy kanunu ile ifade edilir:

$$\frac{d_w}{d_t} = \frac{K}{\eta} A \frac{dP}{dx} \quad (3)$$

Burada  $d_w/d_t$  aşırı su akışı ( $m^3/s$ ) üretim oranı,  $A$  su akışının kesiti ( $m^2$ ),  $\eta$  akışın viskozitesi ( $Ns/m^2$ ),  $dP/dx$  hidrolik basınç gradyanıdır ( $Pa/m$ ).

Powers (1949) da yaptığı çalışmasında başlangıçtaki hidrolik basınç teorisini basit dilimden donabilir su içeren bir çimento harcı kabuğu ile çevrelenmiş, hava ile doldurulmuş bir gözenek olan daha gerçekçi bir malzeme modeline uygulamıştır. Bu içi boş kürenin geçirimsiz bir dış sınırı vardır. Geçirgenliğin, oluşan buzun sıcaklığı ve miktarından bağımsız olarak sabit olduğu varsayılmaktadır. Akışın, sadece bir yönde, yer değiştirmiş tüm suyu her zaman alabilecek kadar büyük olan hava boşluğuna doğru olabileceğini düşünmüştür. Tasarladığı model Şekil 30'da gösterilmiştir.



**Şekil 30.** Powers (1949) donmuş çimento matrisi modeli (Fridh 2005).

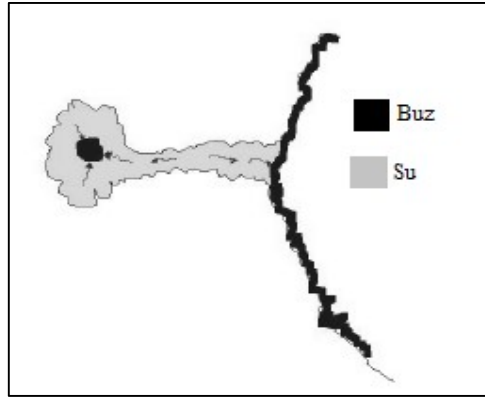
Hidrolik basınç teorisini test etmenin bir yolu da, Fagerlund (1973b), (1997) deki çalışmalarında yaptığı gibi, hava gözenek sisteminin hava dolu kısmı ve geçirgenlik değişiklikleri için gerçekçi veriler kullanarak ölçülen genleşme eğrilerini hidrolik basınç modeline göre hesaplanmış olanlarla karşılaştırmaktır.

Hidrolik basınç, buz eridiğinde değil, sadece buz oluştuğunda meydana gelebilir. Bu nedenle, çözülmeye kaynaklanan hasarlar, hidrolik basınç teorisi ile açıklanamamaktadır. Ayrıca hidrolik basınç teorisi, düzenli yapay hava gözenek sistemine sahip yoğun kaliteli betonlar için geçerli görünmemektedir (Fridh 2005; Bager 2010).

### ***Mikroskopik buz kristalleri gelişmesi hipotezi***

Betonun donma hasarı, termodinamik denge durumuna hiçbir zaman makroskopik ölçekte ulaşılmadığı ve sadece mikroskopik ölçekte kısıtlandığı dinamik bir sistem tarafından yönetilir. Sistemde, betonun dış yüzeyinde ve mikroyapısı içerisinde ısı ve nem iletimi meydana gelir (Setzer 1997a). Bu teoriye göre buz, gözeneklerde mikro buz kütleleri olarak oluşur. Gözenekli malzemelerdeki bu tür mikro buz kütleleri iki zıt yönde hareket eder.

Jel boşluklarının yanı sıra çimento hamurunda da 'kılcal gözenekler' adı verilen daha iri gözenekler de bulunmaktadır. İri kılcal gözeneklerdeki su 0 °C' ye yakın donarken, daha ince gözeneklerdeki su -40 °C 'lere veya daha düşük sıcaklıklara kadar donmayabilir. Yani bu durum verilen her donma sıcaklığında çimento hamurunun jel gözeneklerinde ve daha ince kılcal gözeneklerde donmamış su ve daha iri kılcal gözeneklerde buz bulunduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca, hava gözeneklerinde de biraz buz bulunabilir. Bu, kılcal damarlardan dışarı atılan suyun dondurulmasıyla oluşur. Dondurulmamış, aşırı soğutulmuş, su da izole durumdaki iri kılcal damarlarda mevcut olabilir, çünkü buz çekirdeklenmesi dar girişler (boyun gözenekleri) tarafından engellenebilmektedir. Hali hazırda oluşturulmuş buzun serbest enerjisi, donmamış suyun serbest enerjisinden daha düşüktür. Bu, su ve buz arasında difüzyon potansiyeli farkı yaratacaktır. Yani termodinamik teoriye dayanarak, su ve buz arasındaki serbest enerjideki bu farklılıkların, donmamış suyu daha büyük gözeneklerde oluşan buza taşınması buz mercek mekanizması olarak bilinir (Setzer 1999). Dondurulmamış su içeren ince kılcal damarlardan gelen su ve aşırı soğutulmuş su içeren izole gözeneklerden gelen su, kılcal buza ve hava gözeneklerindeki buza doğru hareket edecektir. Bu durum Şekil 31'de gösterilmiştir.



**Şekil 31.** Kılcal damardaki buzun, hava gözenegindeki donmamış suyu çekmesi (Fridh 2005).

Setzer (1997a) çalışmasında sertleşmiş çimento hamuru matrisindeki gözenekli suyun termodinamik donma noktası basıncını  $\Delta T$  ile tanımladığı bir formül türetmiştir.

$$\Delta T = \frac{-2\Delta\gamma \times \Delta V_i \times T_0}{h_{li} \times r} \quad (4)$$

Burada  $\Delta\gamma$  = buz matrisi ile su matrisinin arayüzey serbest enerjisi arasındaki fark ( $46 \times 10^{-5} \text{ j/m}^3$ );  $V_i$  = buzun molar hacmi ( $2,0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$ );  $h_{li}$  = füzyonun molar ısısı ( $6,0 \times 10^3 \text{ j/mol}$ );  $T_0$  = referans sıcaklığı (273,15 K) ve  $r$  = gözenek yarıçapı. Bu, donma noktası basıncı  $\Delta T = T - T_0$  ile gözenek suyunun T sıcaklığında aşağıdaki gibi donacağı minimum gözenek yarıçapı  $r_T$  arasındaki ilişkiyi verir:

$$r_T = \frac{-1,25 \times 10^{-7}}{\Delta T} \quad (5)$$

Penttala (1998), buz-su, buz-buhar ve buhar-su arayüzlerinde yaratılan genelleştirilmiş bir basınç formülü türetmiştir. Buz kristalleri, çekirdeklenme sıcaklığında buz ve su arasındaki termodinamik dentge koşulu dikkate alınmış ve  $\Delta_{pf}$  MPa basınç farkı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Mihashi *et al.* 2003):

$$\Delta_{pf} = \left(\frac{h_{li}}{V_i}\right) \ln\left(\frac{T}{T_0^*}\right) + \left(\frac{RT}{V_i}\right) \ln\left(\frac{p_v}{p_s}\right) \quad (6)$$

Burada R = gaz sabiti (8,314 J /mol/K);  $T_0^*$  = buz kristalleri çekirdeklenme sıcaklığı (K). Neredeyse doymuş bir durum söz konusu olduğunda,  $p_v$   $p_s'$  ye denklem (6) nın sağ tarafında ikinci terimi neredeyse sıfıra çevirerek yaklaşır. Böylece,  $\Delta_{pf}$  ve T arasındaki ilişki aşağıdaki gibi olur:

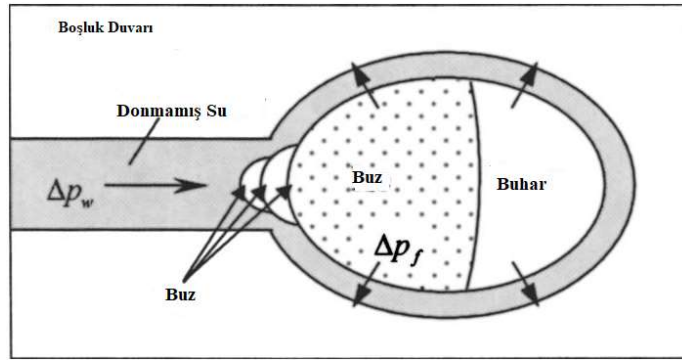
$$\Delta_{pf} = -302,3 \ln\left(\frac{T}{T_0^*}\right) \quad (7)$$

Sıcaklık  $T_c'$  ye düştükçe, doymuş gözenek içindeki basınç artar ve gözenek duvarında çatlaklar oluşmaya başlar. Bundan böyle  $T_c$ , gözenek duvarında çatlamayı başlatmak için

donma sıcaklığını tanımlamada kullanılır. Dondurulmamış suyun buz cephesine doğru ilerlemesinden kaynaklanan negatif basınç da dikkate alınmıştır (Şekil 32). Daha büyük gözeneklerde oluşan buz, donmamış gözenek suyundan daha düşük bir kimyasal potansiyele sahip olduğundan, bir basınç  $\Delta p_w$  üretilir, bu da jel gözeneklerinden daha büyük buz gözeneklerine kadar bir su akışıyla sonuçlanır. Jel gözeneklere doldurulan suyun sıkıştırıldığı ve bunun da donma büzülmesine neden olduğu anlamına gelir. Donma büzülmesinden sorumlu negatif basınç  $\Delta p_w$ , Setzer (1999) tarafından sıcaklığın bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi verilmiştir: (Zhou and Mihashi 2008)

$$\Delta p_w = 1,2225\theta(1 + 3,25 * 10^{-3}\theta - 1,6 * 10^{-5}\theta^2) \quad (8)$$

Burada  $\theta = T - T_0 < 0$ .



**Şekil 32.** Buz cebi oluşumu ve kılcal gözenekte negatif basınç (Zhou and Mihashi 2008).

### ***Kapalı kap teorisi***

Fagerlund (1997a) tarafından geliştirilen "Kapalı kap teorisi", geçirgenliğin sıfır olduğu ve malzemenin sünekliğinin sıfır olduğu durumda uygulanan hidrolik basınç mekanizmasının özel bir durumu olduğundan bahsedilmiştir. Bu teoriye göre betonun dış yarıçapı R, iç yarıçapı r olan küre şeklindeki birim hücrelerden oluştuğu düşünülmüştür. Buz oluştuğunda ortaya çıkan tüm hacim genişmesi, kap geçirimsiz kabul edildiğinden, hücre içinde halledilir (buz genişlediğinde oluşan hava basıncını ihmal eder). Kap 0,917' nin üzerinde bir seviyeye doyurulursa ve su donarsa, genişleme meydana gelir ve kap patlayabilir. Doygunluk derecesi ne kadar yüksek olursa, genişleme o kadar büyük olur. Sudaki basınç yeterince yüksekse buz oluşumu engellenebilir. Bu nedenle, kap (gözenek) duvarları buz oluşumunda meydana gelmesi gereken hacim genişlemesine dayanabiliyorsa, malzeme sonsuz derecede sünek olması durumunda, kapalı sert bir kapta veya çok sert bir malzemenin içindeki kapalı bir gözenekte buz oluşumu engellenebilir. Buz oluşumunu engellemek için gerekli basınç buz ve su arasındaki dengeye uygulanan Clapeyron denklemi ile hesaplanabilir:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta H^{fus}}{T\Delta V^{l-s}} \quad (9)$$

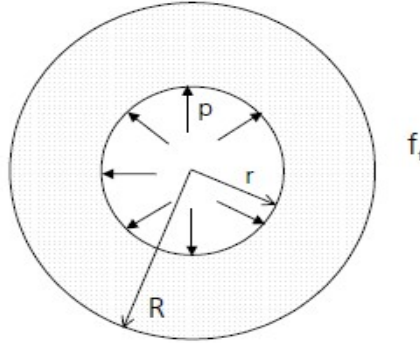
Burada  $\Delta H_m^{fus}$  donma olduğunda entalpideki değişimdir (J/mol),  $\Delta V^{l-s}$  buz oluşumunda suyun molar hacmindeki değişimdir ( $m^3/mol$ ) ve  $T$  (K) faz geçişinin sıcaklığıdır. Bunlar için aşağıdaki değerler geçerlidir:

$$\Delta H^{fus} = 6009 \text{ j/mol } (0^\circ C \text{ de ve } 5300 \text{ j/mol } -20^\circ C)$$

$$\Delta V^{l-s} = -1,61 \times 10^{-6} \text{ m}^3/mol$$

$$T = 273,15 \text{ K}$$

Bu değerler Denk. (9)'da yazıldığına duvarların, buz oluşumunu engellemek için sıcaklıktaki her bir düşüş derecesi için buz üzerine 13,7 MPa'lık bir basınç uygulaması gerektiğini göstermektedir. Bu gerilim, konteyner duvarları son derece güçlü ise veya su hacmi kabın kendisinin hacmine kıyasla çok küçükse karşılanabilir. Basitleştirilmiş bir hesaplama Şekil 33' deki modele göre yapılabilir. Birim hücre küresi, aşırı basınç sıfır olduğunda donması gereken su içerir. Donabilir su içeriği  $w_f = (4/3) \pi r^3$  ( $m^3$ ) 'tür. Toplam hacim  $(4/3) \pi R^3$  ( $m^3$ ) 'tür. Donabilir suyun hacim oranı  $w_f = (r/R)^3$  ( $m^3 / m^3$ ) olur.



**Şekil 33.** Kapalı kap teorisine göre buz basıncı nedeniyle donması engellenen su içeren boşluklu birim hücre küresi (Fridh 2005)

Analizi basitleştirmek için duvarlardaki stresin tüm kesit boyunca aynı olduğu varsayılmaktadır. Duvara etki eden iç basınç 13,6  $\theta$  MPa'dır, burada  $\theta$  ( $^\circ C$ ) suyun sıcaklığıdır ( $\theta < 0^\circ C$ ). Duvardaki çekme gerilimi şu şekilde olur ( $f_t$ , MPa):

$$f_t = - \frac{13,60 w_f^{2/3}}{1 - w_f^{2/3}} \quad (10)$$

Betonun maksimum gerilme mukavemeti yaklaşık 6 MPa'dır. Böylece, Denk. (10)'a göre, donma suyu miktarı yaklaşık 10 litre/ $m^3$ 'ten az olduğu sürece  $-10^\circ C$  sıcaklıkta buz oluşumu engellenebilir. Bu, betonda pek bulunmayan çok küçük bir su içeriğidir. Hesaplama

ayrıca, yoğun betona gömüldüğünde doymuş olabilen agregadaki maksimum tolere edilebilir gözenekliliğin % 1 mertebesinde olduğunu göstermektedir.

### ***Diğer matematiksel modeller***

Bazant (1988) yapmış olduğu çalışmada 0 °C' nin altındaki beton için, boşluk boyut dağılım fonksiyonlarını kullanarak ve 0 °C' nin üzerindeki beton izotermine dayanarak, desorpsiyon ve adsorpsiyon izotermi oluşturmuştur. Önerdiği matematiksel modelin, kesit boyutu ve şekil etkisini, soğutma oranının etkisini, suyun ve ısıнын yayılmasından kaynaklanan gecikmeleri, uygulanan yüklerden kaynaklanan üst üste binen gerilmelerin etkisini, gözenek rolünü değerlendirmek için kullanılabileceğini belirtmiştir. Donma veya çözülme sırasındaki su hareketini, hem beton içerisinde makroskopik difüzyon hem de suyun hava sürüklenmiş kabarcıklara lokal difüzyonunu içeren çift difüzyon işlemi olarak tanımlamaktadır. Isı iletimini, gizli donma ısını dikkate alarak formülize etmiştir. Gözenek basınçları, donma ve uygulanan yüklerin aynı anda neden olduğu betonun katı yapısındaki gerilimi tahmin etmeyi mümkün kılan iki fazlı bir malzeme modelinde kullanmıştır. Bu, prensipte donma-çözülme dayanıklılığı problemini gerilme ve şekil değiştirme hesaplamasına indirgemıştır. Bununla birlikte, modelin tam uygulanması ve modelin kalibrasyonu için çeşitli yeni test türlerinin yanı sıra diferansiyel denklemleri çözmek için sonlu bir eleman kodunun geliştirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Buna göre:

Gözeneklerin toplam spesifik su içeriği,  $w_p$  'iki kategoriye ayrılabilir: jel suyu ( $w_g$ ), yani çimento matrisinde bulunan ve genişliği  $<30\text{Å}$  (3,0 nm) gözeneklerdeki su; ve daha büyük gözenekleri dolduran kılcal su ( $w_c$ ). Kılcal su, ayrıca genişliği yaklaşık  $300\text{Å}$ 'dan daha küçük olan küçük kılcal gözeneklerde bulunan su ( $w_{c1}$ ) ve genişliği yaklaşık  $5000\text{Å}$ 'a (500 nm) kadar olan büyük kılcal gözeneklerdeki su ( $w_{c2}$ ) olmak üzere ikiye ayrılabilir. İkincisinin donma-çözülme hasarı için önemli olduğu görülmüştür. Hava sürüklenmesi durumunda,  $w_b$  olarak belirtilen tipik çapta  $25\mu\text{m}$ ' luk kabarcıklar da vardır. Bu boşluklar su ile doldurulduğunda, su içeriği şu şekilde yazılabilir:

$$w = w_p + w_b \quad (11)$$

$$w_p = w_g + w_c \quad (12)$$

$$w_c = w_{c1} + w_{c2} \quad (13)$$

Yapılan rasyonel analizde, gözeneklerdeki suyun donmasına bağlı oluşan hasar, betonun katı yapısında üretilen gerilmelere ve bir tür mukavemet veya kırılma kriterine dayanarak kararlaştırılması gerekmektedir. Gözenekli malzemeler için bu tür analizler zemin



mekaniğinden iyi bilinmektedir. Anahtar kavram, Terzaghi'nin, malzemenin katı yapısındaki gerilme sonucunu temsil eden etkili gerilmedir. Hacimsel bileşeni şu şekilde ifade edilebilir:

$$\sigma' = \sigma + np + n_b p_b \quad (14)$$

Burada  $\sigma$  boşluklar ve kabarcıklar dahil malzemedeki toplam hacimsel gerilme,  $n$  ve  $n_b$  ise  $p$  ve  $p_b$  basınçlarının etkilediği kesit alanını temsil eden sınırlı poroziteleridir. Kabarcıksız durumda  $n < 1$  olur. Beton için  $n$  1'e yakındır. Kabarcık varlığında  $n + n_b = 1$  olması gerekir. Böylece  $n = 1 - n_b$  güvenle kullanılabilir bu durumda  $n_b = 1 - \pi r_b^2 / s_b^2$  olur.

Kesitin her bir noktası için malzemenin hasara uğramaması;

$$\sigma' \leq f_t \quad (15)$$

Burada  $f_t$  betonun çekme gerilmesidir. Bu değer sabit değildir uygulanan donma çözülme çevrimlerinden etkilenerek azalır.  $\sigma' = 0$  olduğunda artık gerilmesiz yüksüz durum oluşur, kırılma olmama kriteri ise şudur;

$$np + n_b p_b \leq f_t' \quad (16)$$

Daha gerçekçi hesaplama için, sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek, zamana bağlı olmayan malzeme davranışını dikkate almak gerekmektedir.

Fagerlund (1997a, 2004), doygunluk derecesine dayalı olarak dayanıklılık tasarımı için olası yaklaşımları ana hatlarıyla ortaya koymuştur. Fagerlund'a göre modellerin temeli, kritik derecede doygunlukta beton kırıklarıdır. Kritik doygunluk derecesi, malzemenin doğasının bir fonksiyonudur ve donma bölgesi ile en yakın hava dolu boşluk arasındaki mesafenin bir sonucudur. Donma sırasında, genişleme basınçlarının birikmesi ve beton matriste potansiyel olarak zarar verici gerilme, donma bölgesi ile en yakın hava dolu alan arasındaki mesafe arttıkça artar. Bu nedenle, donma-çözülme hasarı ile ilgili olarak  $D_{CR}$  ile gösterilen kritik bir mesafe olduğu varsayılabilir. Bu mesafe pratik olarak, hasarlı mikro çatlakların başlamasından önce var olabilen, küre gibi hava dolu bir boşluk etrafındaki mümkün olan en kalın suya doymuş çimento matrisi bölgesine eşdeğerdir. Bu da,  $L_{CR}$  ile gösterilen kritik bir aralık faktörü kavramına yol açar. Bu iki parametre aşağıdaki denklemle ilişkilendirilmiştir.

$$D_{CR} = 2L_{CR} \sqrt{\frac{2\alpha L_{CR}}{9} + 1} \quad (17)$$

Deneysel olarak, ortalama kritik kalınlığın ( $D_{CR}$ ) saf suda donma-çözülme için 1,2 mm ve % 3 NaCl çözeltisinde 1,8 mm olduğu belirlenmiştir. Bu değerler, 15 mm  $\pm$  1'lik spesifik bir yüzey varsayarak, sırasıyla 0,40 mm ve 0,54 mm'lik kritik aralık faktörleri ( $L_{CR}$ ) verir. Değerler 0,45'i aşan su / çimento oranları için geçerlidir.

Alternatif bir yaklaşım, emme süresinin bir fonksiyonu olarak kılcal doygunluk derecesinin bir modeline dayanan potansiyel bir hizmet ömrünün belirlenmesidir (Fagerlund, 1993). Hizmet ömrü aynı zamanda çevrenin ıslaklığının bir fonksiyonudur. Hava gözenek sisteminin kılcal su alımı ve uzun süreli su emilimi önemli konulardır ve bir zaman ilişkisi ile modellenmiştir. Potansiyel hizmet ömrü ( $t_p$ ), kılcal doygunluk derecesi ( $S_{CAP}$ ) ile ilişkili kritik doygunluk seviyesi ( $S_{CR}$ ) ile tanımlanır.

$$S_{CR} = S_{CAP}(t_p) \quad (18)$$

ve;

$$S_{CAP}(t) = \frac{1}{\varepsilon} (\varepsilon_0 + C_{\alpha_0}^D \alpha_0 (\delta t)^E) \quad (19)$$

Burada;  $\varepsilon$ : Toplam porozite

$\varepsilon_0$ : Hava boşluklarını içermeyen porozite

C, D, E: Sabitler

$\alpha_0$ : Hava boşluk sisteminin spesifik alanı

$a_0$ : Toplam hava içeriği

$\delta$ : Çözülmüş havanın difüzyonu

Bu ilişkiler, belirli durumlarda potansiyel hizmet ömrünü incelemek ve dayanıklılık tasarımında ve performans dayalı spesifikasyonlarda kullanılacak sağlam modellerin temelini oluşturmak için kullanılabilir. Ayrıca zamanla, etkileşimleri hesaba katmak için başka değişkenler eklenebilir. Daha sonra, istatistiksel veriler modelleri geliştirmek ve küresel iklim değişikliği döneminde bu dayanıklılık olgusunun etkilerini anlamamıza katkıda bulunmak için kullanılabilir.

Penttala (1998), gözenek sularındaki basınçların donma ve çözülme döngüsü sırasında betonda ölçülen sıcaklık ve bağıl nem verilerinden türetilbileceği termodinamiğe dayanan bir teori üretmiştir. Gözenek suyu miktarı biliniyorsa, beton yapılarıdaki basınçlar hesaplanabilir. Teorik olarak, gözenek boyutu dağılım verilerine gerek yoktur. Termodinamiğe dayanan bu teoriye göre, ilk indüklenen buz kütlelerine doğru gözenekli su hareketlerinin temel nedeni, buz ile buz çevresindeki küçük gözeneklerdeki donmamış gözenekli su arasındaki kimyasal potansiyel farkıdır ve ozmotik basınçların sadece küçük etkisi bulunmaktadır. .

0 °C ile -20 °C arasında kapiler suda, -20 °C ile -60 °C arasında yoğunlaşmış suda ve -60 °C ile -120 °C arasında yüzey tabakasında olan özel donma olayları vardır. Donma-çözülme hasarında en büyük etken, buzun yaklaşık % 9 genişmesidir. Betonun kendine özgü boşluk dağılımı nedeniyle de bazı etkiler üst üste gelebilir. Temelde 2 grup hasar oluşumu vardır. Birincisi makro gerilmeler ve agrega ile çimento hamurunun farklı ısıl davranışları, sıcaklık

gradyenleri, konsantrasyon farklılığı gibi olaylarla ilgilidir. İkincisi ise suyun geçişi ve sertleşmiş çimento hamurundaki gerilmeler ve mikro etkiler yüzünden oluşan hasar ile ilgilidir (Setzer 1997a).

ASTM C 666 standardı dayanıklılık faktörü (D)'yi kullanarak şu şekilde hesaplanan bir hasar kriteri geliştirmiştir:

$$D = \frac{(RDME)N}{300} \quad (20)$$

Burada N, önerilen dinamik elastisite modülünün kritik değerine ulaşmak için gerekli olan donma-çözülme döngülerinin sayısı, (RDME; eşik değeri, örneğin ASTM C 666' ya göre % 60). ASTM C 666' nın belirlediği 300 donma-çözülme döngüsü tamamlandıktan sonra RDME bu kritik değerden daha yüksek kalırsa, N 300 olarak alınabilir. Böylece RDME şu şekilde hesaplanır:

$$RDME = \frac{Vn^2}{V_0^2} \times 100 \quad (21)$$

Burada  $V_n$  ve  $V_0$ , sırasıyla,  $n$  ve sıfır donma-çözülme döngülerindeki ultrasonik boyuna dalga hızıdır.

RILEM TC 176' nın tavsiye ettiği betondaki iç hasarı bağıl ultrasonik dalga iletim süresi (UPTT) ile değerlendirmektir. Bununla birlikte, UPTT kullanmak yerine, aşağıdaki Denk. (22)'de verildiği gibi eşdeğer hız, yani göreceli hız da kullanılmaktadır. Bu bağıl hız, RV şu şekildedir.

$$RV = \frac{Vn}{V_0} \quad (22)$$

Bu standartlara göre, hasarı değerlendirmede başarısızlık kriterleri aşağıdaki Tablo 1'de özetlenmiştir.

**Tablo 1.** Betonun Dona Dayanıklılığının Değerlendirilmesinde Kullanılan Bozulma Kriterleri

RILEM TC 176 kriteri	Hasarsız	Muhtemelen Hasarlı	Hasarlı	Şiddetli Hasarlı
Relatif hız	> %100	%90 - 100	%80 - 90	< %80
ASTM C 666 kriteri	Don Direnci	Pasif don direnci	Kanıtlanmamış Don Direnci	Don Direnci Yok
Durabilite faktörü D (N=300)	≥ % 80	≥ % 60	< % 60	≤ % 40

### Donma-çözülme probleminin değerlendirilmesi

Donma-çözülme dayanıklılığının değerlendirilmesi için aşağıdaki etkilerin dikkate alınması gerekmektedir.

i-) Hacim ve Sıcaklık İlişkisi: Belirli bir durumda hacim ve sıcaklık arasındaki ilişki, yüksek termal genleşme katsayısına sahip malzemeler için önemlidir. Bir durum değişikliği sırasında meydana gelen hacim değişikliği, betondaki suyun donması durumunda hacminin yaklaşık %9 oranında artması nedeniyle daha da fazla ilgi çekmektedir (Neville 1995). Donma işlemi kılcal gözenek yapısı içinde başlar. Gözenek suyunun hacim artışı, doymuş beton için endişe vericidir, ancak donma-çözülme hasarı ek faktörlerle daha da artmaktadır. Böyle bir faktör, osmotik basınç etkisiyle büyüyen buz kristallerine doğru suyun akmasıdır (Powers 1975).

ii-) Çözünen madde konsantrasyonunun yeniden dağılımı: Kılcal gözenek suyunda çözünen maddeler arasında, özellikle alkaliler ve tuzlar bulunmaktadır. Sıcaklık donma noktasının altına düştükçe büyüyen buz kristalleri saf sudan oluşur. Bu durum, çözünen maddeleri donmamış suya doğru yönlendirir. Bu su hem mevcut çözünenleri hem de donmuş saf sudan gelenleri içerir. Dolayısıyla bu sudaki konsantrasyon gittikçe artar. Buz kristallerinin bir kılcal gözenek içinde daha fazla büyümesinin iki etkisi vardır. İlk olarak, buz hacmi arttıkça, suyu kılcal damardan jel boşluklarına doğru iter. İkinci olarak, konsantrasyon yoğunluğunda sürekli bir artış oluşur. Elde edilen osmotik basınç sonunda önemli bir itici güç haline gelir ve jel gözeneklerindeki donmamış su, gelişmekte olan buz kütesine doğru yayılır. Bu nedenle, tamamen doymamış beton bile risk altındadır. Sıcaklık düştükçe buz kütesinin kendi kendine beslenmesi, gözenek boşluğunun genişlemesine ve potansiyel olarak zararlı genişleme basınçlarının gelişmesine neden olabilir (Helmuth 1960).

iii-) Boşluklardaki suyun donma noktası: Bir sıvının donma noktası sıcaklık ve basıncın bir fonksiyonudur. Betonun gözenek yapısı çok çeşitli çaplar içerir ve bu da donma olayını etkiler. En kaba kılcal gözeneklerde buz oluşumu başlarken, C-S-H içindeki bitişik çok küçük çaplardaki jel gözeneklerindeki su başlangıçta donmamış olarak kalır. Donma noktası ile gözenek yarıçapı arasında termodinamik bir ilişki vardır, çünkü gözenek duvarlarının yüzey enerjisi su moleküllerinin adsorpsiyonuna ve dolayısıyla gözenek suyunun kimyasal potansiyelinin azalması ile donma noktasının düşmesine yol açar. Gözenek yüzeyinde ince bir adsorbe su filmi gözenekte buz oluşuktan sonra bile donmadan kalır ve gözeneklerin spesifik yüzeyi ne kadar büyük olursa donma noktası o kadar fazla düşer. Yarıçapı 5 nm veya daha az olan gözenekler -20 °C' nin üzerindeki sıcaklıklarda donmamış olarak kalabilir ve gözenek suyunun sadece üçte ikisi ancak -60 °C de donabilir (Sellevold and Bager 1980; Pigeon ve Pleau, 1995). Stark and Ludwig (1997), su kalitesinin betonun donma direnci üzerinde önemli bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Jel gözeneklerindeki suyun -78 °C'nin üzerinde donmadığı tahmin edilmektedir. Bu nedenle, doymuş bir çimento hamuru donma koşullarına tabi

tutulduğunda, büyük boşluklardaki su buza dönüşürken, jel gözenek suyu aşırı soğutulmuş bir durumda sıvı su olarak var olmaya devam eder (Mehta 2006).

iv- Akış ve Basınç: Buzun, oluştuğu sudan yaklaşık % 9 daha büyük bir hacme sahip olması, buz kristalleri betonda oluşmaya başladığında suyun zorla hareket etmesine yol açar. Boşluk dolduruluncaya kadar saf sudan bir buz kütlesi oluşur. Buz hareketli bir cephe oluşturur ve suyu önünden iter. Akış bir basınç başlığı altında gerçekleşir ve akış direnci, akış yolunun uzunluğu ile orantılı olur. Böylece, yetersiz gözenek hacmi nedeniyle akışın engellendiği durumlar ortaya çıkabilir. Akıma karşı direnç hidrolik bir basınç geliştirir. Bu geniş basınçlar betonun gerilme mukavemetinin aşıldığı ve çatlakların geliştiği bir seviyeye ulaşabilir. Ek olarak, donma-çözülme döngüleri sırasındaki su hareketi, kılcal suyun mikro çatlaklara girmesine neden olabilir. Sonraki dondurma döngülerinde, bu su bu çatlakların çoğalmasına neden olarak zaman içinde önemli kümülatif hasara yol açabilir (Pigeon and Pleau 1995).

### **Donma-Çözülme Direncine Etki Eden Faktörler**

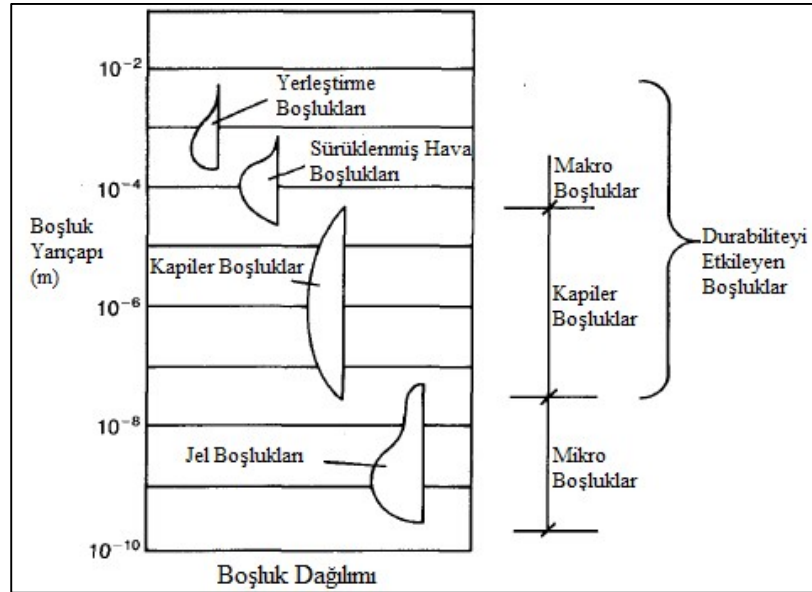
Zararlı donma-çözülme davranışını etkileyen dört anahtar faktör, gözeneklilik/geçirgenlik, agrega özellikleri, nem durumu ve iklim koşullarıdır. Ayrıca beton yol yapılarında, buz çözücü tuzlar da etkili faktörlerdendir. Donma-çözülme çevrimlerine dayanıklı beton üretiminde uygunluk parametreleri şunlardır: hava içeriği, boşluk düzeyi, spesifik yüzey, mukavemet kaybı için sınır değerler ve çimentolu malzemelerle etkileşim. Bu hususları daha ayrıntılı olarak tartışmadan önce, hava sürüklenmesi tek başına, donma-çözülme koşullarındaki önemli bozulmaya maruz kalan agregalarla yani donma-çözülme çevrimlerine direnemeycek yapıda olan agregalarla yapılan betonun performansını artırmadığı unutulmamalıdır (Pigeon and Pleau 1995; Anonymous 2008). Ayrıca belirtmek gerekir ki iyi bir kürlenme iyi beton için temel bir gerekliliktir. Betonun başlangıç kürü, dayanıklılık açısından hayati öneme sahiptir. Olgunlaşmamış beton, nispeten yüksek kılcal gözenekli su içeriği ve çok düşük gerilme mukavemeti nedeniyle donma hasarına karşı çok hassastır (Anonymous 2008).

Betonda donma-çözülme olayını taze betonda ve sertleşmiş betonda olmak üzere iki kısımda incelemek gerekir. Dona maruz kalan beton eğer henüz priz almamışsa, karma suyu betondaki hacim artışına bağlı olarak donar. Böylece su kimyasal reaksiyonlar için kullanılamaz betonun prizi ve buna bağlı olarak sertleşmesi gecikir (Neville 1995). Taze betonun (çok yeni yerleştirilmiş beton, çok az mukavemete sahip olması veya hiç mukavemete sahip olmaması durumunda) başlangıçta donmasına izin verildiği ve daha sonra çözüldüğü zaman, betonun yeniden karıştırılmasıyla çok fazla güç kaybı olmadan sertleştiği ve priz aldığı görülmüştür. Hatta Sovyetler Birliği'nin bu uygulamayı Sibirya'daki beton yapıların inşası için kullandığı düşünülmektedir (Suprenant 1985). Taze haldeyken donup çözünen betonda

dayanım kaybı çok az olmasına rağmen, donan karışım suyu genişleceği için tekrar yapılan karıştırmanın yeterli olmaması durumunda, betonda bulunan boşlukların hacminin daha da artmasına yol açacağından, dayanımın düşmesi de mümkün olabilir. Başka bir çalışmada ise betonun sıcaklığının 0 °C iken hemen hemen tüm kimyasal reaksiyonların durduğu, dökümden sonraki 3 saat içinde taze beton donarsa, 28 günlük basınç dayanımı %20-40 oranında düşebileceği belirtilmiştir (Zhang *et al.* 2019). Betonun erken yaşlarda donma-çözölmeye karşı dayanıklı olması için kritik yaş ve kritik dayanım değerlerini sağlaması gerekir. Kritik yaş betonun ilk donmasının betona zarar vermeyeceği yaşı ifade eder. Kritik dayanım ise betonun ilk donma esnasında zarar görmeyeceği minimum dayanımdır. TS 1248'e (2012) göre betonun en azından 4 MPa basınç dayanımına ulaşınca dek donmasının engellenmesi gerektiği belirtilmiştir. İyi hazırlanmış betonun 3 günde bu dayanım değerine ulaşabileceği belirtilmiştir.

### ***Porozite ve permabilite***

Beton yapıların dayanıklılığını etkileyen neredeyse tüm kimyasal ve fiziksel süreçlerde, iki baskın faktör söz konusudur: gözenekler ve çatlaklar içinde suyun transportu. Gazların, suyun ve çözülmüş çeşitli zararlı maddelerin taşınması ve bağlanma mekanizmaları önemlidir. Taşınmanın hızı, boyutu ve etkisi gözenek yapısına, çatlakların büyüklüğüne ve yüzeyin mikro yapısına bağlıdır (Anonymous 2001). Şekil 34'de betonda bulunan boşluk çaplarının ölçüleri verilmiştir.



**Şekil 34.** Boşluk-boyut dağılımı (Baradan vd. 2012; Şahin 2013)

Gözeneklilik ve geçirgenlik orantılı olarak bağlantılı değildir. Her ne kadar yüksek geçirgenlikli beton genellikle çatlatılmış olsa da, yüksek gözenekli betonun, betonun doymun olmadığı varsayılırsa buzun genişlemesi için emniyet valfleri sağlama avantajına sahip

olduğundan ilginçtir. Bu, bir kontrol önlemi olarak hava sürüklenmesinin temelidir. Düşük geçirgenlikli betonlar iki bakımdan faydalıdır. Betonun sızdırmaz oluşu, sertleştirilmiş betonun gözenek yapısına dış kaynaklardan girebilen serbest su miktarını azaltır. Ek olarak hidrate beton, normal olarak karşılaşılan sıcaklık aralıklarında donabilen veya buz oluşumunu beslemek için serbest su olarak tarif edilen minimum miktarda su içerir (Richardson 2007).

Gözenek çapı suyun donacağı sıcaklığı etkilediği belirtilmişti (İri kılcal gözeneklerdeki su 0 °C' ye yakın donarken, daha ince gözeneklerdeki su -40 °C' lere veya daha düşük sıcaklıklara kadar donmayabilir (Setzer 1999). En büyük gözeneklerdeki su, belirli bir sıcaklığın altında ilk buzu meydana getirir. Sıcaklıktaki daha fazla düşüş, kılcal boşluklardaki suyun donmasına neden olur, ancak jel gözenek suyu donmadan kalır. İçine atılan suyun kaçabileceği alanların hacmi ve yakınlığı hasara karşı direnci büyük ölçüde etkiler. Bu nedenle, yüksek gözeneklilik ve düşük geçirgenlik arasında bir denge gereklidir (Neville 1995). Aşağıdaki bağıntılarda Denklem (23,24,25) boşluk çapı donma sıcaklığı ilişkisi termodinamik açıdan incelenmiştir:

$$\Delta\mu \approx \Delta T \times \Delta S_{fv} \quad (23)$$

Burada,  $\Delta\mu$  kimyasal potansiyel,  $\Delta T$  sıcaklık farkı ve  $\Delta S_{fv}$  füzyonun molar entropisidir.

$$\Delta S_{fv} = (S_L - S_C) / V_C \quad (24)$$

Burada,  $S_L$  sıvının molar entropisi,  $S_C$  kristalin molar entropisi ve  $V_C$  kristalin molar hacmidir.

Kristalin büyüme ve büzülmesi olmaksızın sıcaklığı (entropi sabit);

$$T = T_m - \frac{\gamma_{CL} + K_C}{\Delta S_{fv}} \quad (25)$$

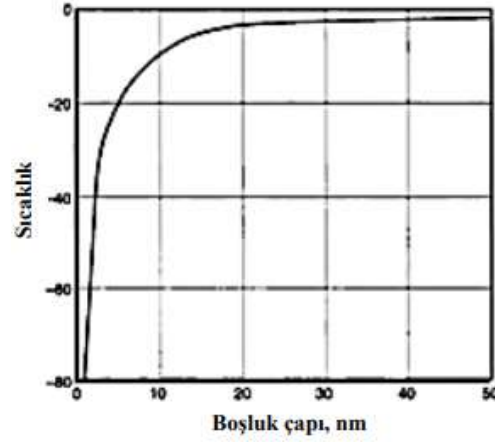
Burada,  $T_m$  kristalin ergime sıcaklığı,  $\gamma_{CL}$  kristal/sıvı arayüzey özgül enerjisi ve  $K_{CL}$  kristal/sıvı arayüzey eğrilik yarıçapıdır. Küre için  $\Rightarrow K_{CL} = 2/(r_p - \delta)$ . Örneğin; kristal ve boşluk duvarı arasındaki sıvı film tabakası kalınlığı ( $\delta$ ) = 0,9 nm,  $\gamma_{CL} = 0,04 \text{ J/m}^2$ ,  $\Delta S_{fv} = 1,2 \text{ J/(cm}^3 \cdot \text{K)}$  olmak üzere aşağıdaki sonuçlar elde edilir.

$$r_p = 33 \text{ nm } \Delta T = 2^\circ \text{C}$$

$$r_p = 13 \text{ nm } \Delta T = 5^\circ \text{C}$$

$$r_p = 7 \text{ nm } \Delta T = 10^\circ \text{C}$$

Buradan, boşluk yarı çapı küçüldükçe buzun ergime noktasının azaldığı görülmektedir (Şahin 2013). Kapiler boşluk çapı ile bu boşluklarda buz oluşumunun meydana geldiği sıcaklık arasındaki ilişki Pigeon and Pleau (2006) tarafından yapılan çalışmada Şekil 35' de verilmiştir.



**Şekil 35.** Kapiler boşluk çapı donma sıcaklığı ilişkisi (Pigeon and Pleau 2006)

Betonun donma döngülerine karşı hassasiyeti betonun doygunluk derecesinden büyük ölçüde etkilendiğinden, yapının ilk tasarımında su alımını en aza indirmek için önlemler alınmalıdır. Yapının geometrisi iyi drenajı teşvik etmelidir. Duvarların üst kısımları ve tüm dış yüzeyler eğimli olmalıdır. Su birikintilerinin oluşumuna elverişli düşük noktalardan kaçınılmalıdır. Ağ delikleri açıkta kalan betonun yüzeyinde boşalmamalıdır. Yüksek zeminden drenaj beton duvarların üstünden veya yüzünden akmamalıdır (Anonymous 2008).

#### ***Agrega karakteristikleri***

Donma-çözülmeyle ilişkili problemler genellikle betonun çimentolu matrisinde ortaya çıkar, ancak doygun durumda bulunan gözenekli agregalar da donma çözülme çevrimlerinden hasar görürler. Fakat aynı zamanda gözenekli agregalar, buz oluşumu sırasında ortaya çıkan artan basınca karşı koyduğu ve suyun donması esnasındaki hacim artışını karşılayabilecek ihtiyaç duyulan bağımsız boşlukları barındırdığından faydalıdırlar.

Agreganın don eylemine nasıl tepki verdiğiyle ilgili olarak, çimento hamuru matrisinde sürüklenmiş hava içeren bir beton hala hasar görebilir. Doymuş bir çimento hamurunun dondurulması üzerine iç basıncın geliştirilmesinin altında yatan mekanizma diğer gözenekli cisimlere de uygulanabilir; buna belirli çörtler, kumtaşları, kireçtaşları ve şeyller gibi gözenekli kayalardan üretilen agregalar dahildir. Tüm gözenekli agregalar donma hasarına duyarlı değildir; donma-çözülme döngülerine maruz kaldığında agreganın parçacığının davranışı, öncelikle gözeneklerin boyutuna, sayısına ve sürekliliğine (yani gözenek boyutu dağılımına) ve geçirgenliğe bağlıdır (Mehta 2006). Belirli bir gözenek boyutu dağılımı, geçirgenlik, doygunluk derecesi ve donma oranı ile bir agreganın büyük parçacıkları hasara neden olabilir, ancak aynı agregadaki daha küçük parçacıklar zarar vermeyebilir. Agreganın tipi için tek bir kritik boyut yoktur, çünkü bu agreganın donma hızına, doygunluk derecesine ve geçirgenliğine bağlı olacaktır. Geçirgenlik ikili bir rol oynar: birincisi, doygunluk derecesini veya belirli bir sürede



suyun emilme hızını belirler. İkincisi, suyun donma sırasında agregadan dışarı atılma hızını (ve dolayısıyla hidrolik basınç gelişimini) belirler. Genel olarak, bir betonda kritik boyuttan daha büyük agregalar mevcut olduğunda, donmaya parça kopmaları (pop-out) eşlik eder, yani, agrega parçacığının bir kısmının betonda kaldığı ve diğer kısmının pullanarak düştüğü görülür. Don etkisine maruz kalan beton kaplamalarda, D-çizgisi olgusundan bazı kumtaşı veya kireçtaşı agregalarının sorumlu olduğu düşünülmektedir (Mehta 2006).

Agreganın boyutunun küçülmesi ile don direncinin arttığı savunulabilir. Donma süresini etkileyen faktörlerin başında agreganın toplam porozitesi, boşluk boyut dağılımı ile çevresindeki matrisin permabilitesi ve kalınlığı gelmektedir (Öztütüncü 1992). Verbeck ve Landgren (1960), çimento hamuru ile karıştırılmadığında, doğal kayanın donma çözülme direncinin boyutunun azalması ile arttığını göstermiştir. Dolayısıyla kayaların zarar görmeden dondurulabileceği kritik bir boyutun olduğunu belirtmişlerdir. Bazı kayaçların kritik boyutunun 1/4 inç (6 mm) kadar küçük olabileceğini göstermişlerdir. Bazı agregaların (granit, bazalt, diyabaz, kuvarsit ve mermer gibi) donabilir su için kapasiteleri o kadar düşüktür ki, parçacık boyutuna bakılmaksızın, donma meydana geldiğinde gerilme üretmezler (Anonymous 2008). Agregada bulunan daha büyük gözenekler genellikle tamamen suyla dolmaz, bu nedenle donma nedeniyle hasar meydana gelmez. Ayrıca çok ince gözeneklerdeki su kolayca donmayacağı durumunda da hasar oluşmaz. İnce agrega genellikle problem değildir, çünkü parçacıklar kritik boyutun altında olacak kadar küçüktür ve çevresindeki çimento hamuru içindeki sürüklenen hava etkili bir koruma seviyesi sağlayabilir (Karakoç 2010).

Ortalama hafif agrega çapının küçülmesiyle betonun donma-çözülme dayanıklılığının arttığı belirtilmiştir. Bazı araştırmacılar hafif agregalı betonlar önemli miktarda su emmesine rağmen, donma-çözülme olayına karşı dayanımının yüksek olacağını belirtmiştir. Bu durumun, hafif agreganın doymuş olmayan çok sayıda gözeneğe sahip olmasından dolayı, zarar görmeden gözeneklerinde mevcut buzun genişlemesine imkân vermesinden ileri geldiğini düşünmektedirler (Karakoç 2010). Fakat bazı araştırmacılar ise şistler ve hafif agregalar gibi emici agregalar kullanılması durumunda beton sürekli ıslak bir ortamda ise, iri agrega doymuş hale geleceğinden betonun hasara uğrayacağını belirtmişlerdir (Klieger ve Hanson 1961). Parçacıklar donma sırasında suyu dışarı attığında iç basınç ortaya çıkar ve bu basınç parçacıkları ve matrisi parçalayabilir. Parçacıklar beton yüzeyine yakınsa, yüzeyden parça kopmaları (popout) gözlenir.

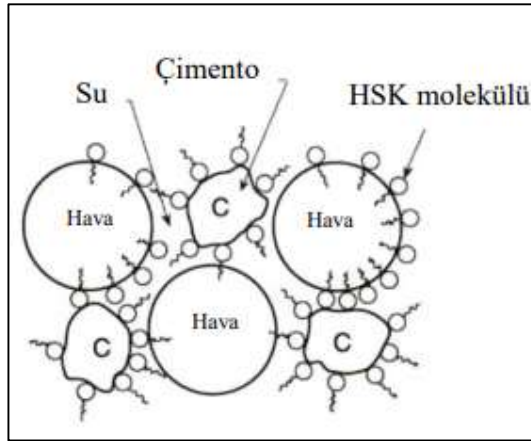
Agrega-çimento ara yüzeyinde (Interfacial Transition Zone= ITZ; arayüzey geçiş bölgesi) oluşan mikro çatlakların büyüklüğü bazı kaynaklarda (Mindess et al. 2003) yaklaşık 20-40 µm iken, bazı kaynaklarda (Schulson 1998; Mehta and Monteiro 1994) ise 30-50 µm'dir.

Bu geçiş bölgeleri oluşan mikro çatlaklar nedeniyle betonun özellikle durabilitesini etkileyen en zayıf noktalarıdır demek yanlış olmaz. Çimento matrisin elastisite modülünün agreganın elastisite modülünden küçük olması, çimento hamuru ve agregada arasındaki ısıl genişleme uyumsuzluğu ve çimento hamurunun rötresinin agregada tarafından sınırlandırılması bu çatlakların oluşmasının temel sebepleridir (Baradan vd. 2012).

Normalde, hidrasyon reaksiyonu tarafından üretilen ısı betondaki agregada kuruma ve buharlaşmalara neden olur dolayısıyla sertleşme sürecinin sonuna doğru agregada kritik bir doygunluk durumunda olmaz. Bu nedenle ancak dış kaynaklardan betona su girmesi nedeniyle agregalar kritik doygunluk seviyesine ulaşabilirler.

### ***Hava sürükleyici katkı (AEA)***

Beton içinde oluşan hava kabarcıkları iç basınçtan dolayı büyümekte ve beton yüzeyine ulaştığında ise bu basınç etkisiyle yok olmaktadır. Hava sürükleyici kimyasallar suyun yüzey gerilimini düşürerek kabarcık oluşumunu kolaylaştırmakta ve mekanik deformasyonlara karşı daha kararlı hale getirmektedirler (Nagi *et al.* 2007). Şekil 36' da görüldüğü gibi bu hava boşluklarının stabilitesinin kimyasal katkının hidrofilik özellikteki baş kısmının çimento tanelerine tutunmasıyla sağlandığı belirtilmektedir (Şahin 2013).



**Şekil 36.** AEA moleküllerinin hava, su ve çimento tanelerine tutunmaları.

Betona AEA kimyasal maddeleri ilave edilerek suyun ilerleme hızı ve hidrolik basıncın değeri düşürülmekte ve betonun dondayanıklılığı artırılmaktadır. Ancak yapay olarak oluşturulan bu hava küreciklerinin çok ufak çaplı, birbirinden tamamen ayrı olmaları ve kütle içinde homojen dağılmaları gerekir (Akman 1992). Çimento hamuruna az miktarda belirli hava sürüklenme maddeleri ekleyerek (örneğin, çimento ağırlığının yüzde 0,05'i) 0,05 ila 1 mm'lik kabarcıklar dahil etmek mümkündür (Mehta 2006). Sürüklenmiş havanın etkinliği oluşturduğu boşluk sisteminin büyüklüğüne, sayısına ve sürekliliğine bağlıdır (Al-Akhras 1995). Hava sürüklenmiş betonlarda donma sırasında suya doygun boşluklardaki gerilmeye bağlı olarak

ilerleyen çatlaklar sürüklenmiş hava kabarcıklarına rastladığında gerilme yok olacağından hasarın etkisi ve hızı azalmaktadır (Richardson 2007).

Birbirinden bağımsız ve düzenli bir şekilde sürüklenen hava boşlukları hidrolik ve osmotik basıncın oluşmasına veya büyümesine engel olurlar. Hava içeriği maksimum agrega büyüklüğüne bağlı olarak %4 ile %8 arasında ve hava boşluklarının büyüklüğü 0,05-1,25 mm arasında olmalıdır (Mindess *et al.* 2003). Çok az sürüklenen hava çimento hamurunu donma çözülmeye karşı koruyamaz. Çok fazla hava sürüklemek ise dayanımı düşürecektir.

Karıştırma enerjisi önemli bir rol oynar. Karıştırma hızı ne kadar yüksek olursa, hava içeriği o kadar artar. Karıştırma süresi ne kadar artarsa, hava içeriği o kadar azalır. Vibrasyon hava içeriğini azaltır (Hazaree 2007).

Hava sürüklenmiş beton, beton karıştırılması esnasında beton mikserine veya çimentoya veya her ikisine eklenen hava sürükleyici bir katkı maddesi kullanılarak üretilir. Elde edilen hava içeriği, kullanılan malzemelerin özellikleri (çimento, kimyasal katkıları, agregalar, puzolanlar), karışım oranları, mikser tipleri, karıştırma süresi ve sıcaklık gibi birçok faktöre bağlıdır. Sertleşmiş betondaki hava boşluğu sisteminin hava içeriği ve diğer özellikleri mikroskopik olarak belirlenebilir (ASTM C 457). ACI 212.3R, dayanıklılık için gereken hava boşluğu özelliklerini listeler (Anonymous 2008).

### ***Buz çözücü tuzlar***

Beton kaplamalardaki buzu tuz (sodyum klorür, kalsiyum klorür veya her ikisi) yoluyla eritme uygulaması yaygınlaştığında, bu malzemelerin çukurlaşma veya pullanma şeklinde yüzey parçalanmasına neden olduğu veya bu süreci hızlandırdığı da öğrenildi. Buz çözücü maddelerin betona zarar verdiği mekanizma kimyasal olmaktan çok fizikseldir. Mekanizma, dondurma sırasında, esas olarak hamur içinde normal don etkisine benzer şekilde, yıkıcı ozmotik ve hidrolik basınçların ortaya çıkmasıdır. Ancak daha şiddetlidir. Betondaki buz çözücü konsantrasyonu, bu basınçların geliştirilmesinde önemli bir rol oynar. Verbeck and Klieger (1957), buz çözme çözeltilerinin orta derecedeki konsantrasyonlarında (% 3 ila 4) bile betonda çok büyük miktarlarda pullanma olduğunu göstermiştir. Litvan (1976) yaptığı çalışmada buz çözücü maddelerin betonda yüksek derecede doyumluğa neden olduğu ve asıl zararlı etkinin bu olduğu sonucuna varmıştır.

ASTM C 672, belirli bir beton karışımının buz çözücü kimyasalların varlığında pullanmaya karşı direncini belirler. Buz çözücülere maruz kalan betonda sürüklenen havadan fayda, normal don etkisiyle aynı şekildedir. Laboratuvar testleri ve saha deneyimleri, hava sürüklenmesinin buz çözücülere karşı direnci büyük ölçüde geliştirdiğini ve ağır koşullar

altında sürekli olarak pullanmaya dayanıklı kaplamalar inşa etmek için gerekli olduğunu doğrulamıştır (Anonymous 2008).

### ***Su/çimento oranı***

Genel olarak, belirli bir hidrasyon derecesi için su/çimento oranı ne kadar yüksek olursa veya belirli bir su/çimento oranı için hidrasyon derecesi o kadar düşükse, hidrate çimento hamurundaki büyük gözeneklerin hacmi o kadar yüksek olacaktır. Kolayca dondurulabilir su büyük gözeneklerde bulunduğundan, belirli bir donma sıcaklığında, donabilir su miktarının yüksek su/çimento oranları ile ve erken kürlenme çağlarında daha fazla olacağı söylenebilir. Belirli bir hidrasyon derecesi için, toplam kapiler boşluk hacmi en başta su/bağlayıcı oranına bağlıdır. Su/çimento oranı arttıkça, kapiler boşluklar ve donabilen su artacaktır. Böylelikle donma-çözülme dayanıklılığı azalacaktır (Al-Akhras 1995; Schulson 1998). Ayrıca betonun donma-çözülme etkisine dayanıklı olması için su/bağlayıcı oranının ez fazla 0.45 olması gerektiğini ifade etmiştir Al-Akhras (1995). Donma-çözülme tekrarları ve sülfatlı suların etkisindeki betonlarda hamur fazında bulunan kılcal boşluklardaki su esas etken olmaktadır (Tola 2000). Marchand *et al.* (1999) yaptığı çalışmada, su/bağlayıcı oranı 0,45, 0,35 ve 0,25 olan betonların -20 °C’de donabilir su miktarlarını sırasıyla %22, 10 ve 3 olarak tespit etmiştir (Savaş 1999).

Donmaya dayanıklı normal ağırlıktaki betonun; ince kesitler (köprü tabliyeleri, korkuluklar, bordürler, eşikler, çıkıntılar ve süs işleri) ve buz çözücü tuzlara maruz kalan betonlar, su/çimento oranı 0,45; diğer tüm yapıların ise, 0,50 su/çimento oranına sahip olması gerekmektedir (Anonymous 2008). TS 802 (Anonim 2016) ve TS EN 206-1 (Anonim 2014) standartlarında donma çözülmeye dirençli beton üretimi için: Zararlı donma çözülmeye etkisine sahip etki sınıfları belirlenmiştir. Bunlar ve bu sınıflarda üretilecek beton tasarımları için belirlenen su/çimento oranları Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** TS EN 206-1’ e Göre Donma Çözülme Etkisine Maruz Kalacak Betonlar İçin Belirlenen Çevresel Etki Sınıfları

<b>Sınıf</b>	<b>Çevrenin Tanımı</b>	<b>Etki Sınıflarının Meydana Gelebileceği Yerler</b>	<b>Su/Ç</b>
XF1	Buz çözücü madde içermeyen suyla orta derecede doygun	Yağmura ve donmaya maruz düşey beton yüzeyler	0,55
XF2	Buz çözücü madde içeren suyla orta derecede doygun	Donmaya ve hava ile taşınan buz çözücü madde etkisine maruz yol yapılarının düşey beton yüzeyleri	0,55
XF3	Buz çözücü madde içermeyen suyla yüksek derecede doygun	Yağmur ve donmaya maruz yatay beton yüzeyler	0,50
XF4	Buz çözücü madde içeren su veya deniz suyu ile yüksek derecede doygun	Buz çözücü maddelere maruz yol ve köprü tabliyeleri, Buz çözücü tuz ihtiva eden su serpintisine doğrudan ve donma etkisine maruz beton yüzeyler, Deniz yapılarının dalga etkisi altındaki donmaya maruz bölgeleri.	0,45

### ***Mineral katkı kullanımı***

Çoğu uçucu kül ve doğal puzolan, katkı maddesi olarak kullanıldığında, betonun hava içeriği, mukavemeti ve nem içeriğinin benzer olması şartıyla betonun dayanıklılığı üzerinde çok az etkiye sahiptir. Bununla birlikte, kanıtlanmamış malzemeler kullanılmadan önce uygun bir araştırma yapılmalıdır. Uçucu küller ve doğal puzolanlar ASTM C 618 ile uyumlu olmalıdır. Öğütülmüş tanecikli yüksek fırın cürufu ASTM C 989'a uygun olmalıdır. Avrupa ülkelerinde (Belçika, Hollanda, Fransa ve Almanya) bir asırdan fazla bir süredir deniz maruziyetleri de dahil olmak üzere şiddetli donma ve çözülme ortamlarına maruz kalan betonlarda yüksek fırın cürufu çimentolar kullanılmıştır ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Anonymous 2008).

### **Beton donma çözülmesi ile ilgili literatür araştırması**

Donma hızı, ortamdaki hava değişimi veya sıvıdaki sıcaklık değişim hızı veya malzemenin kendisindeki sıcaklık değişimi oranı olarak tanımlanabilir. Donma hızı, buz oluşum hızı ile karıştırılmamalıdır, ancak elbette, ikisi arasında bir ilişki vardır. Valore (1950), farklı donma-çözülme döngülerinin, farklı miktarlarda su ve sürüklenmiş hava içeren neme karşı korumalı beton silindirlerin hacmini (çap = 49 mm, boy= 183 mm) nasıl etkilediğini araştırmıştır. Yavaş dondurma olarak soğutma hızını 5.5 ° C/saat olarak belirlerken, -29 °C' lik sıcaklığa sahip bir banyoya daldırılan + 4,5 °C' lik bir numunenin soğuma hızını da hızlı dondurma hızı olarak kabul ederek deneylerini gerçekleştirmiştir. İki grup numuneden birincisinde; Su/Çimento oranını 0,53 ve %5,3 oranında sürüklenmiş hava alırken diğer grupta sürüklenmiş hava olmadan ancak % 2,5 doğal hava içeriği ile Su/Çimento oranını 0,56 olarak deneylerini gerçekleştirmiştir. Suyu doymuş örneklerin, beklenmedik bir şekilde, dondurma hızından bağımsız olarak bir donma-çözülme döngüsünden sonra hasara uğradığını görmüştür. Dinamik E-modülünün kaybının % 60 veya daha fazla olduğunu belirlemiştir. Kuru numunelerin, donma hızına bakılmaksızın hasar görmemiş olduğunu, kısmen doymuş numunelerin ise donma / çözülme hızına bağlı olarak daha küçük genleşmeler göstermiştir. Test edilen farklı donma ve çözülme kombinasyonlarından, en uzun dondurma sıcaklığına maruz kalan grubun (hızlı dondurma ve yavaş çözülme) en çok hasara uğradığını görmüştür.

Vuorinen (1969), numunenin + 20 °C ile 0 °C arasındaki sıcaklıktaki bağıl uzunluk değişimi ile nihai bağıl değişiklik arasındaki fark olarak tanımlanan 'dilatasyon faktörü' üzerinde donma hızının hiçbir etkisinin bulunmadığını savunmuştur.

Fagerlund (1977a), donma hızının (1,8 °C/saat - 6 °C/saat arasında değişen hızlarla deneylerini gerçekleştirmiştir) kritik doygunluk derecesi ( $S_{CR}$ ) üzerinde neredeyse hiçbir etkisi olmadığını bulmuştur. Donma hızının kritik değerin aşılmasının duyarlılığı üzerinde belirli bir

etkisi olmuştur. Yüksek donma oranlarında, beton biraz daha fazla hasar almıştır. Hava sürüklenmemiş ve su/bağlayıcı oranı 0,50, olan birinci grup ve %7,6 hava içeriğine sahip ve su/bağlayıcı oranı 0,57 olan iki grup nemden izole edilmiş beton numunelerle  $S_{CR}$ ' in belirlenmesini gerçekleştirilmiştir.

Fagerlund (1992) de yaptığı diğer çalışmasında (1977a) de bulduğu sonuçlardan yola çıkarak, donma hızının don hasarı üzerindeki etkisini kapsamlı bir analiz yaparak araştırmıştır. Gerçek hava gözenek mekanizmaları için  $S_{CR}$ ' in teorik bir hesaplamasına dayanarak 1,8°C/saat ile 6 °C/saat arasında artan bir donma oranının  $S_{CR}$  üzerinde sadece küçük bir etkisi olduğunu göstermiştir. Böylece deneysel bulgularını teorik olarak da doğrulamıştır. Bu çalışmasında ayrıca doygunluk derecesinin, donma oranı da dahil olmak üzere diğer faktörlerin çoğundan daha fazla etkili olduğunu göstermiştir. Donma hızının etkisinin  $S_{CR}$  üzerindeki etkisi açısından incelenmesi gerektiğini ve donma hızının etkisinin neme dayanıklı örnekler üzerinde testlerinin yapılması gerektiğini savunmuştur. Doymunluk derecesinin büyük etkisinin bir örneği olarak Fagerlund (1980), yaptığı başka bir çalışmasında ise doymunluğun  $S_{CR}$ ' e yakın olduğunda çok az miktarda (3 lt/m<sup>3</sup>) su ilave etmenin betonun don hasarı üzerinde olağanüstü etkileri olabileceğini bulmuştur, oluşan etki artan donma hızı oranında oluşan etkiden çok daha fazladır.

Pigeon and Lachance (1981), yaptıkları çalışmada kendilerinin geliştirdiği yeni bir test yöntemi olan kuru metot olarak adlandırdıkları 2 °C/saat' lik yavaş bir donma hızını, daha hızlı (12 °C/saat) ve yaş metot olan ASTM C 666 yöntemiyle kıyaslayarak kritik boşluk faktörünün ( $L_{CR}$  nasıl değiştiğini araştırmışlardır. Numuneler (su/bağlayıcı oranı 0,50 ve 0,60 olarak alınmış) 300 çevrimde ve % 100 bağıl nemde (su içinde değil) test edilmiştir. Hasar göstergesi olarak boy değişimi ve ultra sonik hız kullanılmıştır.  $L_{CR}$  yaklaşık 600 µm' olarak bulunmuştur. Bu değer ASTM 666-yöntemiyle elde edilen 200 - 250 µm' lik normal sınırdan çok daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.  $L_{CR}$ ' teki bu büyük farklılığın, Powers (1945) teorisinde olduğu gibi hidrolik basınç durumlarında, donma oranındaki farktan kaynaklandığını düşünmüşlerdir. ASTM testinde ve Pigeon / Lachance testinde farklı nem durumlarının etkisi belirgin şekilde yorumlanmamıştır.

Marchand *et al.* (1995) tarafından yapılan bir literatür çalışmasında kritik boşluk faktörü ile donma hızı arasında bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır. Çok "nemli" ASTM 666 kullanıldığında, kritik boşluk faktörü artan oranla azalmış gibi görünür, ancak başka bir test yönteminin kullanılması durumunda durum böyle olmayabilir. Laboratuvarda kullanılan donma oranının normalde doğal donma çözülme oranından önemli ölçüde daha yüksek olduğundan dolayı donma çözülme testlerinin sonuçlarının bir güvenlik marjı içerdiğini iddia etmişlerdir.

Literatürde en düşük sıcaklığın iç donma hasarı üzerindeki etkisi çok az araştırılmıştır. Marchand *et al.* (1995) ilgili verilerin eksik olduğuna işaret etmekle birlikte, ulaşılan en düşük sıcaklığın iç donma hasarı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını belirtmişlerdir. Pigeon and Pleau (1995), en düşük sıcaklığın etkisi tartışılrsa da, azalan donma sıcaklığı ile hasarın arttığını iddia etmişlerdir. Schulson (1998), donma kinetiğinin sıcaklığın büyüklüğünden daha önemli olduğunu düşünmektedir.

Düşük sıcaklık kalorimetresi, malzemelerde buz oluşumu ve erime çalışmaları için kullanılan güçlü bir araçtır ve bu nedenle malzeme donduğunda hasar süreci hakkında bilgi verir. Farklı sıcaklıkta eritilen su miktarı da gözenek boyutu dağılımını belirlemeyi mümkün kılar. De Fontenay and Sellevold (1980), bir Diferansiyel Taramalı Kalorimetre cihazı kullanarak oda sıcaklığında sertleşen ve 0,40 ile 0,70 arasında değişen su/bağlayıcı oranlarına sahip doymuş sertleşmiş çimento hamurunu test etmiştir. -55 °C' nin altında önemsiz miktarda buz oluştuğunu bulmuşlardır. Deneyle donma kısmı sırasında ısı akışı eğrisinde üç pik gözlemlenmiştir, yani yaklaşık -8 °C, -23 °C ve -40 °C' de, piklerin büyüklüğü su/çimento oranı arttıkça artmıştır. Araştırmacılara göre düşük su/bağlayıcı oranına sahip bir malzeme, buz çekirdeklenmesini imkansız kılan dar açıklıklara sahip gözenekler içermektedir. Bu nedenle bu gözeneklerdeki su, boyutlarına karşılık gelen sıcaklıktan daha düşük bir sıcaklıkta donacaktır. Erime işleminin -55 °C' den yukarı doğru sürekli olarak gerçekleştiği, ancak büyük kısmın 0 °C' ye yakın bir yerde gerçekleştiği bulunmuştur. Ayrıca, belirli bir sıcaklıkta oluşan buz miktarının çok fazla değişmediğini bularak farklı soğutma hızlarının etkisini test etmişlerdir.

Bager and Sellevold (1980a) araştırmalarını buharla sertleştirilmiş çimento hamurlarını içerecek şekilde yapmışlardır. Buharla kürlenmenin daha kalın bir gözenek yapısı oluşturduğu bilinmektedir. Bu, buharlaşabilir suyun % 60 ila 80' inin donabildiğini ve ilk buz oluşumu 0 °C' nin birkaç derece altında çekirdeklendiğini ve bunu iri gözenek yapısına sahip bir malzeme için beklenen bir sonuç olduğunu belirtmişleridir. -55 °C' lik bir sıcaklıkta donmamış su içeriğinin (g/g<sub>dry</sub>), su/bağlayıcı arttıkça donmamış su içeriğinin arttığını belirten önceki çalışmalarda elde edilen sonuçlardan farklı olarak, su/bağlayıcı oranından bağımsız olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, örnekleri farklı bağıl nemde tutmuşlardır ve daha sonra donabilir su miktarını belirlemişlerdir. Dondurulmamış su içeriğinin, başlangıçtaki nem içeriğinde bir azalma ile azaldığı, nem içeriği 20 °C' de % 60 nispi buhar basıncının altında olduğunda buz oluşmadığı bulunmuştur.

Bager and Sellevold (1980b) yaptıkları diğer çalışmada erime eğrisinden gözenek boyutu dağılımını hesaplamışlardır. Süper soğutma içermediği için erime eğrisi kullanılmıştır.

Hesaplamanın önemli sayıda basitleştirmeyi içermektedir. Bununla birlikte, bu gözenek boyutu dağılımını belirleme yöntemi, mevcut diğer yöntemlerden daha farklı değildir. Kalorimetre testine dayalı gözenek boyutu dağılımları bir civa penetrasyon testinin sonuçları ile karşılaştırıldığında, örnekler aynı şekilde ön işleme tabi tutulduğunda ikisi arasındaki korelasyonun daha büyük olduğu bulunmuştur.

Fagerlund (1973b), birleşik kalorimetre/dilatometre cihazı kullanarak çimento hamuru, harç ve ayrıca kil tuğla, beton, seramik gibi diğer yapı malzemeleri üzerinde de testlerini gerçekleştirmiştir. Her malzeme için birçok doygunluk derecesi araştırılmıştır. Hidrolik basınç teorisinde doygunluk derecesi, genleşme oranı ( $m/m.s$ ) ve buz oluşum oranı ( $m^3/m^3.s$ ) için hesaplanan verileri kullanılarak hidrolik basınç teorisinin doğrulanması için girişimlerde bulunulmuştur. Hidrolik basıncın genişleme nedeni olabileceğine dair bazı göstergeler bulabileceğini iddia etmiştir. Bununla birlikte, geçirgenliğin oluşan buz miktarıyla nasıl değiştiği bilinmediğinden, doğrulamanın zor olduğuna dikkat çekilmiştir.

Penttala (1998), dondurma sırasında örnek odasındaki bağıl nemi ve sıcaklığı ölçerek gözenek basıncını hesaplamının mümkün olduğu termodinamiğe dayanan bir teori türetmiştir. Teori daha sonra, Bager ve meslektaşları tarafından kullanılanla aynı tipte düşük sıcaklıkta bir kalorimetre kullanılarak buz oluşumu, rölatif nem ve boy değişimini aynı anda ölçerek test edilmiştir. Küçük numunelere monte edilen özel nemölçerler ile kalorimetre hücresinde bağıl nem ölçülmüştür.



## MATERYAL VE METOT

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler ile taze ve sertleşmiş beton deneyleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Tez kapsamında üretilen çimento esaslı kompozitin maksimum agrega tane çapı 1 mm'dir. Beton teknolojisinde 1 mm agrega boyutlu kompozitlere "harç" ismi verilmesine rağmen, literatürle aynı dili kullanmak adına, bu çalışmada da harç yerine "beton" kavramı tercih edilerek üretilen numunelere "3D beton" denilmiştir.

### Kullanılan Malzemeler

#### Çimento

Literatürden (Le *et al.* 2012a; Gosselin *et al.* 2016; Bos *et al.* 2016; Hambach *et al.* 2019) hareketle 3D beton için TS EN 197-1:2012 standardına göre üretilen Süper Beyaz - CEM I 52,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Bu çimento gri çimentoların çok ötesinde erken dayanım vermekte, özellikle prekast üreticilerinin öncelikli tercihi olmaktadır. Yapı kimyasalları sektöründe de hem üstün yapışma mukavemeti hem de yüksek beyazlığı ile tercih edilmektedir (Anonim 2020s). Kullanılan çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3'de verilmiştir.

**Tablo 3.** Çimentonun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Kimyasal Analiz (%)	Sonuçlar	Fiziksel Analizler	Sonuçlar %
SiO <sub>2</sub>	21,21	Başlangıç	110
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,86	Son	130
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,32	Priz Süresi - Dakika	%Su İhtiyacı
CaO	65,85		30
MgO	1,05		
SO <sub>3</sub>	3,51	Hacim Sabitliği (mm) (Le Chatelier)	1,0
Na <sub>2</sub> O	0,20	Özgül Ağırlık	3,04
K <sub>2</sub> O	0,49	(gr/cm <sup>3</sup> )	
Na <sub>2</sub> O Eşdeğer Alkali	0,55	İncelik	Özgül Yüzey
Kızdırma Kaybı	3,30		(Blaine) cm <sup>2</sup> /gr
Çözünmeyen Kalıntı	0,20		45micron Elek
Klor (Cl <sup>-</sup> )	0,01		1,0
Suda Çözünen Cr+6 (ppm)	0,80		bakıyesi %
		Y	85,5
		L	92,5
		a	-1,4
		b	2,9
<b>Klinkerin Minerolojik Kompozisyonu</b>	C <sub>3</sub> S >60	Beyazlık Derecesi*	
	C <sub>2</sub> S <25		
	C <sub>3</sub> A >10	Basınç Dayanımı	2. Gün 3. Gün 7. Gün 28. Gün
	C <sub>4</sub> AF <1	(Mpa)	37,0 43,0 50,0 60,0

\* Y: Beyazlık L: Parlaklık a: Yeşillik b: Sarılık

## Agrega

3D betonların reolojisi; maksimum agrega tane çapı, agrega şekli ve dağılımından büyük ölçüde etkilenmektedir. 3D beton karışımlarının iri agregadan ziyade ince agregalar kullanılarak üretilmesi vizkoziteyi artırmaktadır (Marchon *et al.* 2018). Bu bağlamda karışımlarda nozul ucundan geçebilecek büyüklükte olan 0-0,5mm ve 0-1 mm boyutlarında tane yoğunlukları, sırasıyla, 2,44 ve 2,49 olan iki grup silis kumu kullanılmıştır. Maksimum agrega çapının belirlenmesinde Ma *et al.* (2018)'de nozul çapının 1/10'undan küçük agrega kullanılması önerisi ve önceki çalışmaların birçoğunda 0-2 mm boyutlarındaki agregaların kullanılmış olması ile yapılan ön denemeler etkili olmuştur.

## Mineral katkı

Literatürde mineral katkı malzemelerinin 3D betonların performansları üzerinde olumlu etkisi olduğu belirtilmektedir (Le *et al.* 2012(a); Jeon *et al.* 2013; Hambach *et al.* 2019). Çalışmada mineral katkı olarak, EN 15167-1 (Anonymous 2006)'ye göre uygun olan beyaz renkli öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) kullanılmıştır. ÖYFC, Sabancı Holding bünyesinde bulunan Karabük KARÇİMSA Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilmiştir. Kullanılan ÖYFC'nun özellikleri Tablo 4'de verilmiştir. Tablodaki bilgiler üretici firmadan alınmıştır.

**Tablo 4.** Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Kimyasal Analiz (%)	Sonuçlar	Fiziksel Analizler %	Sonuçlar
SiO <sub>2</sub>	37,40	Priz Süresi - Dakika	Başlangıç 170
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,38		Son 230
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,30	Hacim Sabitliği (mm) (Le Chatelier)	0
CaO	30,93	İncelik	Özgül Yüzey 4183
MgO	7,21		(Blaine) cm <sup>2</sup> /gr
SO <sub>3</sub>	0,77		45micron Elek 1,3
Na <sub>2</sub> O	0,39		bakiyesi %
K <sub>2</sub> O	0,67		0,09 mm elek 0
TiO <sub>2</sub>	0,85		üstü%
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,58	Rutubet %	Max 1,00 0,10
S-2	0,31	Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2,88
Klor (Cl)	0,0160	<b>Dayanımlar</b>	7 gün 28 gün
(CaO+MgO)/SiO <sub>2</sub>	1,02	(40×40×160 mm prizma;	
CaO+MgO+ SiO <sub>2</sub>	75,54	%50 CEMI 42,5R+ %50	55,3 74,2
		ÖYFC)	

## Kaolin kili

Kalsine Kaolen, 1000 °C'de kontrollü ileri teknoloji ile ayrışma ve kalsilasyon işlemlerine tabi tutulmuş beyaz renkli, saf, ultra ince, mükemmel optik ve fiziksel özelliklere sahip yüksek performanslı bir endüstriyel mineraldir (Anonim 2020t). Tablo 5'de özellikleri

verilen ve NANOKİM firmasından elde edilen yüksek saflıkta kalsine kaolin kili su tutucu özelliği sayesinde şekil stabilitesini ve yazdırma kalitesini artırmaktadır.

**Tablo 5.** Kalsine Kaolin Kilinin Özellikleri

<b>Fiziksel Analizler</b>	<b>Sonuçlar</b>	<b>Kimyasal An. (Wt,%)</b>	<b>Sonuçlar</b>
Beyazlık (Whiteness) R457	93,5-94	SiO <sub>2</sub>	49-55
Parça büyüklüğü (Particle Size)(<2 µm, %)	83-86	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42-46
Ekran Kal. (Screen Residue(325Mesh, %)	0.005max	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,7max
Nem (Moisture (105°C, %)	0,5 max	TiO <sub>2</sub>	0,8max
pH (10%, Solid)	5.5-7.5	CaO	0,5max
Bir. Hac. Yoğ. (Bulk Density (Kg/L)	0,3-0,5	MgO	0,3max,
Özgül Ağırlık (Specific Gravity (g/cm <sup>3</sup> )	2,65-2,75	K <sub>2</sub> O	0,1max
Yağ Emme (Oil Absorption (g/100g)	50-60	Na <sub>2</sub> O	0,2max
		MoO	0,004max
		LOI	0,5max
		Quartz	1max

### **Mikrofiber**

Betonda, rötre ve çatlak oluşumunu azaltmak için polipropilen (pp) mikro fiberler kullanılmıştır. Kimyasal katkılarla birlikte BASF firmasından temin edilen MasterFiber M 100 ürünü, beton matrisi boyunca hızlı ve homojen bir şekilde dağılmak üzere tasarlanmış, yüksek çekme mukavemetli, yüksek elastisite modüllü ve ultra ince polipropilen elyafıdır. Lifler; 13~19 mm boyutlarda olup 0,91 kg/m<sup>3</sup> özgül ağırlığa, 480 MPa çekme gerilmesine ve 8,48 GPa elastisite modülü değerine sahiptir.

### **Kimyasal katkılar**

Çalışma kapsamında yapılan uzun süreli ön deneyler sonucunda karışımlar için birden fazla kimyasal katkı maddesi kullanılmasına karar verilmiştir. Aşağıda çalışma kapsamında üretilen 3D betonlarda kullanılan katkılarla ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiş olup üretici firmanın (BASF) yayınladığı kataloglarda yer alan ve katkıların teknik özellikleri ilgili verilen bilgiler tek bir tabloda (Tablo 6) gösterilmiştir.

*i- Viskozite düzenleyici:* Çalışmada 3D betonun ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik özelliklerini sağlaması ve işlenebilirliğini düzenlemesi için viskozite düzenleyici katkı olarak BASF MasterMatrix® SDC 100 (Akışkan Betonlar İçin Yüksek Performanslı Viskozite Düzenleyici Katkı Maddesi) ticari adıyla piyasada bulunan katkı maddesi kullanılmıştır.

*ii- Akışkanlaştırıcı:* Akışkanlaştırıcı olarak, yaygın kullanılan süperakışkanlaştırıcı beton katkıları ile karşılaştırıldığında yaş sistem püskürtme betonda daha yüksek oranda su

azaltmanın yanısıra daha uzun işlenebilirlik sürelerine imkân sağlayan ve ticari adı BASF MasterGlenium® T 803 (Yeraltı Yapılarında Kullanılmak Üzere Geliştirilmiş Betonun Uzun Süre İşlenebilirliğini Korumasına İmkân Sağlayan Hiperakışkanlaştırıcı Beton Katkısı) olan katkı maddesi kullanılmıştır. Polikarboksilik eter esaslı bu yeni nesil beton katkısı, 3D betonların genel özelliklerinin püskürtme betonlara benzemesi nedeniyle tercih edilmiştir.

*iii- Hidratasyon durdurucu:* BASF MasterRoc® HCA 20 (Yaş ve Kuru Sistem Püskürtme Beton, Çimento Enjeksiyonu ve Geri Dolgu (Grout) İşlerine Yönelik Çimento Hidratasyon Kontrol Sistemi) ticari adlı, sıvı, klor içermeyen ve çimentonun hidratasyon dinamiklerini kontrol edebilen bu katkı maddesi 3D betonların hidratasyonunun kontrolü için kullanılmıştır. Vizkozite düzenleyici katkının ve CEM I 52,5 R tipi çimentonun erken priz kazanma özelliği nedeniyle 3D betonlar ilk döküldüklerinde akışkan kıvamdayken dakikalar içerisinde sertleşmeye başlamaktadır. Bu nedenle baskı alınabilirlik süresini kontrol edebilmek için hidratasyon durdurucu katkı kullanılmıştır.

*iv- Priz hızlandırıcı:* BASF MasterRoc® SA 194 (Alkali İçermeyen, Yüksek Performanslı, Püskürtme Betonlar İçin Sıvı Priz Hızlandırıcı) ticari isimli bu katkı istenilen priz ve sertleşme süresine bağlı olarak dozajı ayarlanabilen, alkali içermeyen yüksek performanslı püskürtme beton priz hızlandırıcısıdır. Hidratasyon durdurucu katkının etkisini ortadan kaldırmak için karışıma priz hızlandırıcı katılması elzemdir. Aksi halde yapılan denemelerden karışımın yaklaşık 5-6 saat prize başlamadığı görülmüştür. 3D betonların inşa edilebilirlik özelliğini sağlamak için üst üste eklenen tabakaların birbirini taşıması için belli bir süre sonunda prize başlaması gerekmektedir. Bu nedenle priz hızlandırıcı katkı kullanılmıştır.

*v- Kıvam Düzenleyici:* BASF MasterRoc® MS 685 ticari adıyla piyasada satılan süspansiyon amorf silika esaslı likit bir katkıdır. Ultra ince amorf silika parçacıkları beton karışımına katıldıkları anda çalışmaya başlarlar. Çimento ile karışan amorf silika karışımının yapısı çimento pastasına benzer ve stabil mikroskopik mineral yapı yaratır. Bu yapı betonun ayrışma eğilimini ve boşluk miktarını azaltarak karışımın yoğunluğunu artırır.

*vi- Hava sürükleyici:* BASF MasterAir MA 1 (Hazır Yaş Sıva ve Harç Üretiminde Kullanılan, Yüksek Performanslı, Akışkanlaştırıcı) ticari isimli bu katkı ise harç içine kontrollü hava kabarcıkları sürükleyerek betondaki hava miktarını artırır, sıvanın akışkanlığını ve işleme özelliklerini iyileştirir. Üretici firma bu katkının başka katkı veya katkı sistemleri (su azaltıcı, yüksek oranda su azaltıcı, priz hızlandırıcı, priz geciktirici, yoğunlaştırıcı ve su itici) içeren betonlar için de uyumlu olduğunu belirtmiştir.

*vii- Priz geciktirici:* BASF MasterSet® R2 ticari adlı yüksek performanslı, akışkanlaştırıcı/priz geciktirici bu katkı hava sürükleyici (MasterAir® MA 1) katkı maddesi ile

birlikte kullanılabilen bir katkıdır. Hava sürükleyici katkının performansını artırması nedeniyle tercih edilmiştir.

**Tablo 6.** Kimyasal Katkıların Teknik Özellikleri

<i>Etki Adı</i>	<i>Ticari Adı</i>	<i>Özgül Ağ. (kg/L)</i>	<i>pH</i>	<i>Görünüm</i>	<i>Klor iyonu i. (Ağ., %)</i>	<i>Servis sıcaklığı (°C)</i>	<i>Önerilen dozaj aralığı (%)</i>
Vizkozite düzenleyici	Master Matrix® SDC 100	1,01 ± 0,01	7,5±1,5	Kahverengi sıvı	< 0.10	-	%0.1 ile 1.0
Akışkanlaştırıcı	Master Glenium®T 803	1,084 ± 0,02	4 - 5	Koyu kahverengi	< 0.10	-	0,8 - 1,5
Hidratasyon durdurucu	Master Roc® HCA 20	1,10 ± 0,02	<2	Kırmızı	< 0.10	-	0.2 - 1
Kıvam düzenleyici	Master Roc® MS 685	1,13	9,4	Hareketli renkli	-	-	0,325 - 2,6
Priz hızlandırıcı	Master Roc® SA 194	1,50 ± 0,03	2,75 ± 0,75	Bej	Klor içermez	-	3 - 10
Priz geciktirici	Master Set® R2	1,14 - 1,2	7 - 9	Pembemsi	< 0.10	(-20) ~ (+80)	0,25 - 2
Hava sürükleyici	Master Air MA 1	1,00 - 1,10	5 - 6	Kahverengi sıvı	< 0.10	(-20) ~ (+80)	0,1 - 0,6

Şekil 37’de çalışmada kullanılan malzemeler toplu olarak gösterilmiştir. Aynı resimde ön deneylerde kullanılan harç mikseri de görülmektedir.



**Şekil 37.** 3D beton üretiminde kullanılan malzemeler ve harç mikseri

## Parametreler, Sabitler, Numune Sayısı ve Kodlama

### Seçilen parametreler

Çalışma için seçilen parametreler aşağıda belirtilmiştir. Parametrelerin seviyelerinin seçiminde ön deneylerin etkisi belirleyici olmuştur.

*i- Hava sürükleyici katkı maddesi (AEA) oranı:* 3D betonların donma-çözülme dirençlerinin artırılması amacıyla AEA ilave edilecektir. Fazla miktarda sürüklenen hava boşluğunun basınç dayanımını azaltacağı ve betonun akışkanlığını artıracacağı hususları da göz önünde bulundurularak (Şahin 2003) katkının bilgi föyünde belirtilen alt sınır baz alınarak (bkz. Tablo 6) AEA oranları belirlenmiştir. Buna göre, bağlayıcı dozajının %0, %0,1, %0,15 ve %0,2'si oranında AEA kullanılması kararlaştırılmıştır.

*ii. Kür etkisi:* 3D betonlar ve bu betonlardan inşa edilen yapılar yerinde üretim (in-situ) olduğundan kür edilmeleri oldukça güçtür. Öyle ki, katmanlı üretim (yani 3D baskı) betonlarda su kaybının spesifik yönü bile henüz yeterince araştırılmamıştır (Marchon et al. 2018). 3D beton üretimi, kalıpların varlığı nedeniyle çok erken yaşlarda su kaybının az olduğu geleneksel beton uygulamalarından oldukça farklıdır. Literatürde farklı kür yöntemlerine başvurulduğu tespit edilmiştir. Lu *et al.* (2019) ürettikleri 3D beton elemanları laboratuvar ortamında (22,5 °C ve % 58 nem), Soltan and Li (2018) yine oda şartlarında ve havada kür işlemlerini gerçekleştirirken, Panda *et al.* (2019) standart numuneler üreterek standart kür şartları (28 gün kür havuzunda) uygulamışlardır. Yine Zhang *et al.* (2019) çalışmalarında üretmiş oldukları 50\*50\*11 cm blok 3D betonlardan 10\*10\*10 cm boyutlarda basınç, 10\*10\*40 cm boyutlarında eğilme numuneleri keserek standart kür koşullarında bekletmişlerdir. Bunlardan farklı olarak Tay *et al.* (2019) ürettikleri numuneleri plastik bir örtüyle kaplayarak 28 gün boyunca laboratuvar ortamında (23 ± 2 °C sıcaklık ve %60 nem) bekleterek kür etmişlerdir. Nematollahi *et al.* (2018) ise ürettikleri 3D baskı geopolimer betonlarına 24 saat boyunca etüvde 60 °C de sıcak kür uygulamışlardır.

Bu tez çalışması kapsamında yukarıda belirtilen uygulamalardan farklı olarak üretilen numunelerde kür etkisini inceleyebilmek için beton üzerinde “membran oluşturan kür malzemesi (curing compound)” kullanılmıştır. Aynı karışıma sahip olarak üretilen 3D baskı betonlardan biri herhangi bir kür işlemine tabi tutulmadan üretilen ortam şartlarında (yaklaşık 22 ± 2 °C sıcaklık, %60 nem) bekletilirken diğeri MasterKure 220 WB BASF (Beton Yüzeyler İçin Kullanılan Akriolik Esaslı Buharlaştırma Azaltıcı Malzeme) ile kaplanarak 28 gün süreyle aynı ortamda tutulmuştur.

*iii- Karot alma yeri ve doğrultusu:* Bu çalışma 3D beton elemanların boşluk yapısının heterojenliği hipotezi üzerine inşa edildiği için karot yerleri de bir parametre olarak

belirlenmiştir. Bu parametre ile ilgili açıklamalar “Sertleşmiş beton deneyleri” başlığı altında ayrıntılı verilmiştir.

Yukarıda verilen parametrelerden üretimle ilişkili olan (i) için deney tasarımı yapılacak olursa 4 farklı grup 3D beton numune üretileceği ortaya çıkmaktadır. Her bir karşımdan iki adet 600×600×150 mm’lik kare şeklinde numuneler üretilmiştir. Toplamda 8 adet numune üretilerek, numunelerin her birinden yanal ve dikey doğrultularda karot örnekleri alınmıştır.

### **Sabit tutulan kriterler**

- *Su/Bağlayıcı oranı*: Literatürden (Nadarajah, 2018; Özalp vd. 2018; Kazemian *et al.* 2019) hareketle 0,35 oranı seçilmiştir.
- *Çimento dozajı*: 3D baskı betonların gerek işlenebilirlik özelliklerini iyileştirmek gerekse nozul ucundan akıcılığını artırmak amacıyla literatürde yapılan çalışmalar da dikkate alınarak (Özalp vd. 2018; Kazemian *et al.* 2019) yüksek tutulmuş olup 680 kg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir.
- *Kimyasal Katkı oranları*:
  - i. *Viskozite Düzenleyici*: Viskozite düzenleyici katkıların (VMA) çok küçük dozajları bile betonun işlenebilirliği üzerinde çok büyük oranlarda etki edebilmektedir. Bu nedenle bu katkıların 3D beton üretimi üzerindeki etkisi ayrıntılı bir şekilde araştırılmış ve Zhang *et al.* (2018); Kazemian *et al.* (2019); Rahul *et al.* (2019); Malaeb *et al.* (2019); Rushing *et al.* (2019), Lachemi *et al.* (2004); Sonebi *et al.* (2013) ve Ma *et al.* (2018)’den hareketle % 0,1 oranı alınarak taze beton deneyleri yapılmıştır.
  - ii. *Akışkanlaştırıcı*: Ön denemeler neticesinde kullanım oranı bağlayıcı dozajının %1’i olarak belirlenmiştir.
  - iii. *Hidratasyon Durdurucu*: Literatürde yapılan çalışmalardan (Hambach *et al.* 2019) ve ön denemelerden bu katkı oranı bağlayıcı dozajının %0,3’ü olarak belirlenmiştir.
  - iv. *Kıvam Düzenleyici*: Yapılan ön denemelerden sonra bağlayıcı dozajının %0,5’i olarak belirlenmiştir.
  - v. *Priz Hızlandırıcı*: Ön denemeler neticesinde bağlayıcı dozajının %1’i olmasına karar verilmiştir.
  - vi. *Priz Geciktirici*: Bağlayıcı dozajının %0,3’ü olarak seçilmiştir. Bu oran, katkının kullanım sınırları içinde minimum dozaja çok yakındır bu kadar düşük seçilmesinin sebebi 3D betonun prizini fazla geciktirmemesinin istenmesindedir. Çünkü dökülen tabakanın üstteki tabakaların ağırlıklarını taşıması için bir yandan da sertleşmeye başlaması gerekmektedir.

Geleneksel betona göre bu çalışmada çok sayıda ve birbiriyle zıt etki oluşturabilecek kimyasal katkı kullanımının başlıca nedeni, 3D betonların baskı alınabilirlik süresi ve inşa edilebilirlik özelliklerinin aynı anda sağlatılmaya çalışılmasıdır. Yani dökülen her bir yeni tabaka üst tabaka/tabakaların yüklerini taşıyabilmesi için bir yandan prize başlamalı aynı zamanda da belirlenen şeklin tamamının dökülmesi için belirli bir süre şekil verilebilme özelliğini devam ettirmelidir. Yapılan ön denemelerde başlangıçta çok az katkı türü seçilmiş fakat uygun özelliklerin elde edilememesi nedeniyle karışıma, literatürde bulunan çalışmalardan da yola çıkılarak, yeni katkılar ilave edilmiştir. Ön deneme süreçleri Ek 1 bölümünde aşama aşama verilmiştir.

Kimyasal katkıların birbirleriyle uyumlu olarak çalışabilmesi için hepsi aynı firmadan (BASF Türk Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti) temin edilmiştir.

- *Yüksek fırın cürufu oranı:* Erdoğan (2003)'de "Betonda belli miktarda sürüklenmiş hava elde edebilmek için daha çok hava sürükleyici katkı maddesine ihtiyaç olmaktadır" denilerek ÖYFC'nin olumsuz yönünden bahsedilmektedir. Erdoğan (1997)'de ise soğuk bölgeler için maksimum % 30'luk oranda ÖYFC kullanılması gerektiğini belirtmiştir. Bu üst sınır ve hava sürükleyici katkı miktarına olan etkisi dikkate alınarak çimento miktarının % 20'si oranında ÖYFC kullanılması kararlaştırılmıştır. ÖYFC, çimento ile ikame değil karışıma ilave edilerek kullanılmıştır. Bu durumda bağlayıcı dozajı  $816 \text{ kg/m}^3$  olmuştur.
- *Mikrofiber oranı:* Literatürde yapılan çalışmalardan hareketle (Hambach et al. 2019; Kazemian et al. 2019; Rushing et al. 2019) ve ön denemeler neticesinde kullanım oranı tüm hacmin %0,2'si olarak belirlenmiştir.
- *Kil oranı:* Killer, karşıt yüzey yüklerinden dolayı kayma incelmeleri<sup>1</sup> gösterirler ve kesme altında kırılabilir boş bir yapı oluşmasına yol açarlar. Bu malzemeler boyalar ve sondaj sıvıları da dahil olmak üzere reoloji düzenleyici olarak geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Farklı kil gruplarından atapulgit (veya paligorskit), bentonit (montmorillonit bazlı), kaolinit, sepiyolit ve kontamine killer çimento bazlı malzemeler için reoloji düzenleyici olarak kullanılmıştır (Marchon et al. (2018). Literatürden (Zhang et al. 2018; Kazemian et al. 2019; Rahul et al. 2019) ve ön denemelerden elde edilen sonuçlar neticesinde kullanım oranı bağlayıcı dozajının %0,3'ü olarak belirlenmiştir.
- *Agrega miktarı ve agrega/çimento oranı:* 0-0,5 mm ve 0-1 olmak üzere iki grup ince agrega ile beton üretimi gerçekleştirilmiştir. 0-1 mm boyutlu agregalar 0-0,5 mm boyutlu agregaların 2 katı olacak şekilde toplam agrega miktarı bağlayıcı miktarının 1,34 katı olarak

---

<sup>1</sup> Kayma hızını artırarak görünür viskozitenin azalmasına denir (Marchon et al. (2018).



alınmıştır. Yüksek fırın cürufu göz önünde bulundurulmazsa 1 kısım çimento için 1,5 kısım agrega bu agreganın da 1'lik kısmı 0-1 mm, 0,5'lik kısmı ise 0-0,5 mm agregadır.

### Kodlama

Çalışmada kodlama iki aşamada yapılmıştır. Üretim aşamasında hava sürükleyici katkı oranı ve kür şartına bağlı olarak yapılan kodlama Tablo 7'de gösterilmiştir. Sertleşmiş beton deneyleri için alınan karotların yerleri ve doğrultularını gösteren ilave karakterler Tablo 7'de belirtilen kodlara ilave eklenmiştir. İlave karakterlerin neler olduğu "4.1. Karot alma" başlığı altında açıklanmıştır.

**Tablo 7.** Numunelerin Kodlanması

Kodu	A0	A0K	A1	A1K	A1,5	A1,5K	A2	A2K
Hava sürükleyici miktarı (%)	0	0	0,1	0,1	0,15	0,15	0,2	0,2
Kür uygulanıp uygulanmadığı	Yok	Var	Yok	Var	Yok	Var	Yok	Var

### Karışım Hesabı, Beton Üretimi ve Taze Beton Deneyleri

Yukarıda belirtilen parametreler ve seviyeleri ile diğer hususlar göz önünde bulundurularak yapılan karışım hesabı sonuçları Tablo 8'de verilmiştir. Ayrıca her bir numune grubu için yapılan karışım hesabı detaylı olarak Ek. 1 bölümünde verilmiştir.

**Tablo 8.** 3D Beton Üretimi İçin Belirlenen Malzemelerin Miktarları (kg/m<sup>3</sup>)

KOD	Çim.	ÖYFC	Su	Mikro fiber	Kil	Kimyasal katkılar							Agrega	
						Visko. Düz.	Kıvam Düz.	Akışk. Dur.	Hidrat. Dur.	Priz Hız.	Priz Gecik.	AEA	0 - 0,5	0 - 1
A0	680	136	285,6	1,82	2,45	0,88	4,08	8,16	4,08	8,16	4,08	0	333	675
A1	680	136	285,6	1,82	2,45	0,88	4,08	8,16	4,08	8,16	4,08	0,82	332	674
A1,5	680	136	285,6	1,82	2,45	0,88	4,08	8,16	4,08	8,16	4,08	1,22	332	673
A2	680	136	285,6	1,82	2,45	0,88	4,08	8,16	4,08	8,16	4,08	1,63	332	673

Malzeme miktarları belirlendikten sonra 3D beton için uygun kıvamdaki beton, harç mikserinde karıştırılarak üretilmiştir. 3D beton karışımlarının standartlara uygun olarak homojen şekilde karışımını sağlamak amacıyla TS EN 196-1'de (Anonim 2016) belirtilen şartlara uygun 10 litre kapasiteli, 280 devir/dk karıştırma hızına kadar çıkabilen laboratuvar tipi harç karıştırıcısı kullanılmıştır. Üretim aşamaları şu şekildedir:

i- Karışıma önce tüm kuru ve toz malzemeler (çimento, ÖYFC, agregalar, kil ve mikrolif) ilave edildi ve harç mikserinde düşük hızda 1dk karıldı.

ii- Ardından suyun yarısı karışıma eklenerek 1dk daha düşük hızda karıldı.

iii- Suyun kalan yarısı tüm sıvı kimyasal katkılarına paylaştırıldı ve akışkanlaştırıcı başta olmak üzere katkıları sırasıyla birer dakika orta hızda karıştırılarak karışıma ilave edildi.

iv- Karışım 1 dakika daha yüksek hızda karıştırılarak 1 dk dinlenmeye alındı.

v- Sürüklenen hava boşluklarının kaybolmaması için hava sürükleyici katkı karışıma en son eklenerek 1 dk daha yüksek hızda karıştırıldı ve döküme geçildi.

Yeter sayıdaki ön deneylerden ve taze beton deneylerinden sonra kesinleştirilen beton karışım hesabı doğrultusunda 3D beton numuneler üretilmiştir. Şekil 38’de ön deneylerden alınan resimler verilmiştir. Ön deneyler Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri ve Tatbiki Mekanik Laboratuvarı’nda yapılmış ardından İSTON laboratuvarında bulunan 3D beton yazıcı ile tekrarlanmıştır. Elle yapılan deneylerde örneklerin nozul ucundan akabilirliğini (extrudability) kontrol edebilmek için piyasadan edinilen pasta kreması torbaları kullanılmıştır.



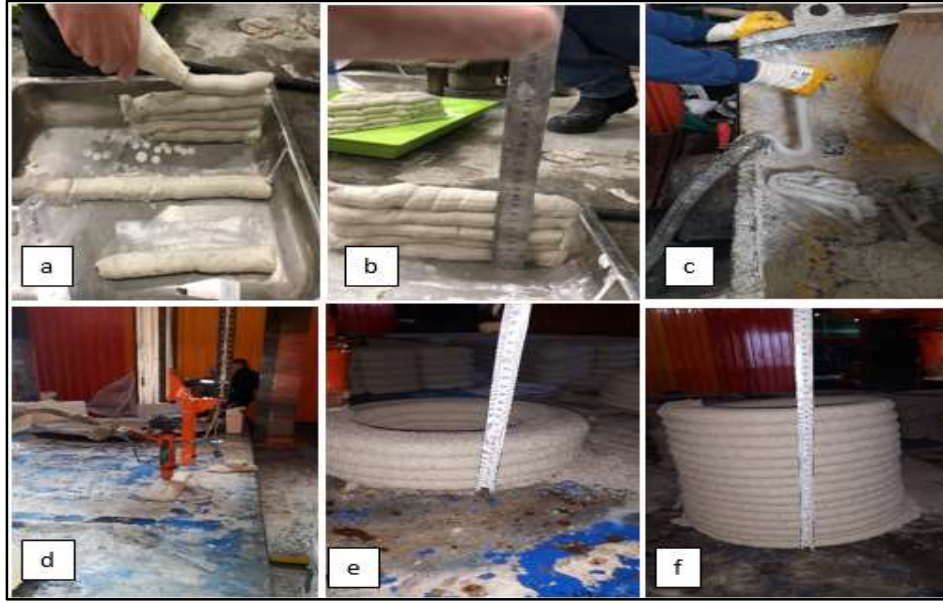
**Şekil 38.** Ön deneylerden görüntüler (sol üstteki İSTON’da üretilen 3D beton saksı örneği, diğerleri Atatürk Üniversitesi’ndeki denemelerden görüntüler)

#### **Ekstrüde edilebilirlik (extrudability) ve inşa edilebilirlik (buildability) testi**

Literatürde (Zhang *et al.* 2018; Rahul *et al.* 2019; Kazemian *et al.* 2019) ekstrüde edilebilirlik deneyi, pompa ucundan rahatlıkla dökülebilen ve üst üste gelen beton katmanların

her yerde ve her sırada aynı kalınlık ve yüksekliğe sahip olması özelliğinin belirlenmesi olarak tarif edilir. 30 cm'lik hat boyunca 10 cm'de bir yapılan ölçümde her yerde kalınlığın aynı olduğu görülmüştür. Yapılan deneyler Şekil 39'da gösterilmiştir.

İnşa edilebilirlik özelliği ise dökülen betonların ezilmeden ve yıkılmadan üst üste çıkılabildiği maksimum kat seviyesi ölçülerek belirlenebilir (Bao *et al.* 2018). Çalışmada dairesel olarak dökülen (Şekil 39(f)) ve her bir tabakası 2,5 cm kalınlıklı olan beton ile yaklaşık 10 katman çıkıldıktan sonra en alttaki katta ezilmelerin başladığı tespit edilmiştir. Bu gözlem alttaki paragrafta verilen kaynaklarla birlikte değerlendirildiğinde deneme betonlarının inşa edilebilirlik bakımından yeterli özelliğe sahip olduğu sonucuna varılmıştır.



**Şekil 39.** Ön deneyler aşamasında (a ve b) ve gerçek boyutlu numunelerin üretimi esnasında (c, d, e ve f) yapılan taze betonların ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik özelliklerinin belirlenmesi

Gerçek boyutlu olarak karot almak için 600 mm × 600 mm alana sahip olarak üretilen numuneler 3 cm yüksekliğe sahip her bir tabakanın üst üste dökülmesiyle 5 kat dökülerek yaklaşık 15 cm yüksekliğe sahip olacak şekilde üretilmiştir. Hava sürükleyici katkının kullanılmadığı A0 grubunun yüksekliği 0, 15, 30 ve 60 dk aralıklarla ölçülmüş ve 60 dk sonunda 14,9 cm olarak kaydedilmiştir (yani yalnızca 1 mm'lik bir çökme olmuştur). Bununla birlikte en fazla miktarda hava sürükleyici katkının kullanıldığı A2 grubunda ise 60 dk sonunda 14,5 cm'lik yükseklik ölçülmüştür. Toplam çökme miktarı %10'dan küçük olması nedeniyle (en fazla çökme yapan grup A2 yalnızca %3'lük bir çökme yapmıştır) üretilen 3D betonların inşa edilebilirlik özelliğine sahip olduğu söylenebilir (Zang *et al.* 2018; Tay *et al.* 2019; Panda *et al.* 2019; Rahul *et al.* 2019; Kazemian *et al.* 2019; Rahul and Santhanam 2020).

### 3D taze betonların reolojik özelliklerinin belirlenmesi

Bir sistemin reolojik özelliklerinin başarılı bir şekilde ölçülmesi ve değerlendirilmesi, uygun yöntemin ve doğru bir viskozimetrenin seçilmesine bağlıdır. Viskozimetrelerin tasarımında, sıcaklık ve işlem parametreleri esas alınır. Reolojik ölçümlerde amaç, gerilim ve kayma hızı ve bazı durumlarda viskoelastisite arasındaki fonksiyonel ilişkiyi tayin etmektir. Viskozimetreler iki temel prensibe göre ölçüm yaparlar: i) bir tüp içindeki sıvının akışa karşı direncini ölçmek, ii) sıvının içindeki katı cismin hareketine gösterdiği direnci ölçmek (Anonim 2020p).

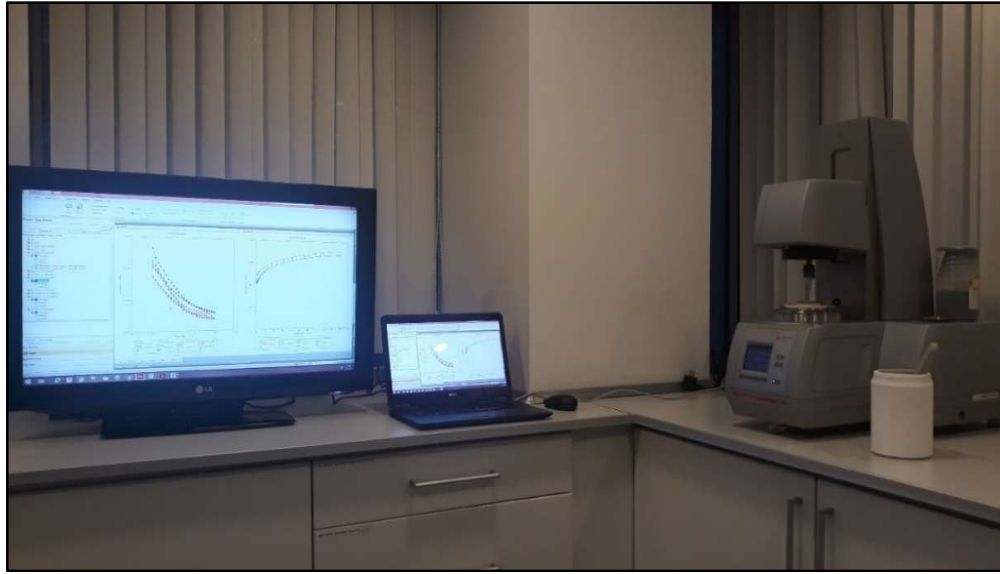
Bu çalışmanın amaçlarından biri de karışım kompozisyonunun, 3D olarak yazdırılabilir bir harcın taze beton ve reolojik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktır.

Çeşitli akış hareketlerini ölçmek için geliştirilmiş çeşitli türlerde viskozimetreler mevcuttur. Bu çalışmada 3D betonların viskozite özelliklerini belirlemek için Anton Paar marka RheolabQC rotasyonel reometre cihazı kullanılmıştır. RheolabQC rotasyonel reometre, düşük viskozite ile yarı katı örnekler kadar geniş aralıkta dinamik viskoziteyi ölçer. Reolojik davranışının çalışılması için tek noktadan ölçümlerin yanı sıra akış eğrileri ve viskozite eğrileri elde edilebilir. Kullanılan cihazın teknik özellikleri Tablo 9’da verilmiştir.

**Tablo 9.** Kullanılan Reometrenin Teknik Özellikleri

Özellik	Aralık
Hız	0.01 1/dak ila 1200 1/dak
Tork	0.20 mNm - 75 mNm
Kayma gerilimi	0.5 Pa ila $3 \times 10^4$ Pa
Kayma hızı	$10^{-2}$ 1/s ila 6500 1/s
Viskozite aralığı (ölçüm sistemine bağlı)	1 mPas $10^9$ mPas
Sıcaklık aralığı	-20 °C ila 180 °C
Açısal çözünürlük	2 µrad
Fiziksel değişkenler	Hız, Tork, Kayma hızı, Kayma gerilimi, Dinamik viskozite, Sıcaklık, Süre, Deformasyon, Uyumluluk Akma gerilimi, Akış ve viskozite eğrisi

Şekil 40’da reolojik ölçümler için kullanılan reometre cihazı ve deney esnasından bir görüntü verilmiştir. Sonuçlar Araştırma Bulguları bölümünde ele alınmıştır.



**Şekil 40.** Anton Paar marka Rotasyonel Reometre cihazıyla 3D beton karışımlarının reolojik özelliklerinin belirlenmesi

### **Yayılma tablası deneyi**

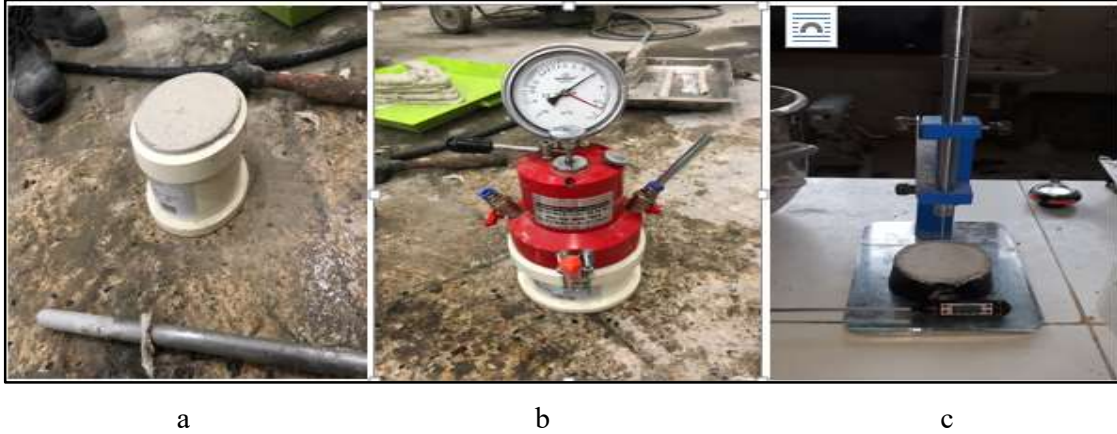
Taze betonun viskozitesini ve kısıtlı alanlardan geçme deformasyonunu değerlendirmek için yapılan deneylerden biri de yayılma tablası (Flow table) deneyidir (Lachemi *et al.* 2004; Ma *et al.* 2018). TS EN 12350-5 (Anonim 2019a) ve ASTM C 230 (Anonymous 2014) ve ASTM C 1437 (Anonymous 2007) standartları gereğince taze betonda yayılma çapları ölçülerek hava sürükleyici katkının yayılma çapını ne derecede etkilediği araştırılmıştır. Taze beton yayılma tablası kalıbına iki eşit tabaka halinde doldurulmuştur. Doldurma esnasında her tabaka sıkıştırma çubuğu ile 10 defa hafifçe tokmaklanarak sıkıştırılmıştır. Kalıp çıkarıldıktan sonra üst plaka, alt durdurucular üzerine serbestçe toplam 15 kere düşürülmüştür. Düşürme işlemleri tamamlandıktan sonra üst plakaya yayılan beton tabakasının en büyük boyutları, plaka kenarlarına paralel iki doğrultuda cetvelle ölçülerek ortalaması alınmıştır. Deneye ait görüntüler Şekil 41’de gösterilmiştir.



**Şekil 41.** Yayılma tablası deneyi

### 3D betonların taze birim hacim ağırlıkları

TS EN 12350- 6 (Anonim 2019b) standardına göre taze beton, hacmi ile kütlesi bilinen rijit ve sızdırmaz bir kap içerisine konulup titreşim masası kullanılarak 20 sn kadar titreşim uygulanıp sıkıştırılarak yerleştirilmiş ve daha sonra tartılmıştır. Deneye ait görüntü Şekil 42(a)'da gösterilmiştir.



**Şekil 42.** a: birim hacim ağırlık ölçümü, b: hava içeriği ölçüm cihazı ve c: çalışılabilirlik süresi tayini için yapılan priz süresi deneyi

### Taze betonun hava içeriği deneyi

TS EN 12350-5 (Anonim 2019c) standardı gereğince harç betonları için hava içeriği tayini deneyi uygulanmıştır. 3D beton karışımı, 1 litre hacim kapasiteli silindirik şekilli ve çelik hava ölçer kabına mümkün olduğu kadar içerisinde hapsolmuş hava kalmayacak şekilde yaklaşık eşit kalınlıkta 3 kademe halinde titreşim masası yardımıyla sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Flanşlı, rijit, konik ve üst kısmına düşey gözlem borusu eklenmiş olan kapak üzerinde bulunan kelepçe sistemi ve içerisinde bulunan lastik yardımıyla dışardan hava almayacak şekilde sıkıca kapatılmıştır. Ana hava vanası kapatılmış ve şırınga kullanılarak kapak üzerindeki iki su vanasından birinden, diğer vanadan su çıkıncaya kadar cihaza su doldurulmuş ve su içerisindeki hava kabarcıkları tamamıyla çıkıncaya kadar cihaza, tokmak ile hafifçe vurulmuştur. Kapalı hava hücreğine bağlı hava tahliye vanası kapatılıp ve kapalı hava hücresi içerisine, basınç göstergesi ibresi, başlangıç basınç (sıfır) çizgisine gelinceye kadar hava pompalanmıştır. Su vanalarının her ikisi de kapatılıp, ana hava vanası açılarak basınç göstergesi ibresinin gösterdiği değer ibrenin kararlı hale gelmesinden sonra görünür hava yüzdesi olarak okunmuştur. Deneye ait bir görüntü Şekil 42(b)'de gösterilmiştir.

### Baskı alınabilirlik (çalışılabilirlik) süresi (open time) deneyi

Çalışılabilirlik süresi literatürde yapılan çalışmalardan (Le *et al.* 2012; Özalp vd. 2018; Ma *et al.* 2018) yola çıkılarak, priz süresi deneyinde olduğu gibi, bir Vicat aparatı ile ve belirli

zaman aralıklarında akıcılığın kontrol edilmesi suretiyle belirlenmiştir. TS EN 196-3 (Anonim 2017) standardı gereğince 3D beton karışımları Vicat deney aleti konisine şişleme yapılmaksızın yerleştirilmiştir. Belli zaman aralıklarıyla iğne uç düşürülerek batma derinliği ölçülmüş ve bu ölçümler vasıtasıyla 3D betonların baskı alınabilirlik süreleri (open time) yorumlanmıştır.

3D betonlar karıştırılmaya devam edilmediği takdirde koyu bir kıvam almakta ve şekil verebilmek zorlaşmakta hatta mümkün olmamaktadır. Ancak bu sürede henüz beton prizini tamamlamış değildir. Dolayısıyla baskı alınabilirlik süresi priz alma süresi olarak alınmaz ancak iğnenin beton kütleyle batma mesafesine göre henüz nasıl bir kıvama sahip olduğu hakkında fikir öne sürülebilmektedir. Deneye ait bir resim Şekil 42(c)'de verilmiştir.

### **Basınç dayanımı**

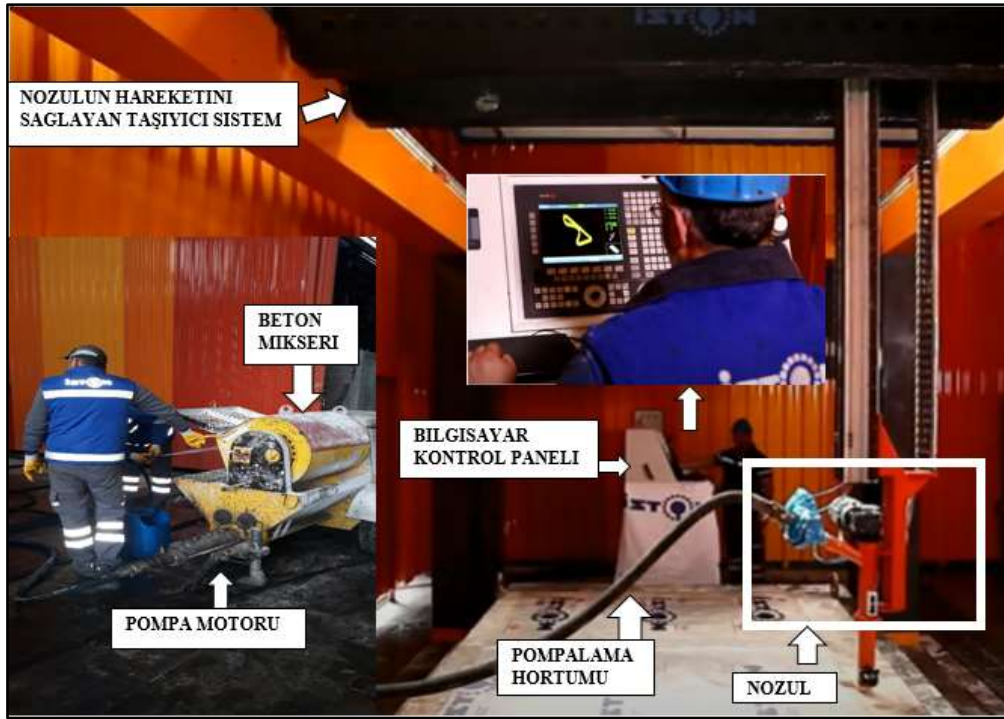
Üretilen 3D betonlar üzerinde TS 12390-3 (Anonim 2019d) standardına göre basınç deneyi uygulanmıştır.  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  lük kalıplara dökülen beton karışımları bir gün süreyle kalıpta bekletilerek ertesi gün çıkarılmış ve 28 gün süresince laboratuvar ortamında tutulmuştur. 3D betonlarla üretilen elemanlara uygun kür koşullarının henüz belirlenmemiş olması nedeniyle gerçek koşulları yansıtabilmek adına bu çalışmada standart kür koşulları uygulanmamıştır. Basınç deneyleri Atatürk Üniversitesi Laboratuvarında bulunan BESMAK marka 3000 KN kapasiteli press cihazı ile yapılmıştır. Deneylerde yükleme hızı 0,4 MPa/s alınmıştır. Basınç deneylerine ait görüntüler Şekil 43'de verilmiştir.



**Şekil 43.** Ön deneyler esnasında üretilen 3D beton numunelerin basınç deneyi

### **3D Beton Numunelerin Üretimi ve Sertleşmiş Beton Deneyleri**

İSTON bünyesinde bulunan ve henüz alt yapı çalışmaları devam eden  $300 \times 250 \times 200 \text{ cm}$  çalışma alanına sahip 3D beton yazıcı, Şekil 44'de görüldüğü üzere, bilgisayara entegre bir baskı kafası (nozül), bir pompalama sistemi (pompalama motoru ve hortumu) ve beton yerden oluşmaktadır. Bu 3D yazıcı ile  $200 \times 100 \times 60 \text{ cm}$  ölçülerinde bir ürün yaklaşık 40 dakika sürede üretilebilmektedir (Özalp vd. 2018).



Şekil 44. İSTON 3D yazıcı cihaz sistemi

Atatürk üniversitesi bünyesinde gerçekleştirilen ön çalışmalar neticesinde elde edilen 3D beton karışımı, İSTON'a ait laboratuvarda 600×600×150 mm boyutlarında plaklar dökülerek deneylere esas olacak numuneler üretilmiştir. 28. gün sonunda karot numuneleri almak için gerçek boyutlu (1/1) eleman büyüklüğünde numuneler üretilmiştir. Bir kenarda malzeme tartımı yapılırken diğer taraftan önceden tartılmış olanlar beton mikserinde karıştırılıp pompa yardımıyla hortuma iletilmiştir. Yeterli miktarda beton iletilmesinden sonra nozul ucuna gelen beton bilgisayar programında oluşturulan geometriye bağlı olarak yazdırılmıştır. A0, A1, A1,5 ve A2 gruplarının her birinden 2 şer adet baskı yapılmıştır. Toplam 8 adet plak eklemeli imalat yöntemiyle elde edilmiştir. Üretilen numunelerin birer tanesi ortam şartlarında kür edilirken diğer gruplara ait numuneler kür katkısıyla kaplanarak 28 günlük küre bırakılmıştır. Şekil 45'de numunelerin üretim aşamaları gösterilmiştir.



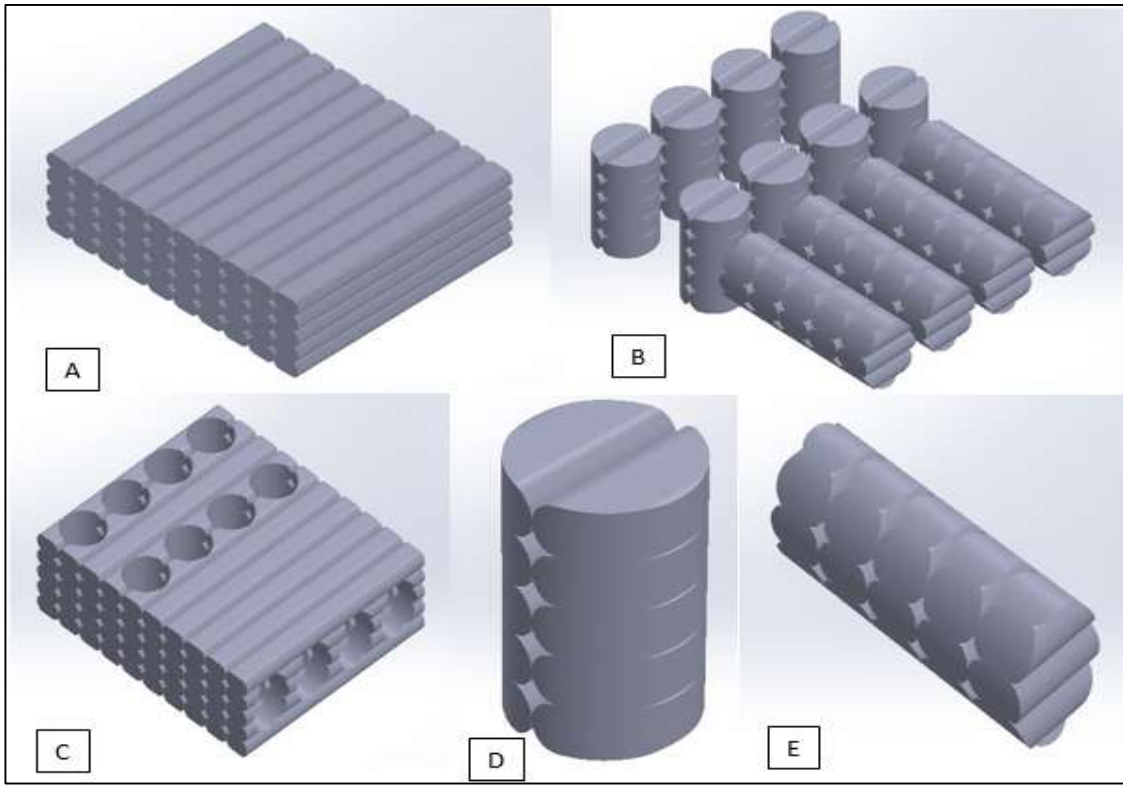


**Şekil 45.** 3D beton üretim sürecinin aşamaları

### **Karot alımı**

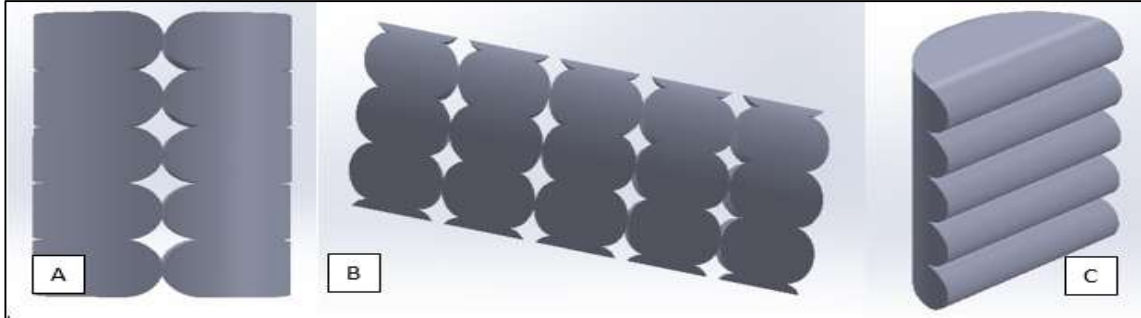
Numuneler 28 günlük süre sonunda karot alımı için hazır hale gelmiştir. Üretilen elemanlardan TS EN 13791 (Anonim 2019e) standardına göre karot alınmıştır. Şekil 46'da 3D beton yöntemiyle tabakalı olarak üretilmesi tasarlanan eleman ve bu elemandan alınacak olan karot örneklerinin çizimleri verilmiştir. Çizimler SOLIDWORKS çizim programında yapılmıştır.

Şekil 46'da dökülmesi tasarlanan 3D beton elemanın perspektifi (A), dökülen 3D beton elemandan alınması planlanan dikey ve yatay karotlar ve alınması gereken yerler (B), karotlar alındıktan sonra numuneden geriye kalan kısım (C), dikey yönde alınan karot örneği (D), yatay yönde alınan karot örneği (E) görülmektedir.



**Şekil 46.** 3D betondan üretilmiş tabakalı eleman, karot yerleri, karotlar ve karotlardaki boşlukların şematik gösterimi

Şekil 47’de ise döküm yönüne dik ve döküm yönünde alınan karot numunelerindeki tabakalaşma ve boşluk dağılımındaki farklılıklar gösterilmiştir.



**Şekil 47.** Karot örneklerindeki boşluklar (A: Döküme dik yönde alınan numunelerde, B: Döküme paralel yönde alınan numunelerde, C: Döküme dik yönde alınan karot numunesinin ortadan ayrılmış görüntüsü)

Kür süresinden sonra karot alınma işlemi, Şekil 46 (C)’de gösterildiği şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 48’de İSTON’daki karot alım süreci gösterilmiştir.

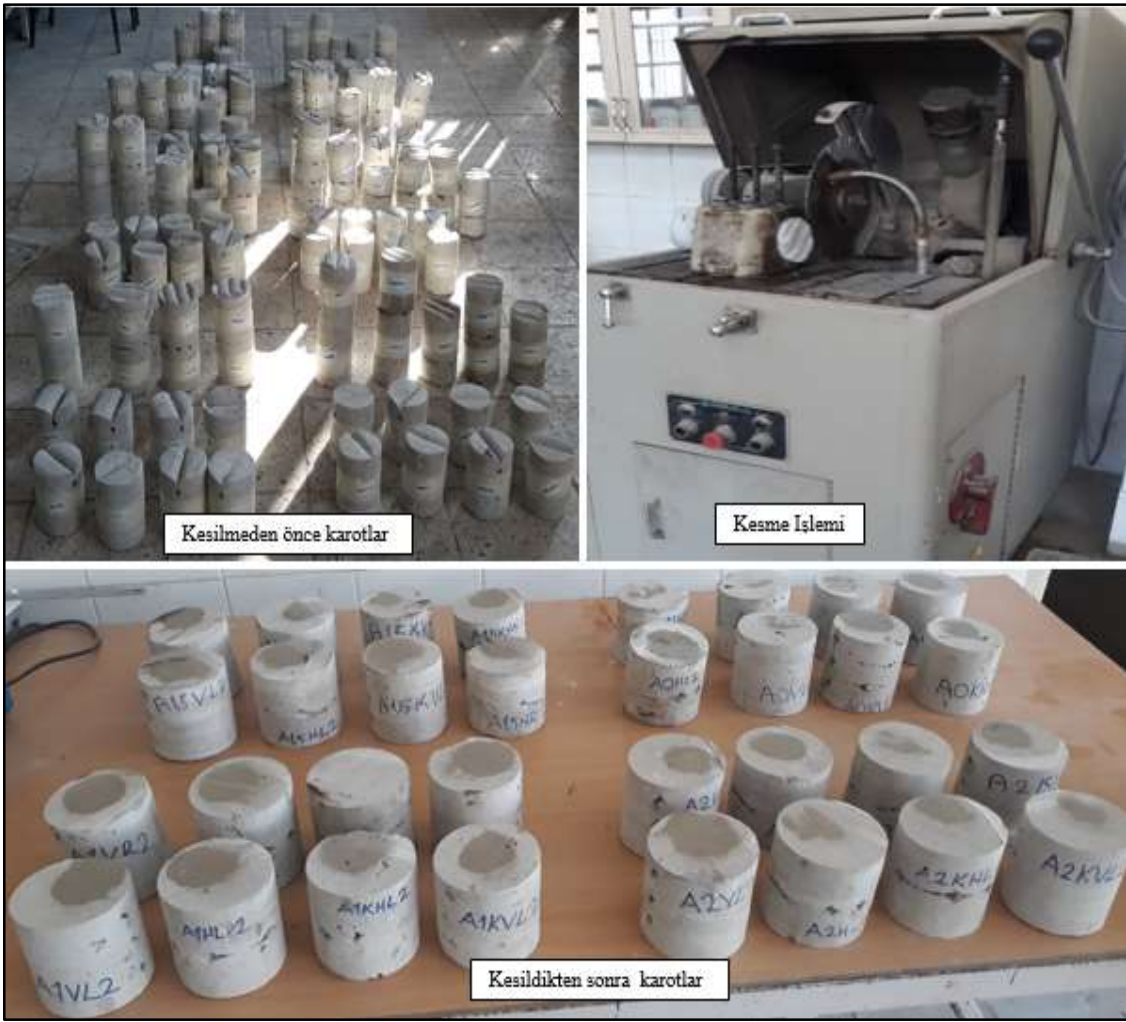


**Şekil 48.** Karot alım süreci (A: Döküm yönüne göre yatay yönde karot alınması, B: Dikey yönde karot alınması, C: Karot alındıktan sonra geriye kalan beton kısım, D: yatay yönde alınan ve E: Dikey yönde alınan karot numunelerinden örnekler)

Karotlar alındığı eleman ve yere göre isimlendirilmiştir. Tablo 7’de üretim aşamasındaki betonlar için geliştirilen kodlara ilaveten V: (Vertical) döküm yöne dik olarak alınmış, H: (Horizontal) döküm yöne paralel olarak karot alınmış, R: (Right) elemanın sağ bölgesinden alınmış, L: (Left) elemanın sol bölgesinden alınmış anlamında gelen yeni karakterler eklemiştir. Kodlamanın sonuna da o doğrultuda alınmış kaçınıcı karot olduğunu gösteren 1-4 arası değişen rakamlar eklenmiştir.

Örneğin A1,5KHL3; %0,15 oranında AEA içeren (A1,5), kür edilmiş (K), döküm yönüne paralel alınmış (H) ve elemanın sol bölgesinden alınmış (L) 3. karot numunesini temsil etmektedir.

Atatürk Üniversitesi’ne getirilen karot numuneler yaklaşık  $\text{Ø}10 \times 10$  cm boyutlarında silindirik numuneler elde edilecek şekilde kesilmiş ve sertleşmiş beton deneylerine hazır hale getirilmiştir. Şekil 49’ da karot numunelerin boylarının ve yüzeylerinin kesilerek düzeltilmesi işlemi gösterilmiştir.



**Şekil 49.** Tüm karot numuneler, karotların kesilme işlemi ve kesildikten sonraki bir grubun görüntüsü.

4 farklı karışım için toplam 8 adet gerçek boyutlu (60×60×15 cm) eleman üretildiği önceki alt başlıklar altında belirtilmişti. Buna göre tez kapsamında alınan karot sayısı toplamı (her bir numuneden 8 dikey ve 8 yatay olmak üzere)  $16 \times 8 = 128$  adettir. İçyapı analizleri için ise ayrıca karot alınmayıp basınç dayanımından çıkan numunelerden alınan örnekler üzerinden yapılması planlanmıştır. Sertleşmiş beton deneylerinde kullanılmak üzere her bir karışım grubundan 2 şer adet karot numunesi oluşturulmuş deney sonuçları için bu iki numunenin ortalaması alınmıştır.

### **Karot örneklerin basınç dayanımının belirlenmesi**

Ø10×10 cm boyutlarındaki silindir 3D beton numuneler 1 gün süreyle laboratuvar ortamında bekletilerek (yaklaşık 20 °C % 60 nem) hava kurusu durumuna getirilmiş ve boyutları 1 mm hassasiyetle ölçülerek yükün etki edeceği alan hesaplanmıştır. Bu işlemden sonra silindir numuneler kükürt ile başlıklanmıştır. Başlıklama işlemi bittikten sonra numuneler en az iki saat sertleşmeye bırakılarak basınç dayanımı deneyi yapılmıştır.

TS EN 12390-3 (Anonim 2019d) standardı gereğince yükleme hızı  $(0,6 \pm 0,2)$  MPa/s sınırları içerisinde kalacak şekilde 0,4 MPa/s sabit yükleme hızı seçilmiştir. Şekil 50'de 3D baskı beton numunelere uygulanan basınç dayanımı deneyi sonucunda yatay ve dikey numunelerdeki kırılma şekilleri gösterilmiştir. Sonuçlar her grup için iki numunenin aritmetik ortalaması alınarak Araştırma Bulguları bölümünde değerlendirilmiştir.



Şekil 50. Basınç dayanımı deneyi ve deneyden sonraki kırılma şekilleri

#### Ultrases geçiş hızının (UPV) tayini deneyi

UPV deneyi için Proseq markalı Ultrasonik Dalga Hızı Test Cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, ultrasonik ses dalgaları üreterek, bu dalgaları numuneye gönderip, numunenin bir ucundan diğer ucuna dalgaların alınmasına kadar geçen süreyi ölçmektedir. Dalga hızının ölçümü, betonun homojenliğinin, betondaki çatlak ve boşlukların varlığının, betonun zamanla değişen özelliklerinin ve dinamik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Malzeme testinde kullanılan ultrasonik dalgalar piezo-elektrik özellik gösteren transdüserler yardımı ile elde edilmektedir (Anonim 2020u). Betonun bir yüzeyinden gönderilen ultrasonik ses dalgaları beton içinde boşluklara rastladığında karşıya iletilemez ve boşluğun etrafını dolanırlar. Dolayısıyla yollarının uzaması ultrasonik ses hızının azalmasına neden olacaktır. UPV'nin

azalması, betonun boşluklu olduğunu gösterir, bu da betonun düşük dayanıma sahip olduğu anlamına gelmektedir (Erdoğan 2003). Transdüserlerin temas ettikleri yüzeylerin temiz ve düzgün olması gerekmekte ayrıca daha iyi temas için transdüserlerle beton yüzeyi arasında boşluk bırakmayacak bir ultrason jeli, vazelin vb malzeme kullanılması gerekmektedir. Deney, TS EN 12504-4 (Anonim 2012) standardına göre yapılmış olup deneyde kullanılan cihaz ve aparatları Şekil 51’de gösterilmiştir.

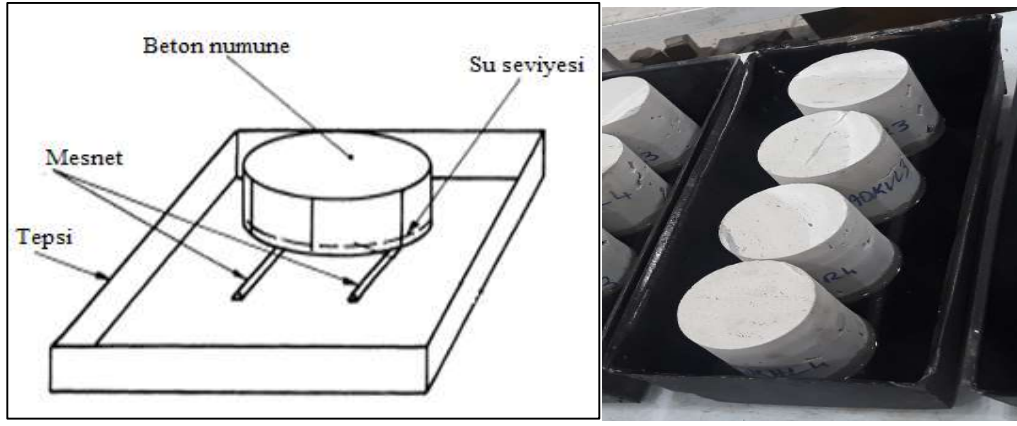


**Şekil 51.** UPV cihazı, aparatları ve deney esnasından bir görüntü

Üretilen 3D beton numunelere önce UPV deneyi yapılmış ardından bu grubun basınç dayanımları ölçülmüştür. Ayrıca ASTM C 666 (Anonymous 2015) standardı gereğince yapılan donma-çözülme deneyinde de her 10 çevrimde bir UPV ölçümleri alınarak dinamik elastisite modülü belirlenmiştir.

### **Kılcal su emme deneyi**

Beton içerisindeki kılcal boşluklar, suyun veya değişik zararlı bileşiklerin (klor tuzları gibi) beton içinde taşınmasında oldukça önemli rol oynadıklarından beton durabilitesi bakımından kılcallık katsayısı (S) çok önemlidir. TS EN 13057 (Anonim 2004) standardı gereğince yapılan deneyde, sabit kütleyle ulaşıncaya kadar numuneler  $(40 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 'ta yedi gün düşük ve numunenin her tarafındaki rutubet oranı aynı olacak şekilde etüvde kurutulmuştur. Şekil 52’de verilen deney düzeneğinde görüldüğü gibi numunelerin kılcal boşlukları vasıtasıyla su emmesi sağlanmıştır. Numuneler, 12 dakika, 30 dakika, 1 saat, 2 saat, 4 saat ve 24 saat aralıklarla tartılarak emilen su miktarları belirlenmiştir. Birim alandan kılcal su emme (i), her bir süre kademesinde emilen su kütlesinin (kg), deney tabii tutulan numune yüzey alanına ( $\text{m}^2$ ) bölünmesiyle hesaplanmıştır. Suya batırma süresinin (h) kareköküne karşılık gelen (i) değerleri işaretlenerek grafik çizilmiştir. Grafik çizgisinin eğimi, su emme katsayısı ( $S = kg / (m^2 \times \sqrt{h})$ ) olarak ifade edilir.



Şekil 52. Kılcal su emme deney düzeneği ve deneye ait bir görüntü

### Donma-çözülme deneyi

Bu çalışmada ASTM C 666 (Anonymous 2015) standardında belirtilen B yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem numunelerin havada donma ve su içerisinde çözülmesini esas almaktadır. Yine numunelerin iç sıcaklık değişim değerleri minimum  $-18\pm 2$  °C ve maksimum  $4\pm 2$  °C dir. Minimum sıcaklıktan maksimum sıcaklığa ve maksimum sıcaklıktan minimum sıcaklığa geçiş süresi 2 saatten az 5 saatten çok olmayacak şekilde ayarlanması belirtilmiştir. Çözdürme hızının kullanılan çevrim süresinin 1/5'inden daha az olmaması gerekmektedir.

Donma hızı, malzemenin donma-çözülme direnci üzerindeki en etkili parametrelerden biridir. Bu nedenle öncelikle dondurucu ortamın donma-çözülme rejimi belirlenmiştir. Bu amaçla, Şekil 53'de gösterildiği gibi, betonun içine yerleştirilen K Tipi Proflu Termokupl'larla ölçüm alan dijital bir termometre yardımıyla beton numunesinin ve doğrudan ortamın sıcaklığının ölçülmesiyle rejim belirlenmiştir. Termokupllardan bir tanesi numunenin merkezine gömülü olup bununla numunenin merkezindeki donma-çözülme sıcaklıkları ölçülürken diğeri dondurucu ortamına sarkıtılarak ortamın sıcaklık değişimi ölçülmüştür. Dondurucu ortamı olarak UĞUR marka yaklaşık 470 lt kapasiteli derin dondurucu kullanılmıştır (Şekil 53).

Numunelerin donma-çözülme dirençleri, yukarıda numarası verilen standartta belirtildiği gibi, betonların dinamik elastisite modüllerinin belirlenmesiyle ölçülemeye çalışılmıştır.

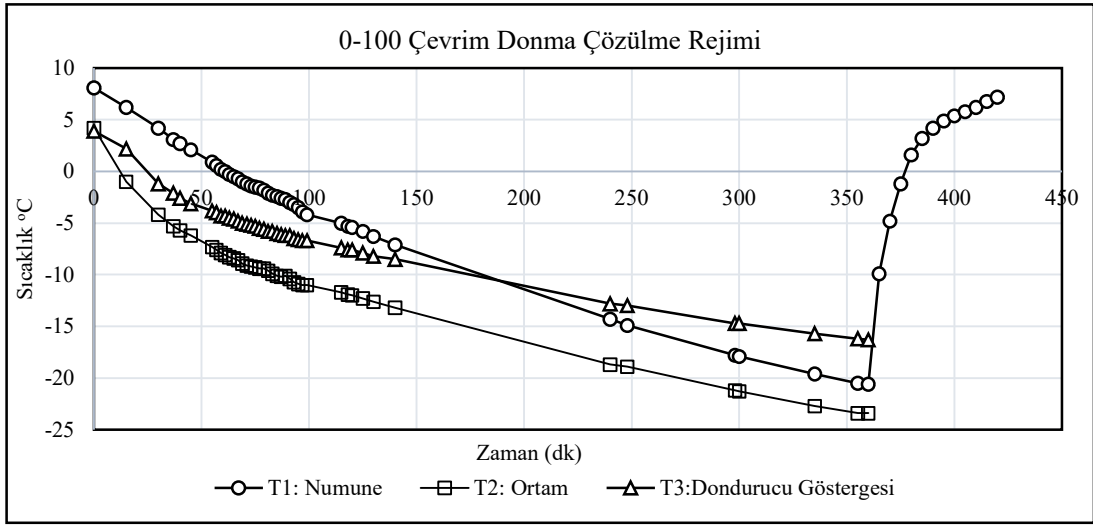


**Şekil 53.** ASTM C 666'ya göre yapılan donma-çözülme deneyi, dondurucu ortam ve dijital termometre

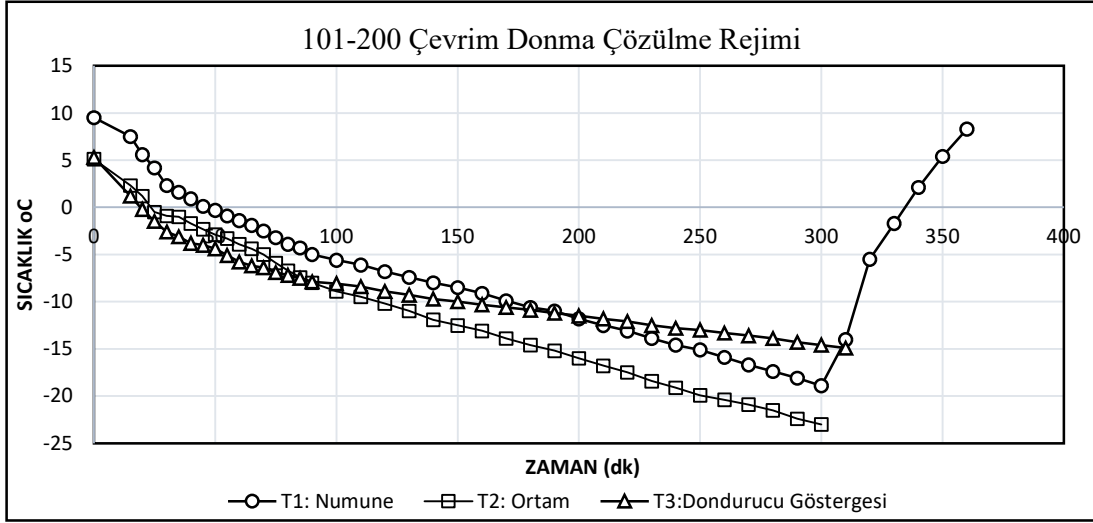
Başlangıçta 32 adet numune ile 1 adet de donma-çözülme rejimini belirlemek için üretilen termokupl gömülü olan numunenin bulunduğu dondurucu ortamın donma-çözülme rejimi şöyle olmuştur; 4,5 saat donma ( $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' ye kadar),  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de (minimum sıcaklıkta) 1 saat bekletilme daha sonra 1 saat suda çözülme (yaklaşık 30 dk'da sıcaklık  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' ye çıkmıştır ardından 30 dk daha bekletilmiştir). Dolayısıyla bir çevrim 6,5 saat sürmüştür ve bu durumda donma hızı  $4,9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$  olmuştur.

28, 100 ve 200. çevrim sonunda da donma-çözülme rejimleri belirlenmiştir. Çevrim sayısı arttıkça numunelerin bazıları, tabakalarının temas yüzeylerinden ayrılması nedeniyle, deney dışı kalmış ve çevrime kalan numunelerle devam edilmiştir. Ayrıca yine çevrim sayısının artmasıyla numunelerin içinde oluşan genleşmeler neticesinde numuneler daha hızlı donmaya ve çözülmeye başlamıştır. Gerek numune sayısının azalması gerekse de oluşan genleşmeler nedeniyle 300 çevrimlik donma-çözülme deneyi süresinde 3 tipik donma-çözülme rejimine göre deneyler gerçekleştirilmiştir. Başlangıçtan 100. çevrime kadar 6,5 saatlik çevrim uygulanmışken 100. çevrimden 200. çevrime kadar 5 saatlik (4 saat dondurma 1 saat çözülme), 200. çevrimden 300. çevrime kadar ise 3 saatlik (2,5 saat dondurma 30dk çözülme) çevrimler uygulanmıştır. Şekil 54'de donma-çözülme deney süresince uygulanan rejimleri gösteren sıcaklık zaman grafikleri verilmiştir.

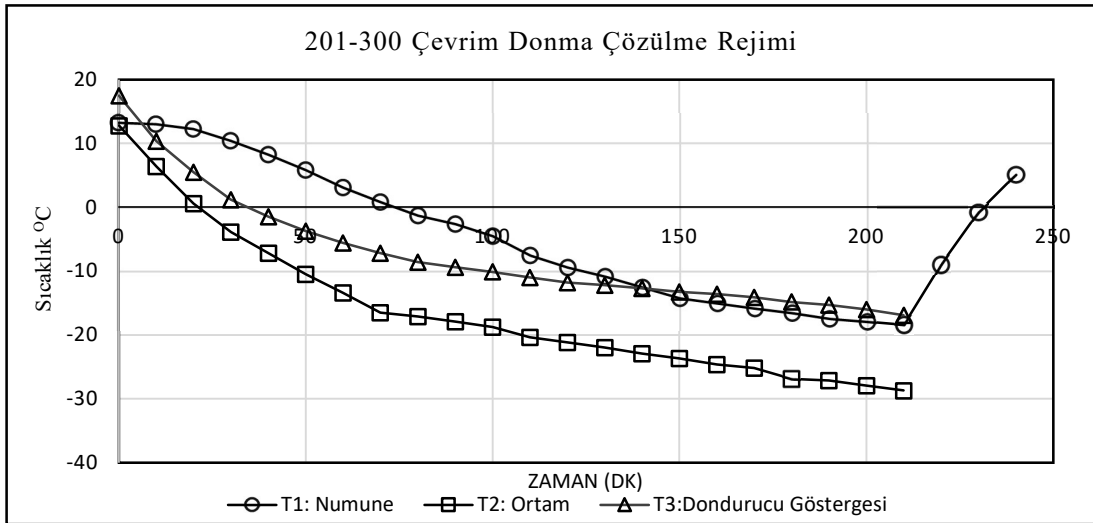




a



b



c

**Şekil 54.** 1-100 arası çevrim (a), 101-200 arası çevrim (b) ve 201-300 arası çevrimde (c) uygulanan soğutma-ısıtma rejimleri

İlk 100 çevrime kadar her 10 çevrimde bir numunelerde boy, çap ve ağırlık değişiminin yanı sıra UPV ölçümleri yapılmıştır. 100. çevrimden sonra ise her 20 çevrimde bir ölçüm alınmıştır. Numunelerin boy değişimini gözlemleyebilmek için numunenin alt ve üst kısımlarına epoksi ile metal pullar yapıştırılmış ve ölçümler bu pullar üzerinden alınmıştır. Ağırlık değişimleri için 0,01 g hassasiyetli terazi ile ölçümler yapılmıştır. Deneyler esnasında çevrimlerin devam etmeyip numunelerin beklemesi gerektiği durumlarda numuneler çözülmüş olarak bekletilmiştir.

ASTM C 666 (Anonymous 2015) gereğince bağıl dinamik elastisite modülü ( $P_n$ ) aşağıda verilen Denk. (27)'ye durabilite faktörü ( $D_f$ ) ise Denk. (28)'e göre hesaplanmıştır.

$$P_n = (f_n^2 / f_1^2) \times 100 \quad (27)$$

$$D_f = P_n \times (N/M) \quad (28)$$

Burada;

$P_n$ : Bağıl dinamik elastisite modülü (yüzde değeri)

$f_1$ : Donma-çözülme başlangıcındaki UPV değeri (0 çevrimdeki değer)

$f_n$ : Donma-çözülme deneyinin n. çevrimindeki UPV değeri

$D_f$ : Dayanıklılık faktörü

$N$ : Bağıl dinamik elastisite modülünün 0,60'dan az olduğu çevrim sayısı veya maruz kalacağı çevrim sayısı (hangisi küçük ise)

$M$ : Maruz kalmanın sonlandırılacağı çevrim sayısı (300).

Adı geçen standarda göre dinamik elastisite modülünün % 60'ın altına düştüğü çevrim sayısı ile betonun donma-çözülme dayanıklılığı belirlenir.

## **Mikroyapısal Analizler**

### **Cıvalı porozimetre (MIP) deneyi**

MIP analizleri, Orta Doğu Teknik Üniversitesi bünyesinde bulunan Merkezi Laboratuvar ARGE Eğitim ve Ölçme Merkezi Yüzey ve Gözenek Karakterizasyon Laboratuvarı (YGL)'nda, Quantachrome Corporation, Poremaster 60 markalı Cıvalı Porozimetre cihazı ile yaptırılmıştır. Bu analizler için, üretildiği tarihten itibaren 180 günlük olan ve donma çözülme çevriminin yapıldığı numuneler kırılarak yaklaşık 7 mm'lik çap ve uzunluklara sahip parçalar üretilmiştir.

Porozimetre cihazı, düşük basınç (50Psi'a kadar) ve yüksek basınç (55,000 Psi'a kadar) olmak üzere iki örnek haznesine sahiptir. Ölçümler için çeşitli boy ve çapta penetrometreler (örnek hücreleri) kullanmak mümkündür. Cihazda 200 mikrometre ile 0.004 mikrometre

arasındaki gözenek çapları ölçülebilmektedir. Porozimetre bilgisayar kontrollüdür. Ölçümlerde intrüzyon ve ekstrüzyon verileri elde edilebilmektedir.

Doktora tez çalışması kapsamında üretilen numunelerin 4 - 200  $\mu\text{m}$  arası büyük boyutlara sahip gözeneklerini belirlemek için düşük basınç altında MIP analizi, daha küçük boşluk boyutlarını belirlemek için ise BET analizi yapılmıştır.

### **BET yüzey alanı deneyi ile mikrogözenek boyutu belirleme**

BET deneyleri için Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (DAYTAM)'da bulunan Micromeritics 3Flex Version 5.00 marka Yüzey Karakterizasyon Cihazı (BET) cihazı kullanılmıştır (Şekil 55). 3Flex Phizorption, mezo ve mikrogözenek analizleri için yüksek performanslı bir cihazdır ve üstün doğruluk, çözünürlük ve veri azaltma sağlar. Tüm analiz istasyonları mikro gözenek için yapılandırılabilir ve ayrıca düşük yüzey alanlı malzemeler için kripton analizi ile de kullanılabilir. Buhar emme kapasitesi de mevcuttur. İzoterm veri toplama 10-6 torr aralığında başlar ( $\text{N}_2$  için 10-9 bağıl basınç aralığı). Dengeleme aralığı ise 10 ila 30 s olarak belirlenmiştir. MicroActive™ Veri Azaltma yazılımı kullanılmış olup 3Flex'in gelişmiş tasarımı  $10^{-5}$  mmHg çözünürlüğe kadar doğru sonuçlar elde etmeyi sağlamaktadır.



**Şekil 55.** BET analizi için kullanılan Micromeritics 3Flex Version 5.00 marka cihaz.

### **X-ışını kırınımı (XRD) analizi**

Çalışma kapsamında donma-çözülme uygulanmış ve uygulanmamış yaklaşık 25 mm çapındaki karotlardan hazırlanan numuneler üzerinde XRD analizleri yapılmıştır. Analizler

*EMPYREAN* marka PANalytical Data collector Programı ile dalga boyu 1,54 olan Cu- $\alpha$  ışınması ile X-Ray Difraktometre cihazında Atatürk Üniversitesi DAYTAM bünyesinde yapılmıştır. Çalışmada tarama aralığı ( $2\theta$ ) 10-90<sup>0</sup>, tarama hızı 4 derece/dakika, çalışma voltajı 5 kV, çalışma akımı ise 40 mA alınmıştır.

### **Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleme**

SEM incelemeleri donma çözülme deneyi yapılmış ve yapılmamış olan 3D beton numunelerden alınan yaklaşık 25 mm çaplı kesitler üzerinde yapılmıştır. Numune yüzeyleri taş kesme makinasında düzeltildikten sonra incelenecek yüzey vakum altında altın kaplanarak hazırlanmıştır. Görüntüler, Atatürk Üniversitesi DAYTAM bünyesinde bulunan *Zeiss Sigma 300* markalı taramalı elektron mikroskobundan alınmıştır. Cihaz Sistem Schottky Field-Emission elektron tabancasına sahiptir ve 4 Segmentli Backscatter Elektron Dedektörü (BSD) bulunmaktadır. Cihazın 1 kV çözünürlük değeri 2.3 nm, 15 kV çözünürlük değeri 1.5nm'dir. Ayrıca cihazda bulunan EDX dedektörü ile nokta analizi de yapılmıştır. Alınan görüntüler ve çıkarılan yorumlar Araştırma Bulguları bölümünde verilmiştir.

## ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde taze ve sertleşmiş beton deneyleri ile mikro yapısal analizlerin sonuçları verilmiş ve gerek standartlarla gerekse de diğer çalışmalarla karşılaştırılarak bulgular değerlendirilmiştir.

### Taze Beton Deneyleri Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Taze beton deneylerinden birim hacim ağırlık, hava içeriği, yayılma çapı ve prize başlama süresi sonuçları ile imalatın kontrolü için yapılan basınç dayanımı deneyi sonuçları Tablo 10'da verilmiştir.

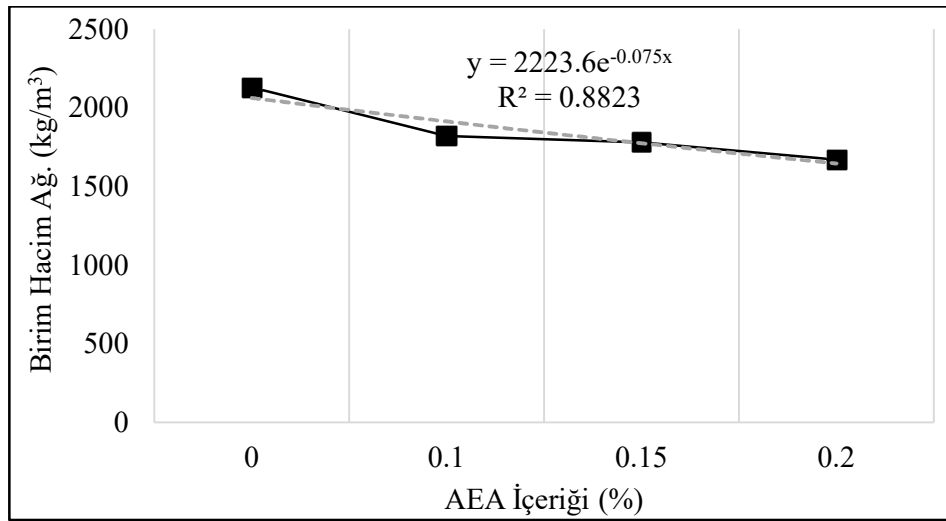
**Tablo 10.** Taze Beton Deney Sonuçları

Numune Kodu	Birim Hac. Ağ. (kg/m <sup>3</sup> )	Hava İçeriği (%)	Yayılma Çapı (cm)	Prize Başlangıç(dk)	Basınç Dayanımı (MPa)
A0	2130	2,5	14,5	35	54,54
A1	1820	6,5	16,3	60	28,63
A1,5	1780	7,5	16,5	75	18,94
A2	1670	8,5	16,7	90	11,75

Tablo 10 incelendiğinde taze beton deneyleri sonuçları üzerinde hava sürükleyici katkının (AEA) etkisi çok yüksek olduğu görülmektedir. Tabloda verilen deneysel bulgular aşağıdaki alt başlıklarda değerlendirilmiştir.

### Birim hacim ağırlık sonuçlarının değerlendirilmesi

3D betonların taze birim hacim ağırlık deneyi sonucu Şekil 56 'da verilen grafikte gösterilmiştir. Şekil 56 ve Tablo 10'da verilen taze birim hacim ağırlık sonuçları incelendiğinde AEA miktarı arttıkça, betonun hava içeriği de arttığından, birim hacim ağırlığın azaldığı görülmüştür. Öyle ki bu azalış 3D betonların birim hacim ağırlığını normal betondan daha düşük hatta hafif betonlar için belirlenen üst sınırlara ulaştırmıştır. AEA kullanılmayan A0 grubunun bile birim hacim ağırlığı 2130 kg/m<sup>3</sup> olarak bulunurken en yüksek oranda AEA kullanılan grup olan A2'nin birim hacim ağırlığı 1670 kg/m<sup>3</sup> bulunarak hafif bir 3D beton elde edilmiştir. A2 grubu betonun hafif ve en düşük basınç dayanım değerine sahip olmasına rağmen 3D betonun taşınabilirlik özelliği gereği üst üste dökülen tabakalar hem kendi yüklerini hem de üstteki tabakaların yüklerini rahatlıkla taşımıştır.



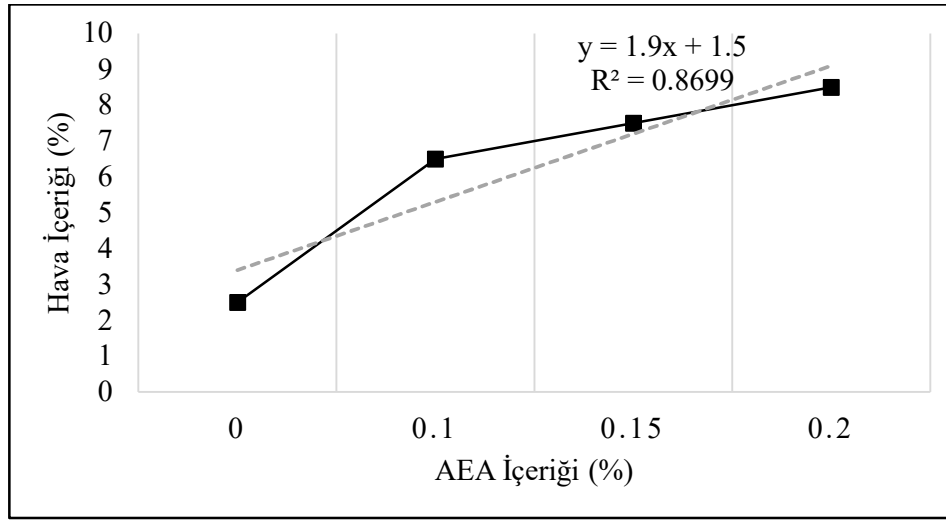
**Şekil 56.** Taze birim hacim ağırlık sonuçları

3D betonların taze beton özelliklerini inceleyen araştırmacılardan Hambach *et al.* (2019) lif katarak üretmiş oldukları 3D betonların birim hacim ağırlıklarını 1927-1867 kg/m<sup>3</sup> arasında belirlemişlerdir. Kazemian *et al.* (2019) 3D betonların taze beton özelliklerini inceledikleri çalışmada lifsiz, propilen lifli, nanokil ilaveli ve silis dumanı ilaveli 3D betonların birim hacim ağırlıklarını 2265-2210 kg/m<sup>3</sup> olarak bulmuşlardır. Lu *et al.* (2019) tarafından yapılan hava sürükleyici katkının 3D betonların reolojik özellikleri üzerine etkisini inceledikleri çalışmada ise betonların taze birim hacim ağırlıkları 2000 kg/m<sup>3</sup>'ün altında belirlenmiştir. Öyle ki hava sürükleyici dozajının miktarındaki artışla orantılı olarak-ki bu çalışmada hava sürükleyici dozajı %0, %0,1 ve %0,2 olarak alınmıştır- birim hacim ağırlıklar önemli ölçüde azalmıştır. Dolayısıyla beklenildiği üzere ve literatürle de uyumlu olarak bu tez çalışmasında da AEA oranı birim hacim ağırlığı etkileyen en önemli parametre olmuştur.

### **Hava içeriği oranının değerlendirilmesi**

Hava içeriği deney sonuçları grafize edilmiş ve Şekil 57'de gösterilmiştir.

Şekil 57'den görüldüğü üzere AEA dozajı, betonların hava içerikleri üzerinde önemli artışlara yol açmıştır. AEA kullanılmayan grubun hava içeriği %2,5 olmasına rağmen minimum dozajda (%0,1) hava sürükleyici eklenmesiyle bile bu oran %6,5'a ulaşmıştır. Genel olarak AEA dozajının artmasıyla doğru orantılı olarak betonların hava içerikleri de artmıştır. Ancak bu artış, hiç hava sürüklenmemiş betonlara göre az bir miktar (%0,1) hava sürüklenmişlerde oldukça yüksek iken hava sürükleyici içeren üç karşımda nispeten düşük olmuştur. Öyle ki, AEA katılmayan betonlara göre %0,1 oranında AEA eklenen betonlarda hava miktarındaki artış %160 olmuş iken %0,15 ve %0,2 oranında hava sürüklenenlerde %0,1 oranındakilere göre, sırasıyla, %15 ve %31 oranında artış görülmüştür.



**Şekil 57.** Hava içeriği deney sonuçları

Şahin (2003) yaptığı doktora tez çalışmasında %0, 0,05 ve 0,1 oranlarında AEA kullanmış ve taze betonda %0 – %6 oranlarında hava miktarları ölçmüştür. Şahin (2013) tarafından yapılan doktora tez çalışmasında ise kimyasal esasları farklı olan 6 farklı AEA kullanılmıştır. %0- %0,00625- %0,0125- %0,025- %0,05- %0,1- %0,125- %0,2 oranlarında AEA kullanmış ve %1 – %7,5 miktarları arasında değişen hava içerikleri elde etmiştir.

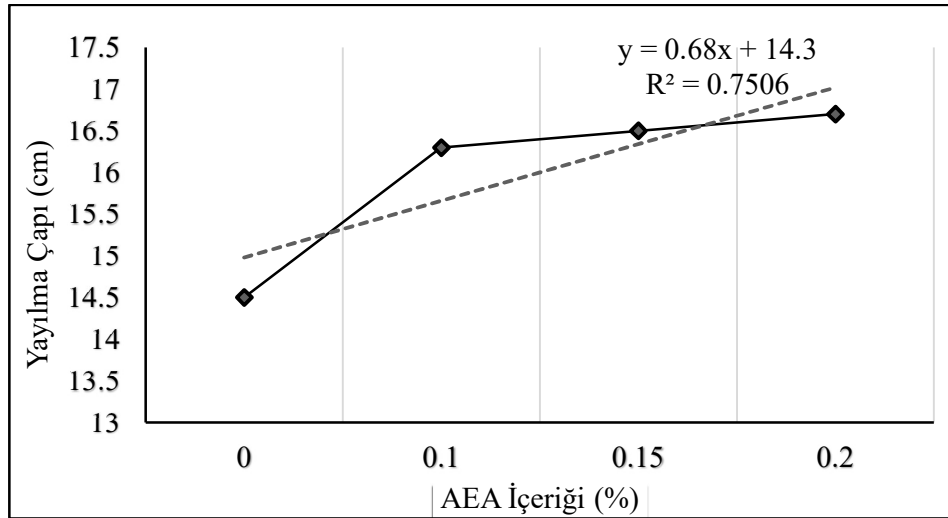
Zhang and Ansari (2006) hava sürüklenmiş tipik betonların hacimce %4–%8 arasında hava miktarı içerdiklerini belirtmiştir. TS EN 206 (Anonim 2017b) standardına göre donma çözülme çevrimlerine dayanıklı beton üretebilmek (XF çevresel etki sınıfları) için önerilen hava içeriği miktarı en az % 4'tür. Salt taze betonun sahip olduğu hava içerikleri açısından değerlendirildiğinde çalışma kapsamında üretilen taze betonların donma-çözülme direnci bakımından yeterli hava miktarına sahip oldukları kanaati oluşmuştur.

Taze betonun reolojik özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biri de yüzey aktif maddelerin bir karışımı olan hava sürükleyici katkılarıdır. Genellikle hidrofobik zincire bağlı hidrofilik uçlardan oluşan hava sürükleyici ajanların hidrofilik uçları ya çimento-su ya da hava-su arayüzlerine tutunarak hava boşlukları meydana getirirler (Bizinotto *et al.* 2017). Bu adsorpsiyon hava-su yüzey gerilimini güçlü bir şekilde azaltır, bu nedenle hava sürükleyici katkıları küçük kabarcıkların oluşumunu ve stabilizasyonunu gerçekleştirir (Chatterji 2003). Reoloji açısından bakıldığında, sürüklenen kabarcıklar AEA' nın özelliğine bağlı olarak çimento hamurunun yağlanması ve hacminin artmasında rol oynayabilir, yani çimento bazlı malzemelerin işlenebilirliğini geliştirebilir (Du and Folliard 2005). Szwabowski *et al.* (2008) kendiliğinden yerleşen betonun hava içeriğinin %5' e ulaşmaya kadar akma gerilmesi (yield stress) ve plastik viskozitesinin azalmaya devam ederken yayılmanın arttığını, daha sonra stabil kaldığını belirlemiştir. Bununla birlikte, Banfill (2003) hava içeriğinin artmasının betonun

plastik viskozitesini güçlü bir şekilde azalttığını, fakat akma gerilimi üzerindeki etkilerinin önemli olmadığını ortaya koymuştur. Barfield and Ghafoori (2012) ise farklı AEA tipleri ile yapılan betonların performanslarını incelemiş ve benzer hava içeriğine sahip taze betonların çökmede büyük bir fark gösterebileceğini ileri sürmüşlerdir. Görüldüğü üzere, hava içeriğiyle taze betonun reolojik özellikleri arasında, her zaman çok güçlü ilişkiler olmayıp taze betonun farklı reolojik özellikler sergileyebilmesi söz konusudur. Nitekim ilerleyen alt başlıklarda detaylandırılacağı gibi, bu doktora tez çalışması kapsamında üretilen betonların hava içeriği miktarı bariz biçimde artmasına rağmen betonların yayılma çapları çok fazla değişmemiştir.

### Yayılma tablası deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Taze beton deneyleri kapsamında yapılan yayılma tablası deneyi sonuçları Şekil 58’deki grafikte verilmiştir.



Şekil 58. Yayılma tablası deneyi sonuçları

Yayılma çapı sonuçlarına göre üretilen 3D beton numunelerde AEA ilave edilen gruplar birbirine çok yakın değerlerde yayılmışken (16 cm civarı) katkının ilave edilmediği grup bunlardan farklılaşmış ve daha az (14 cm) yayılmıştır. Bununla birlikte, 4 grubunda yayılma çaplarının birbirine yakın olduğu da söylenebilir.

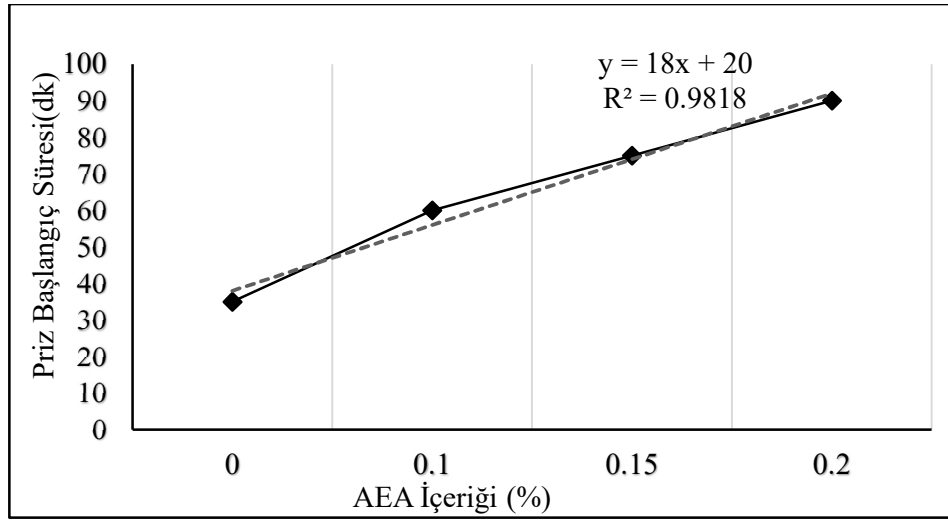
Tay *et al.* (2019) çökme ve yayılma tablası testi kullanılarak 3D beton baskı için yazdırılabilirlik bölgesini belirlemeye çalıştıkları çalışmada silis dumanı ve uçucu kül kullanarak 16 grup 3D beton üretmişlerdir. Bu grupların yayılma çapları yaklaşık olarak 110 cm ile 210 cm arasında değişmiştir. Rubio *et al.* (2017) lifli çimento esaslı malzemelerle oluşturulan 3D baskı betonlarının taze ve reolojik performanslarını inceledikleri çalışmada uçucu kül katmadıkları grupların yayılma çapı yaklaşık 28 cm iken uçucu kül ilave edilen gruplarınki 25,5 cm olarak bulunmuştur. Silis dumanı ilave edilmesiyle bu değerler 25 ve 20



cm aralığına gelmiştir. Propilen lif katılması durumunda ise yayılma çapları yaklaşık olarak 22 ila 25 cm arasında bulunmuştur. Lu *et al.* (2019) uçucu kül ve AEA ile spreylü 3D yazdırılabilir çimentolu malzemelerin özelliklerini inceledikleri çalışmada hava sürükleyici katkının oranına göre 15 cm ila 25 cm arasında değişen yayılma çapları elde etmişlerdir. Rahul and Sanatham (2020) ise üretmiş oldukları 4 grup 3D baskılanabilir betonun yayılma çaplarını 18,3 – 18,4 – 18,5 ve 18,7 cm olarak bulmuştur. Bu tez çalışması kapsamında bulunan yayılma tablası deney sonuçları da literatürdeki çalışmalarla benzerlik göstermektedir.

### Prize başlama sürelerinin değerlendirilmesi

Tablo 10’da betonların priz süreleri ile ilgili olarak verilen değerlerin grafiğe aktarılmış hali Şekil 59’da verilmiştir.



**Şekil 59.** Priz başlangıç süresi tayini deney sonuçları

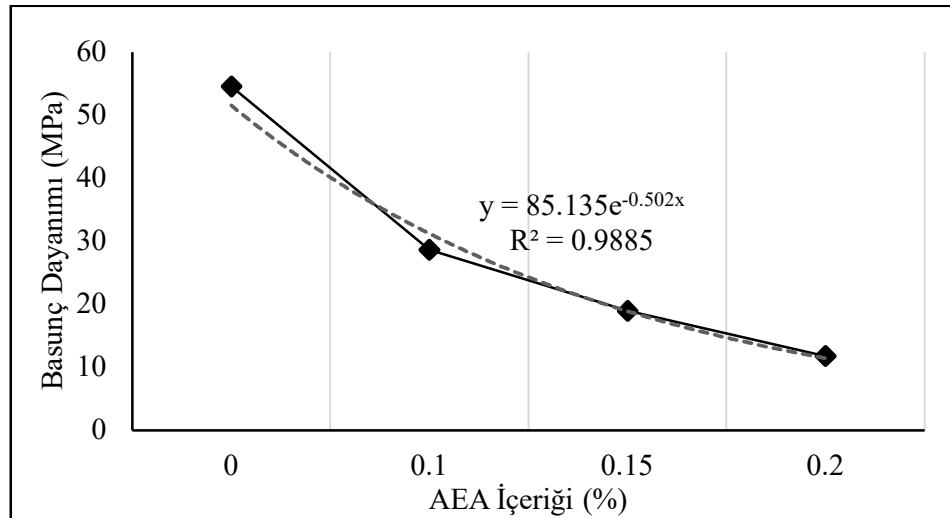
Şekil 59’den görüldüğü üzere 3D betonların priz sürelerinin başlamasında AEA çok etkin rol oynamıştır. AEA ilave edilmeyen grup 35 dk gibi oldukça erken bir sürede prize başlamıştır. Kullanılan yüksek dozajda CEM I 52,5 R tipi çimentonun, priz sürelerinin kısa olmasında etken rol oynadığı düşünülmektedir. AEA ilave edilen gruplarda ise katkıının dozajındaki artışa bağlı olarak priz süresi uzamıştır. Öyle ki en fazla oran olan %0,2 AEA katılan grubun prize başlama süresi 90 dakikadır. Bununla birlikte, Tablo 3’den de görülebileceği üzere, çalışmada kullanılan çimentonun priz başlangıç süresi 110 dk’dır. 3D betonların dört grubunun da priz başlangıç sürelerinin bu zamandan kısa olması betonların prizi üzerinde kullanılan kimyasal katkı maddelerinin etkisinin olabileceğini düşündürmektedir.

Le *et al.* (2012) yüksek performanslı baskı betonların karışım hesapları ve taze beton özelliklerini araştırdıkları çalışmada baskı alınabilirlik süresini (open time) belirlemek için Vicat iğnesi deney yöntemini kullanarak 3D baskı betonların prize başlama sürelerini

ölçmüşlerdir. Ancak priz başlama ve bitişini belirlemenin 3D betonların baskı alınabilirlik süresini bulmak için tek başına yeterli olmadığını belirtmişlerdir. Yapılan bu doktora tez çalışması da bu düşünceyi doğrulamıştır. Çünkü çalışma kapsamında üretilen 3D baskı betonlar hareketsiz kaldığı zaman (yani karıştırılmaya devam edilmezse) katılaşmaya başlayarak işlenebilirlik özelliklerini kaybetmişler, ancak prize (yani sertleşmeye) başlamamışlardır. Beton karıştırılmaya devam edilmezse henüz sertleşmemiş olmasına rağmen nozul ucundan ekstrüde edilebilme özelliğini kaybedebilmektedir. Bu durum baskı alınabilirlik süresinin bitmesi anlamına gelmektedir. Karıştırılmadan beklemesi katılaşmaya yol açtığından Vicat iğnesi düşürüldüğü halde yeterince batmayabilmekte bu da prizin başladığını düşünme yanlışı doğrulamaktadır. Le *et al.* (2012) taze betonun işlenebilirliğini (yani baskı alınabilirlik süresini) belirleyebilmek için kanatlı kesme deneyini kullanarak her 15 dakikada bir ölçüm almıştır. Bu tez çalışması kapsamında ise rotasyonel reometre cihazı kullanılarak üretilen 3D betonun reolojik özellikleri belirlenmiş ve baskı alınabilirlik süresi hakkında yorum yapılmıştır. Yine de Şekil 59’da verilen grafikten hareketle, AEA miktarı arttıkça prize başlama süresinin artacağını dolayısıyla betonun işlenebilirlik süresinin de uzayacağını belirtmek yanlışı olmayacaktır.

### 3D betonların basınç dayanım sonuçlarının değerlendirilmesi

3D betonu tasarım çalışmaları esnasında çok sayıda beton üretilmiş ve bu betonların basınç dayanımları belirlenmiştir. Eklenen katkı türü, miktarı ve katkıların birbiriyle etkileşimine göre farklı basınç dayanım sonuçları elde edilmiştir. Nihai olarak karar verilen 3D karışım hesabına göre üretilen betonların 5×5×5 cm<sup>3</sup>’lük numuneler üzerinde belirlenen 28 günlük basınç dayanımları Şekil 60’da verilen grafikte görüldüğü gibidir.



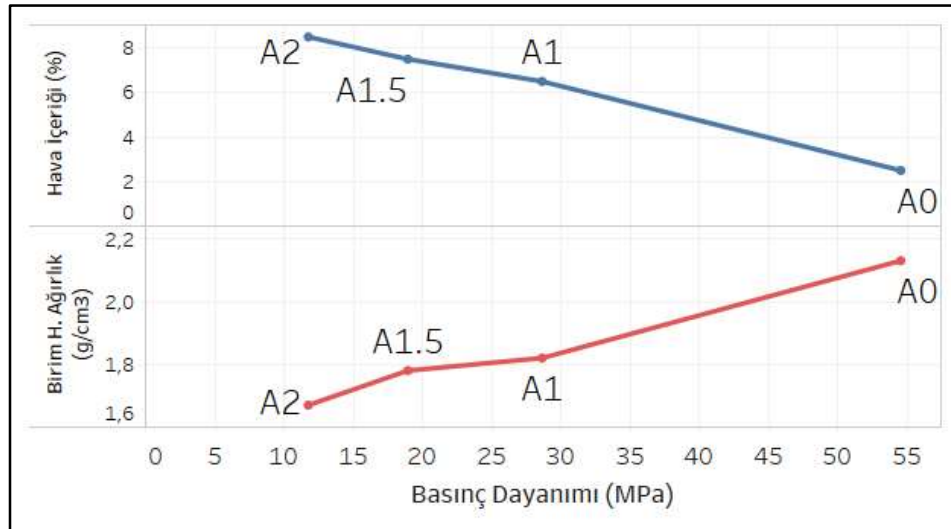
Şekil 60. Basınç dayanımı hava sürükleyici katkı ilişkisi

Şekil 60'daki grafikden görülebileceği gibi, AEA katılmayan grupta yüksek dayanımlı betonun alt sınırının üzerinde dayanım değeri (~55 MPa) elde edilmiştir. Fakat eklenen AEA dozajıyla ters orantılı olarak betonların basınç dayanımları dramatik bir şekilde azalmıştır (Şekil 60). A0 grubuna göre azalma miktarları, A1, A1,5 ve A2 grupları için, sırasıyla, %47, %65 ve %78'dir.

AEA maddelerinin artması ile betonun basınç dayanımının düşmesi beton teknolojisinde beklenen bir sonuçtur. AEA maddeleri ile beton içinde oluşturulan küçük, kapalı ve ayrık haldeki milyarlarca hava boşluğu betonun basınç dayanımının azalmasına yol açmaktadır. Özalp vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada elde edilen betonların basınç dayanımları Beyaz Portland 52,5 R tipi çimento kullanılan gruplarda yaklaşık olarak 60 MPa olarak bulunmuştur. Bu tez çalışması kapsamında elde edilen maksimum basınç dayanımı değeri de Özalp vd. (2018)'da elde edilen sonuca yakındır.

Basınç dayanım deneyi esnasında rötre oluşumunu engellemek için katılmış olan polipropilen liflerin sayesinde betonlar kırılırken ezilerek kırılmış olup sünek kırılma davranışı sergilemişlerdir.

3D betonların basınç dayanımları ile diğer iki taze beton özelliği (birim ağırlık ve hava içeriği) arasındaki ilişki ise aşağıda Şekil 61'de verilmiştir. Grafik, basınç dayanımı ile hava içeriği ve birim hacim ağırlık arasındaki ilişkiyi göstermek için hazırlanmıştır. Her üç deney sonucu da birbirinden bağımsız olup grafiğin yatay ekseninde verilen basınç dayanımı değerleri bağımsız değişken olarak düşünülmüştür.



Şekil 61. Basınç dayanımı, birim ağırlık ve hava içeriği arasındaki ilişki

Şekil 61'den birim hacim ağırlık ve hava içeriği ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin aşağı yukarı birbirlerinin aynadaki görüntüsü şeklinde olduğu görülmektedir. Literatüre paralel

olarak betonların birim ağırlıkları arttıkça basınç dayanımları artmış, buna karşın, hava içerikleri arttıkça basınç dayanımları düşmüştür.

### 3D betonların reolojik özelliklerinin değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında üretilen 3D betonların reolojik<sup>2</sup> özelliklerinin belirlenmesi oldukça önemli bir faktördür. Çünkü gerek baskı alınabilirlik süresi gerekse ekstrüde edilebilirlik özelliği doğrudan reolojik özellikleriyle ilgilidir. Bu bağlamda üretilen 3D betonların çeşitli reolojik özellikleri ölçülmüş ve literatürde yapılan 3D betonların reolojik özelliklerini belirleyen çalışmalarla kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçların yorumlanmasına yardımcı olması bakımından reolojik parametrelerin neler olduğu ve nasıl belirlendiği hususlarına aşağıda kısaca değinilmiştir.

*Viskozite:* Bir sıvının akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Viskozite arttıkça direnç de artar. Viskozitenin birimi cgs sisteminde poise (P)'dir. Poise,  $\text{dincm}^2 \text{sn}$  veya  $\text{gcm}^{-1}\text{sn}^{-1}$  dir. Uluslararası birim sisteminde (International System of Units-SI) ise, Newton/metrekare (Pascalsaniye=Pas)'dir. Daha çok mili Pascalsaniye (mPas) tercih edilmektedir.

*Akma dayanımı (Yield stress):* Newtonsal olmayan akışkanların hareket etmeye başlaması için uygulanan kuvvetin kritik bir değerin üzerinde olması gereklidir. Bu kritik değer "akma dayanımı (yield stress)" dir.

*Plastik viskozite:* Maddenin kayma eşiğini aştıktan sonra, akmaya karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir. Reolojik çalışmalar kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Elde edilen bu ilişkiden de kayma eşiği ve plastik viskozite bulunmaktadır (Banfill 2003, Çelebi 2009, Çankayalı vd. 2009).

*Tiksotropi:* Zamana bağlı olarak akış özelliğinin değişmesidir. Dispers sistemlerde sıkça meydana gelen bir olaydır. Tiksotropide gerilim ile viskozluğun geri dönüşümlü (reversible) olarak azaldığı görülmektedir. Gerilim kalkınca zamanla eski haline dönerler. Statik koşullar altında kalın veya viskoz olan bazı jeller veya sıvılar, çalkalandığında, kayma gerilmesinde veya başka gerilmeler etkisiyle zaman içinde akacaktır. Tiksotropi ayrı bir akış tipi değil, mevcut akış tiplerinin zamana bağlı yapısal değişimidir. Tiksotropi gösteren materyallere örnek olarak taze beton, bazı emülsiyon ve süspansiyonlar verilebilir. Tiksotropik davranış, taze bir betonun kayma direncinin sabit bir deformasyon hızında zamanla azalmasıdır (Anonim 2020y, Anonim 2020z).

---

<sup>2</sup> Sıvıların akış, katıların deformasyon özelliklerini tanımlayan reoloji, rheos (iş) ve logos (bilim) kelimelerinden oluşmuştur. Reoloji, malzemenin gerilme altında zamana bağlı şekil değişimini (deformasyon) ve akış özelliklerini inceleyen bilim dalıdır.

*Viskoplastik sıvılar:* Viskoplastik sıvıların akış davranışı bir eşik kayma geriliminin görülmesi ile tanımlanmaktadır. Çimento hamuru ve taze beton da plastik sıvı tanımına uymaktadır. Taze harç ve betonu, reolojik açıdan temsil eden viskoplastik sıvıların akış modeli olan Bingham Modelidir (Banfill 1990). Taze betonun Bingham' ın önerdiği denklem (26)'ya göre viskoplastik davranış gösterdiği kanıtlanmıştır. Bu modele göre her taze beton karışımının bir eşik kayma değeri ve plastik viskozitesi vardır. Burada  $\tau$  (Pa) kayma gerilmesi (shear stress),  $\gamma$  (1/s) kayma oranı kayma hızındaki kayma gerilimini,  $\tau_0$  (Pa) (akma gerilmesi (yield stress) yani kayma eşiği ve  $\mu$  (Pa.s) ise plastik viskoziteyi tanımlamaktadır (Banfill 2003, Çelebi 2009, Çankayalı vd. 2009).

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma \quad (26)$$

Denk. (26) dan görülebileceği üzere kesme gerilimi ( $\tau$ ) akma geriliminden ( $\tau_0$ ) daha yüksek olana kadar taze beton akamaz.

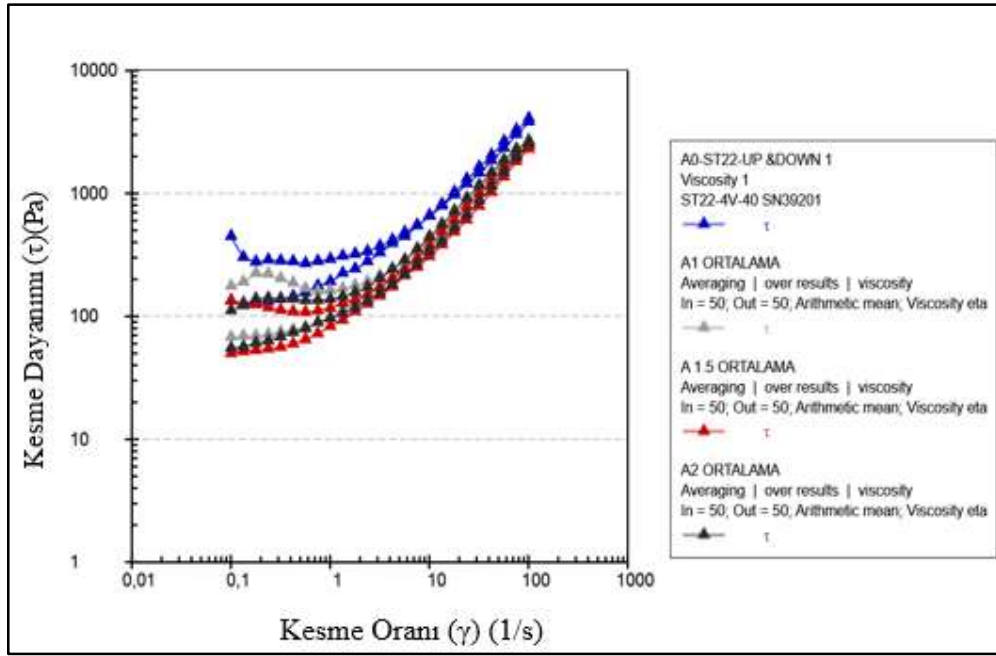
Bingham modeli yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü betonun akma gerilimi ve plastik viskozitesi zaman içinde sabittir ve bağımsız olarak ölçülebilir (Dils *et al.* 2013). Kayma eşiği ( $\tau_0$ ), bir maddeye uygulanan akmanın başlaması için gereken kayma gerilimidir. Kayma gerilimi, kayma eşiğini aştığı zaman madde akmaya başlar ve akmaya karşı olan direnç plastik viskoziteye bağlıdır. Viskozite ve kayma eşiği gibi reolojik özellikler Bingham modeli kullanılarak çimento hamuru, harç ve betonda reometre aleti ile ölçülebilir.

Yukarıdaki tanımlamalara göre belirlenen 3D taze betonların reolojik özellikleri Tablo 11'de verilmiştir. Cihazın düşük kayma hızlarından yüksek kayma hızlarına geçişi sırasında belirlenen parametreler “up (veya hızlanma rampası)” ve yüksek kayma hızından düşük kayma hızlarına geçişi sırasında belirlenen parametreler ise “down (veya yavaşlama rampası)” olarak gösterilmiştir.

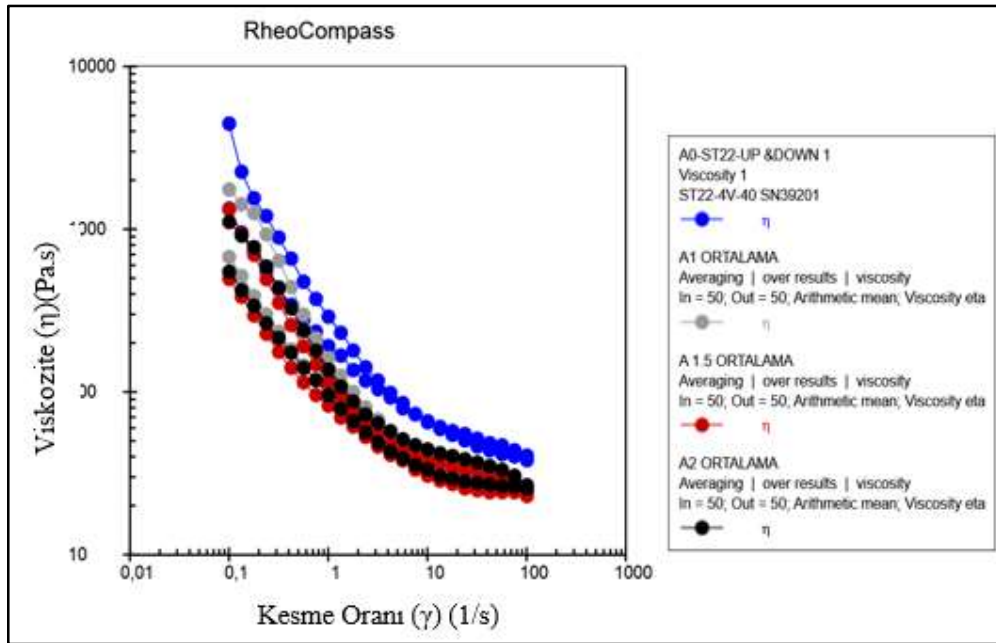
**Tablo 11.** 3D Betonların Akma Gerilmeleri ve Vizkoziteleri

KOD	Up		Down	
	Akma Dayanımı (Pa)	Bingham Viskozitesi (MPa.s)	Akma Dayanımı (Pa)	Bingham Viskozitesi (MPa.s)
A0	262.23	37232.00	131.78	47697.00
A1	155.44	26457.00	68.28	26959.00
A1.5	98.96	26343.00	50.87	24606.00
A2	115.90	31110.00	59.36	26523.00

Diğer taraftan, Şekil 62'de bütün grupların kesme gerilmelerini gösteren grafik, Şekil 63'de ise yine bütün grupların vizkozite değişimlerini gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 62. Bütün grupların kesme gerilmesini gösteren grafik



Şekil 63. Bütün grupların vizkozite değişimlerini gösteren grafik

Histerezis döngüsü yöntemi artan ve azalan akış eğrilerinin belirlenmesinden oluşur. Yükselen ve azalan akış eğrileri arasındaki alan tiksotropi indeksi olarak kullanılır. Bu testin çeşitli zaman aralıklarında tekrarlanması yapı kinetiğinin bir göstergesi olarak kullanılabilir (Zhang 2019b). Bu çalışma kapsamında histerezis döngüleri arasında kalan alandan elde edilen tiksotropi değerleri ise Tablo 12’de verilmiştir.

**Tablo 12.** Tiksotropi Değerleri

Numune Kodu	Hysteresis Alan (Pa/s)	Hysteresis Alan (Pa/(s·cm <sup>3</sup> ))
A0	18792	536,92
A1	18288	522,52
A1.5	19372	553,49
A2	25877	739,35

Şekil 62 ve 63’de verilen grafikler incelendiğinde A0 grubunun akma dayanımı ve vizkozitesi diğer gruplardan daha yüksektir. AEA katılan diğer üç grubun, hava içerikleri farklı olmasına rağmen, akma dayanımları ve vizkozite değerleri birbirine oldukça yakındır. En fazla AEA katılan A2 grubunun en düşük viskozite ve kesme dayanıma sahip olması beklenirken A1,5 grubu en düşük reolojik özelliklere sahip olan grup olmuştur. A1 grubu, A0 grubundan sonraki viskozite ve kesme dayanımı değerine sahip olup bunu A2 grubu ve nihayetinde A1,5 grubu izlemiştir.

Şekil 56, 57, 58 ve 59’ da verilen birim hacim ağırlık, yayılma çapı, hava içeriği ve priz süresi ile ilgili grafikler göz önüne alındığında, üretilen 3D betonların reolojik değerlerinin bu sonuçlarla kısmen uyumlu olduğu görülmektedir. Çünkü AEA ilave edilmesiyle betonların viskozite değerleri azalmış ve AEA miktarındaki artışa paralel olarak viskozitedeki düşüş devam etmiştir. Ancak A1,5 ve A2 grubu oldukça birbirine yakın bulunmuştur. Bununla birlikte, AEA dozajının bariz bir biçimde değiştirilmesine rağmen üretilen bütün 3D beton gruplarının reolojik ölçümlerinin birbirine oldukça yakın çıktığını belirtmek gerekir.

3D betonların reolojisini inceleyen çalışmalara bakıldığında aşağıdaki bilgilere ulaşılmıştır.

Zhang *et al.* (2019b)’de yüksek tiksotropi 3D baskı betonunun reolojik ve sertleşme özellikleri araştırılmıştır. Akışkanlık, reolojik özellik (viskozite, akma gerilimi, tiksotropi) ve baskı alınabilirlik zamanı, beton malzemenin yazdırılabilir özelliğini (pompalanabilirlik, ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik) kontrol etmek için kritik taze beton özellikleri olarak kabul edilmiştir. Agrega/bağlayıcı oranının değişmesiyle elde edilen beş farklı karışım üzerinde yapılan reolojik ölçümler neticesinde; su/çimento oranının değişimi ile viskozite ve akma gerilmesi arasındaki farkın azaldığı, tiksotropik değer su/çimento oranı 0,5 olduğunda 6284.5 Pa/s olduğunu bunun da su/çimento oranının 0,6 olduğu gruba göre %23,1’lik bir azalma ile ortaya çıktığı belirtilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında elde edilen bulgular bu makaledeki sonucu destekler niteliktedir. Nitekim Tablo 12’deki tiksotropi değerlerinden görüldüğü üzere A0 grubundan A2 grubuna gidildikçe tiksotropi değeri genel olarak artmıştır. Zhang *et al.* (2019b) çalışmasında da su/çimento oranı arttıkça (yani beton daha akışkan bir hal aldıkça) tiksotropi değerinin arttığı belirtilmiştir. Zhang *et al.* (2019b)’de ileri sürülen agrega / çimento

oranının değişmesi ile başlangıçtaki viskozite ve akma gerilmesindeki artış ve tiksotropi değerindeki azalma, sulu süspansiyondaki çekirdeklenme etkisi ile açıklanmıştır (Tregger *et al.* 2010; Liu *et al.* 2011; Zhang *et al.* 2017). Sonuçta, 3,8 – 4,5 Pa.s viskozite, 178,5 – 359,8 Pa akma gerilmesi ve 6284,5 Pa/s tiksotropinin altında reolojik değerlere sahip baskı beton malzemeleri ile çok akışkan ya da çok sert olacağı için tam bir örnek veya bileşen basılamayacağı doğrulanmıştır. Tablo 11 ve 12'den görüldüğü üzere bu tez çalışması kapsamında elde edilen reoloji değerleri bu değerlerden yüksektir. Bu nedenle üretilen karışımlar 3D baskılanabilir beton için uygun aralıklardadır.

Moeini *et al.* (2020) 3D baskı için kullanılan çimentolu harçların inşa edilebilirliğini değerlendirmede reometrik yöntemlerin etkinliğini incelediği çalışmada farklı kum içerikleri ve gradasyonlarıyla oluşturduğu 4 grup 3D baskılanabilir betonun statik akma gerilmesi değişiminin zamanla değişimini incelemiş ve 0-200 Pa değerinden 20 dakika sonra 1000-1200 Pa değerlerine ulaştığını görmüştür. Sooraj *et al.* (2020) yaptıkları çalışmada çimento bağlayıcılı 3D baskı betonlarında malzeme karakteristiklerinin ekstrüde geometrisine etkisini incelemişlerdir ve 50-300 Pa arasında akma gerilmesi değerleri elde etmişlerdir. Bu tez çalışması kapsamında üretilir üretilmez reometre cihazına konarak reolojik özellikleri ölçülen 3D betonların akma gerilmesi değerleri yaklaşık olarak 90 ila 250 Pa arasında (Tablo 11) bulunmuştur. Dolayısıyla bulunan sonuçlar 3D betonların akma gerilmesi değerlerini araştıran çalışmalarla uyumludur.

### **Sertleşmiş Beton Deneyleeri Sonuçları ve Değerlendirmesi**

3D beton elemanlardan alınan Ø100×100 mm×mm boyutlarındaki karot numuneleri üzerinde birim hacim ağırlık, kılcal su emme, ultrases geçiş hızı (UPV), basınç dayanımı ve donma-çözülme direncinin tayini deneyleeri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyleerden ilk dördünün (birim hacim ağırlık, basınç dayanımı, UPV ve kılcal su emme deneyleeri) sonuçları Tablo 13'de verilmiştir. Donma-çözülme deneyleeri ayrı bir alt başlık altında incelenecektir.

Tablo 13'de bütün numunelerin her birinin deney sonuçları ayrı ayrı verilmiştir. Fakat ilerleyen alt başlıklar altında yapılan değerlendirmeler, sağ (R) ve sol (L) numunelerin ortalamaları alınarak yapılmıştır. Örneğin A1VR ve A1VL numunelerinin basınç dayanım değeri ortalama alınarak A1V olarak gösterilmiştir.

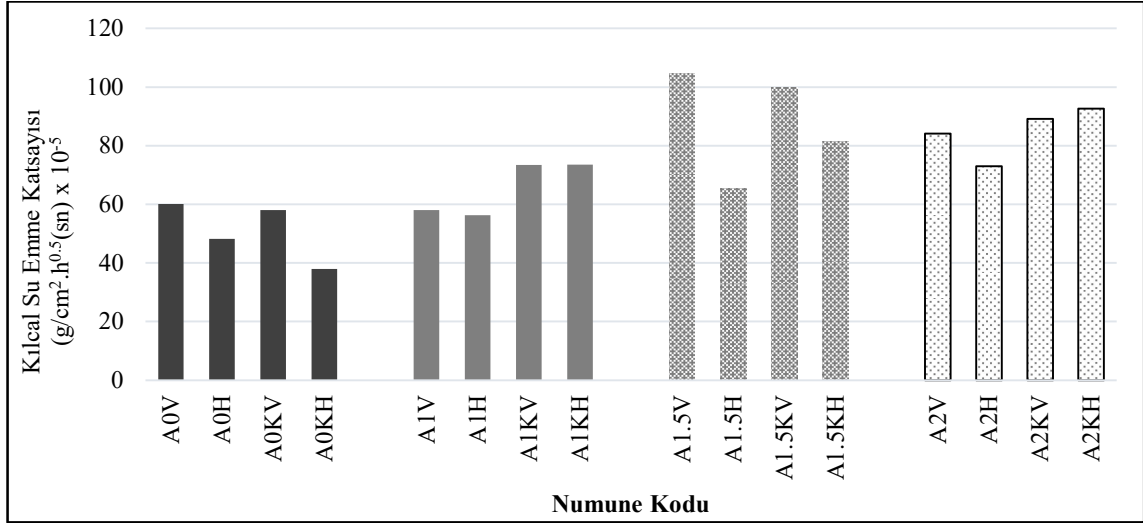


**Tablo 13.** Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

KOD	Birim Hacim Ağ. (g/cm <sup>3</sup> )	Kılcal Su Emme Katsayısı (g/cm <sup>2</sup> .h <sup>0.5</sup> (sn) x 10 <sup>-5</sup> )	Ultrasonik Ses Dalgası Geçişi		Basınç Dayanımı (MPa)
			Zaman (μs)	Hız (m/s)	
A0VR	2.25	65.83	26.6	3731	29.80
A0VL	2.07	54.41	26.8	3666	24.40
A0HR	1.96	54.58	23.6	3947	20.80
A0HL	1.93	41.89	25.3	4041	16.37
A0KVR	2.05	59.70	25.6	3799	27.06
A0KVL	1.97	56.45	26.4	3826	30.17
A0KHR	2.02	38.06	24.6	3878	31.56
A0KHL	2.05	37.86	26.3	3849	37.33
A1VR	1.93	56.99	27.7	3727	26.38
A1VL	1.94	59.08	26.9	3769	34.14
A1HR	1.93	45.32	27.8	3788	26.83
A1HL	1.96	67.36	26.8	3830	21.90
A1KVR	1.96	57.06	27.0	3738	31.30
A1KVL	1.98	89.70	27.3	3680	33.80
A1KHR	1.96	44.74	26.5	3846	17.34
A1KHL	1.91	102.35	25.8	3906	22.16
A1.5VR	1.70	100.31	30.4	3155	14.90
A1.5VL	1.75	108.93	30.4	3263	16.04
A1.5HR	1.75	69.44	29.4	3313	12.45
A1.5HL	1.75	61.71	29.2	3298	13.81
A1.5KVR	1.72	107.62	31.4	3141	17.88
A1.5KVL	1.75	91.89	31.0	3219	16.08
A1.5KHR	1.70	80.23	30.3	3317	10.53
A1.5KHL	1.72	82.34	26.9	3429	14.73
A2VR	1.75	84.28	29.8	3286	14.60
A2VL	1.74	84.00	31.3	3353	19.96
A2HR	1.84	71.24	27.0	3460	12.67
A2HL	1.74	74.74	30.3	3282	12.95
A2KVR	1.72	95.13	31.6	3241	17.35
A2KVL	1.71	83.16	31.3	3299	16.39
A2KHR	1.72	97.92	29.6	3351	14.94
A2KHL	1.68	87.44	30.6	3320	11.57

### Kılcal su emme ve birim hacim ağırlık deneyi sonuçları

3D elemanlardan alınan karot numuneleri 56 günlük olduklarında kılcal su emme katsayısı belirleme deneyi yapılmıştır. TS EN 13057 (2004) standardı gereğince yapılan kılcal su emme tayini deneyi sonuçları grafiği Şekil 64’de verilmiştir. Verilen grafik bütün numunelerin test sonucunu içermektedir.



Şekil 64. Tüm numunelerin kılcal su emme katsayıları grafiği

Tablo 13’den ve Şekil 64’de verilen grafikten görüleceği üzere A0 grubundan A2 grubuna doğru gidildikçe kılcal su emme katsayısı artmıştır. Fakat grafikten de görüldüğü üzere en fazla AEA katılan grup (A2) en yüksek kılcal su emme katsayısı olan grup değildir. En yüksek değerler A1,5 grubunda görülmüştür. Bunu A2, ardından A1 ve A0 grubu izlemiştir. Ancak A2 ile A1,5 arasındaki fark çok fazla da değildir. Nitekim A1,5 grubunun ortalama kılcal su emme katsayısı 87,81 iken A2 grubunun 84,74, A1 grubunun 65,33 ve A0 grubunun ise 51,10 (g/cm².h⁰.⁵(sn) x 10⁻⁵)’dur. Bu çalışma kapsamında üretilen 3D betonlardan hareketle, AEA eklemekle betonların kılcal su emmelerinin arttığı ancak bunun belirli bir üst sınırı olduğu bu sınırdan sonraki katkı ilavelerinin kılcallığı artırmak yerine düşürmeye başladığı söylenebilir.

Birim hacim ağırlık sonuçları da su emme ile benzer şekilde çıkmıştır. Bu deneyde de, ortalama olarak, A0 grubunun birim hacim ağırlığı 2,04; A1 grubunun 1,95; A1,5 grubunun 1,73 ve A2 grubunun 1,74 g/cm³ tür. Görüldüğü gibi en düşük değer A1,5 grubuna ait olsa da A1,5 ile A2 grubu hemen hemen aynı birim ağırlığa sahiptir. Daha fazla AEA eklenmesi ile birim hacim ağırlığın daha fazla düşmesi gerekmektedir. Nitekim taze beton özellikleri sırasında bulunan birim hacim ağırlık değerleri de bu yöndedir. Reolojik özelliklerin belirlenmesi deneyinde de en düşük viskozite değeri A1,5 grubunda elde edilmişti. Dolayısıyla gerek birim hacim ağırlıklar gerek reolojik ölçümler ve gerek de kılcal su emme deneyi

sonuçları göz önüne alındığında boşluk miktarının en fazla olduğu grubun A1,5 olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır.

Şekil 64'deki grafikten görüldüğü üzere genel olarak dikey yönde (vertical) alınan karot numunelerinin kılcal su emme katsayıları yatay yönde alınan (horizontal) karot numunelerinden fazladır. Dikey yönde alınan karot numunelerin ortalama kılcal su emme katsayısı değeri 78,41 iken yatay yönde alınan karot numunelerinkisi  $66,08 \text{ (g/cm}^2 \cdot \text{h}^{0.5} \text{(sn) x } 10^{-5})$ 'dir. Buna paralel olarak dikey yönde alınan numunelerin birim hacim ağırlıkları  $1,87 \text{ g/cm}^3$  iken yatay yönde alınan numunelerin birim hacim ağırlıkları  $1,85 \text{ g/cm}^3$ 'dür. Bununla beraber, değerler arasındaki farkın çok yüksek olmadığını belirtmek gerekir.

Şekil 65'de gösterildiği gibi dikey yönde alınan numunelerin tabakalar arası boşluk yapısı yatay yönde alınan numunelere göre oldukça farklı olup bu durumun suyun numunede yükselmesine de etki ettiği düşünülmektedir. Nitekim Şekil 65'de verilen numuneler incelendiğinde, dikey numuneler 3 adet tabakalar arası boşluğa sahipken yatay numuneler tam ortadan 1 adet boşluğa sahiptirler. Kılcal yolla suyun ilerlemesi de bu boşluklara göre şekillenmiştir. Tabakalar arası temasın olduğu yerlerde su yükselmiş boşluklara gelince burarlardan sızıntı yaptığı için ilerlemesi durmuştur. 24 saatlik sürenin sonunda da hemen hemen bütün numunelerde su ancak yaklaşık 3-4 cm yüksekliğinde yükselmiştir. Kılcal su emme deneyi, suyun "kapiler yolla" yükselmesini ölçen bir deney olduğundan malzemenin (harç) geçirirliiliği hakkında bilgi vermektedir. Burada, farklı tabakalardan ve aynı zamanda tabakalar arası büyük (kapiler olmayan) boşluklardan oluşan bir strüktür vardır. **Dolayısıyla geleneksel beton numuneler için belirlenen kılcal su emme deneyinin 3D baskı beton numunelerde uygulanabilirliği tartışılmalıdır.**



Şekil 65. Kılcal su emme deneyinde 24 saat sonunda numunelerde oluşan su yükseklikleri

Kür maddesi ile kür edilen numunelerin ortalama kılcal su emme katsayısı 75,73 iken kür edilmeyen numunelerin kılcal su emme katsayısı değeri  $68,76 \text{ (g/cm}^2 \cdot \text{h}^{0.5} \text{(sn) x } 10^{-5})$  dır. Ayrıca kür edilmeyen numunelerin birim hacim ağırlıkları ortalama olarak  $1,87 \text{ g/cm}^3$  iken

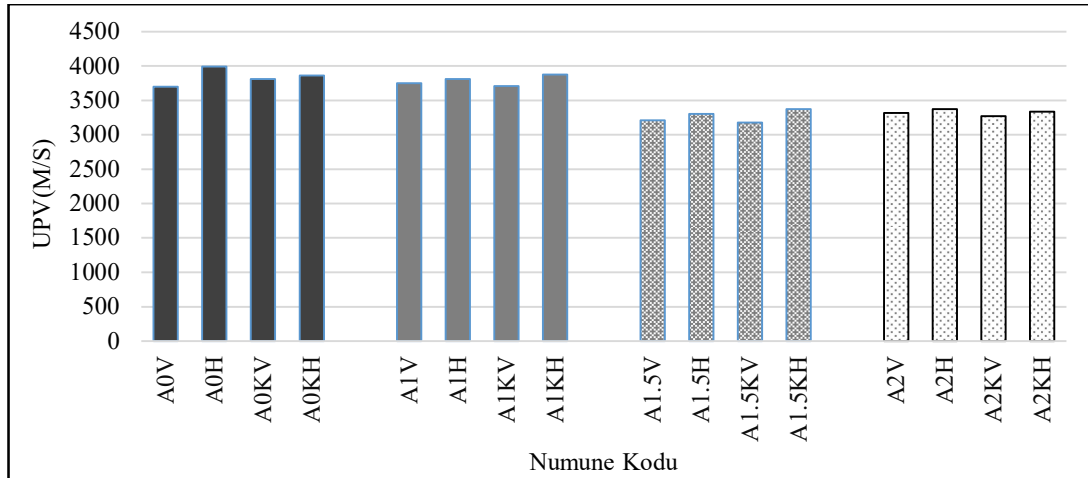
kürlü numunelerin birim hacim ağırlıkları  $1,85 \text{ g/cm}^3$  dir. Görüldüğü üzere bulunan sonuçlar birbirine oldukça yakındır. Yine de belirtmek gerekir ki kür edilen numunelerde kılcallık etkisi fazla oluşmuştur.

3D baskılı çimentolu harçların dayanıklılığına odaklanan sadece birkaç çalışma vardır. Li *et al.* (2020), filamentlerin tabakalanmasının, özellikle sonraki katmanlar arasındaki zaman aralığı arttığında, daha yüksek gözeneklilik, kılcal su girişi ve klorür penetrasyonuna neden olabileceğini belirtmiştir. Schröfl *et al.* (2018) tarafından yapılan çalışmada iki çeşit formülasyona sahip 3D baskılı betonda kılcal emme yoluyla su alımı nötron radyografi yöntemiyle değerlendirilmiştir. Örnekler, tabaka tabaka biriktirme zaman aralıkları ve farklı bağlayıcıların kullanımı dikkate alınarak oluşturulmuştur. 26 saatlik kılcal su emme deneyi boyunca önemli bir miktarda su alımı gerçekleşmediği belirtilmiş ve su miktarı ne matris bölgelerinde ne de katmanlar arası bağlanma bölgelerinde ölçülebilir bir oranda artmamıştır. Ayrıca, suyun ara yüzeylerden matris bölgelerine yeniden iletilemediği belirtilmiştir.

Literatürde henüz 3D baskılı betonların kılcal su emme katsayılarının bulunmasına dair yeterince çalışma bulunmamaktadır. Yapılan bu doktora tez çalışması dahilinde araştırılan 3D baskılanabilir betonların kılcal su emme deneyi yukarıda belirtilen literatür çalışması (Schröfl *et al.* 2018) ile kısmi paralellik göstermektedir. Arayüzeyle kadar ilerleyen su bu bölgelerden sonra tekrar matris bölgelerine iletilememiştir.

### Ultrases geçiş hızı (UPV) sonuçlarının değerlendirilmesi

Tablo 13’de verilen UPV sonuçlarına göre oluşturulan grafik Şekil 66’da verilmiştir.



Şekil 66. Ultrases hızının numune türlerine göre değişimi

Şekil 66’da verilen grafik incelendiğinde A0 ve A1 grubunun en yüksek ve birbirine yakın UPV değerlerine sahip olduğu bunları yine birbirine yakın sonuçlarla A1,5 ve A2 grubunun izlediği görülmektedir. A0 grubunun ortalama UPV değeri 3842, A1 grubunun 3786,

A1,5 grubunun 3267 ve A2 grubunun 3324 m/s dir. Görüldüğü üzere yine en düşük değer A1,5 grubunda elde edilmiştir.

Kılcal su emme katsayısı sonuçlarında olduğu gibi UPV sonuçlarında da kür katkısının bariz bir etkisi görülmemiştir. Kürlü ve kürsüz numuneler aynı gruplarda hemen hemen aynı sonuçları vermiştir, hatta A0 ve A2 grubunda kürlü numuneler kürsüz numunelerden daha düşük UPV değerlerine sahip olmuştur. Bütün grupların sonuçları ele alındığında kürsüz numunelerin ortalama UPV değeri 3557 m/s iken kürlü grupların ki 3552 m/s dir.

Yine grafikten görüldüğü üzere hemen hemen bütün gruplarda yatay yönde alınan karot numunelerin UPV değerleri dikey yönde alınan numunelerden büyüktür. Kılcal su emme katsayısı değerlerinde olduğu gibi bunun sebebinin yatay yönde alınan numunelerin tabakalar arası 1 adet boşluğa dikey yöndeki numunelerin 3 adet boşluğa sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yatay yönde alınan karot numunelerin ortalama UPV değeri 3616 m/s iken dikey yönde alınan numunelerin ki 3493 m/s dir. Dolayısıyla yatay numunelerin UPV değeri dikey numunelerden yaklaşık % 4 daha büyüktür.

TS EN 12504-4 (Anonim 2012)'de "Beton içinde ilerleyen ultrasonik atımlı dalga, bir beton-hava arayüzü ile karşılaştığında, bu arayüzün diğer tarafına enerji iletimi ihmal edilebilir düzeyde olur. Bu nedenle, iki transduserin tam arasında bulunan hava dolu çatlak veya boşluğun uzunluk izdüşümü transduserlerin genişliğinden veya kullanılan sesin dalga boyundan büyük olduğunda ultrasonik dalga demetinin doğrudan iletimi engellenecektir. Bu durumda, alıcı transdusere ilk ulaşan atımlı dalga bu kusurun çevresinden kırılıma uğrayarak geçmiş olacağından geçiş süresi kusuru bulunmayan benzer bir betona oranla daha uzun olacaktır" denilmektedir. Bu tez çalışmasındaki numunelerde doğal olarak bulunan tabakalar arası boşluklar UPV değerlerini doğrudan etkilemiştir. Yatay karot numunelerinin dikey karot numunelerinden daha az boşluğa sahip olması yatay numunelerin UPV değerlerinin daha yüksek olmasına neden olmuştur.

Dökme beton elemanların aksine 3D baskılı beton elemanlar, katman katman biriktirme nedeniyle, belirgin anizotropik malzeme özellikleri sergiler. Bu, tek tek malzemeye ve işlem parametrelerine bağlı olarak, "soğuk derzler" olarak adlandırılan iki bitişik katman arasında daha zayıf bağlara neden olabilir. Dolayısıyla 3D betonların gerek basınç dayanımlarının gerekse de ultra ses geçiş hızlarının normal betonlara göre bu soğuk derzler nedeniyle daha düşük olması beklenmektedir.

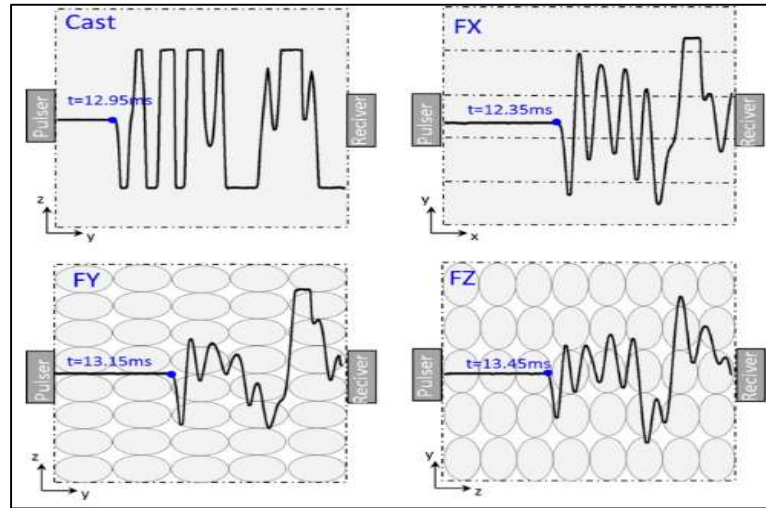
Malhotra (1976)'dan hareketle, UPV hızına göre beton kalitesinin değerlendirilmesine yönelik sınıflandırma Tablo 14'de verilmiştir. Bu çalışma için üretilen betonların ultrases geçiş hızı 3200 ila 4200 m/s arasında değişmekle birlikte grup ortalaması olarak A0= 3842 m/s, A1=

3786 m/s,  $A_{1,5} = 3267$  m/s ve  $A_2 = 3324$  m/s çıkmıştır. Tablo 14'e göre A0 ve A1 grubu betonların kalitesi 'iyi', diğer iki grubun kalitesi ise "şüpheli" olarak değerlendirilmiştir. Ancak, bu çalışmada üretilen çimento esaslı kompozit türünün beton değil "harç" olduğunu da hatırlatmak gerekir.

**Tablo 14.** UPV Verileri ile Beton Kalitesinin Değerlendirilmesi (Malhotra 1976)

Ultra ses geçiş hızı (m/s)	Beton sınıflandırması
$V > 4575$	Mükemmel
$4575 > V > 3660$	İyi
$3660 > V > 3050$	Şüpheli
$3050 > V > 2135$	Zayıf
$V < 2135$	Çok zayıf

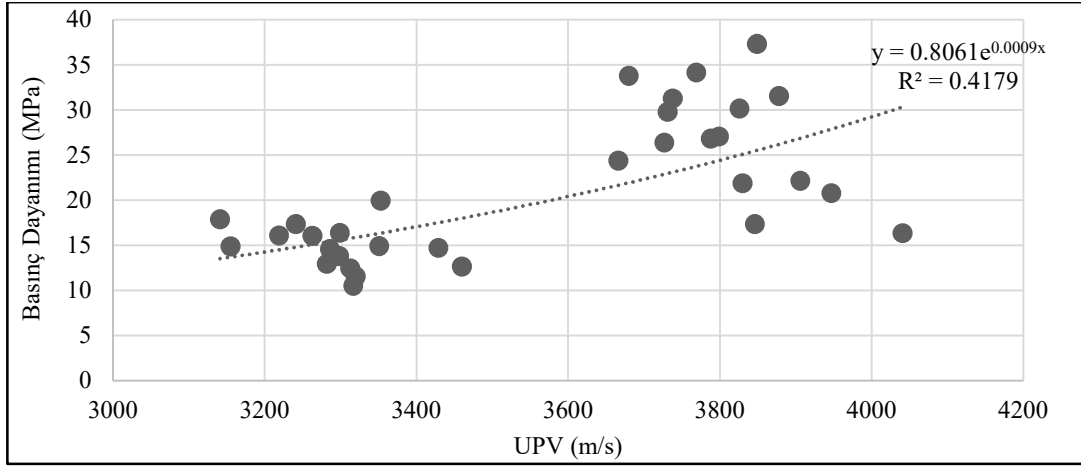
Ma *et al.* (2019), 3D baskılama işleminin yöne bağlı tabakaların üst üste birikimi olduğunu, kendiliğinden tabakalı bu yapının ise mekanik bir anizotropi oluşturduğunu belirtmişlerdir. Basılı materyalin anizotropik performanslarını, yön bazlı mekanik performans testi ile değerlendirmiş ve ultrasonik ses hızı testi ile doğrulamışlardır. Çalışmada basınç, çekme, eğilme ve kesme yüklerine maruz kalan 3D baskılı numunelerin mekanik davranışları araştırılmıştır. Basılı malzemelerin anizotropik özelliklerini değerlendirmek için hem mekanik hem de akustik analizler birlikte değerlendirilmiştir. Şekil 67'de gösterildiği gibi 3D betonlarda ultrasonik ses iletimi esnasında cihazın bir probundan çıkan ses dalgalarının tabakalar arası aderansın olduğu bölgelerden devam ederek cihazın diğer probuna ulaştığını belirtmişlerdir.



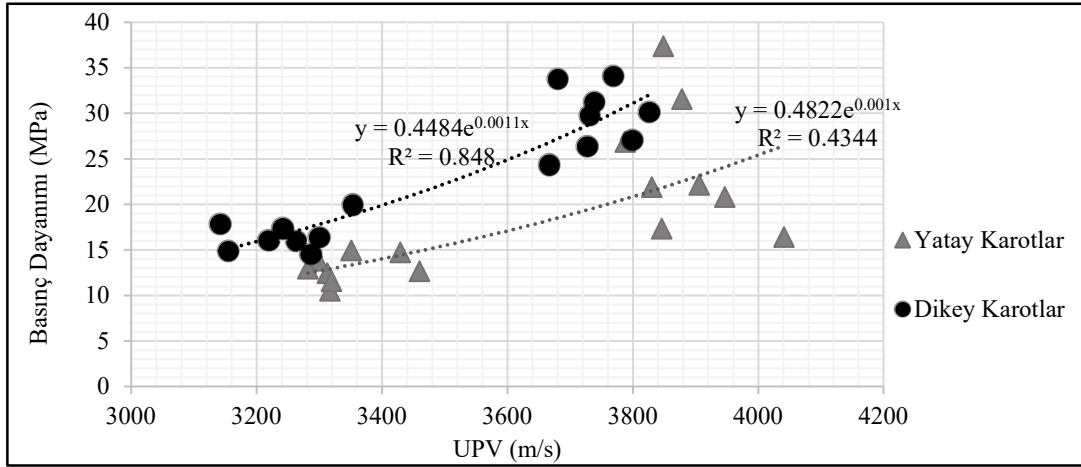
**Şekil 67.** 3D baskılı numunelerin ultrasonik darbe dalgası iletim formları (Ma *et al.* 2019)

Şekil 67'den görüldüğü gibi ultrasonik ses dalgaları numune içerisinde aderansın olduğu bölgelerden geçerek karşı tarafa ulaşmaktadır. Tez çalışması kapsamında üretilen 3D betonlarda da iletimin bu şekilde olduğu düşünülmektedir. Ses dalgaları, geçiş yolu üzerinde bulunan 3D betonların tabakalar arası boşluklarından iletilmediğinden geçiş yolu normal betonlardan daha uzundur.

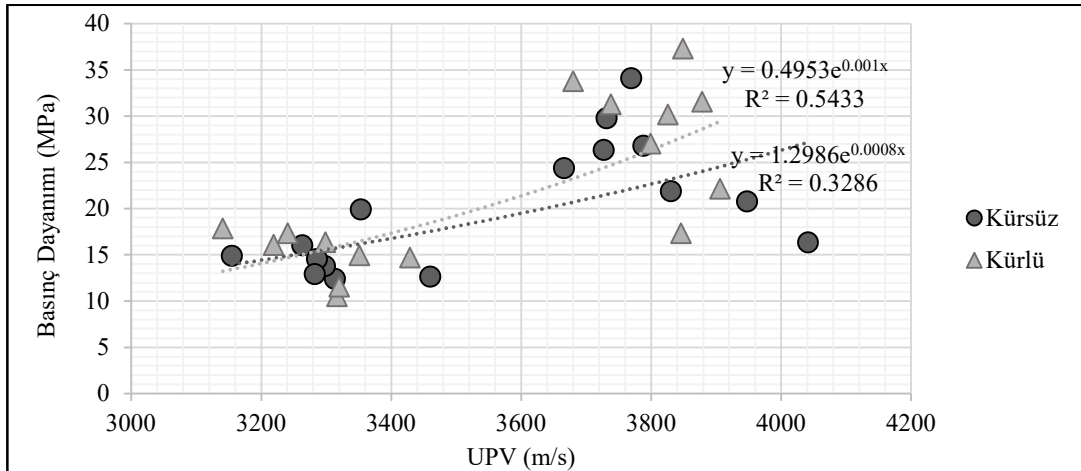
Bu tez çalışması kapsamında yapılan ultrasonik geçiş hızı ile basınç dayanımı arasında kurulan ilişki Şekil 68’da verilen grafiklerde gösterilmiştir.



a



b



c

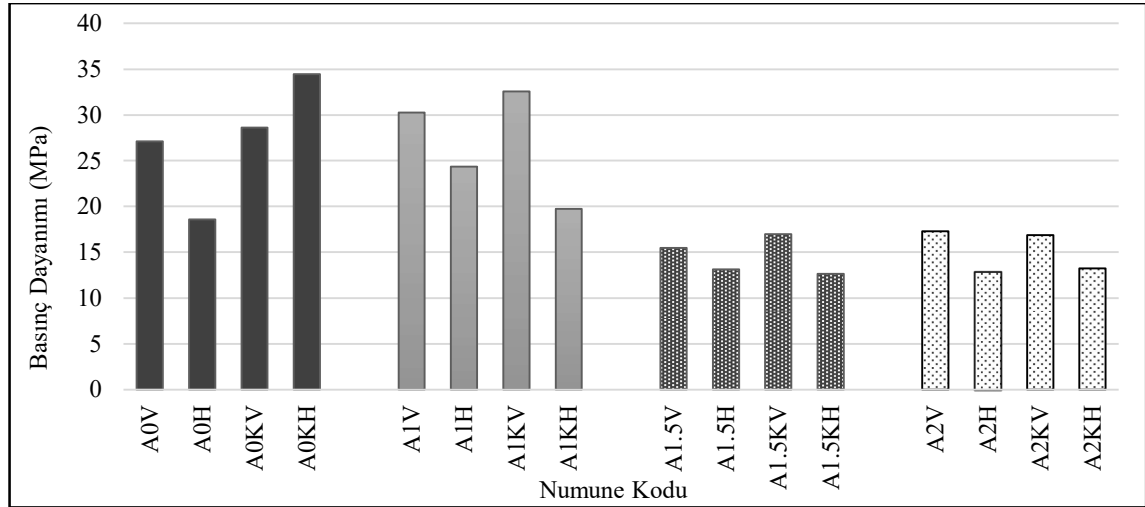
**Şekil 68.** UPV ile basınç dayanımı arasındaki ilişki (a: bütün numuneler, b: yatay-dikey karot numuneler, c: kür katkısı uygulanan ve uygulanmayan numuneler)

Şekil 68’de verilen grafikler incelendiğinde genel itibariyle numunelerin basınç dayanımı ile UPV değerleri arasında bir ilişki olduğu görülecektir. Birçok grupta  $R^2$  değeri 0,5 civarında çıkmıştır. Görüldüğü üzere en yakın korelasyon dikey alınan karot numunelerinde ( $R^2$  değeri 0,87) elde edilmiştir. 3D beton numuneler geleneksel beton numunelerinden farklı olarak tabakalar arası oluşan soğuk derz nedeniyle bu bölgelerde aderans zayıflıklarına sahiptir, dolayısıyla, basınç uygulanan doğrultu çok önemlidir. Dikey karot numuneleri döküm yönüne dik doğrultuda alınmıştır. Bu doğrultu ise tabakalanmaya diktir ve daha kuvvetlidir. Bu nedenle dikey doğrultuda alınan karotların basınç değerleri ile UPV ölçümleri birbiriyle uyumlu çıkmıştır.

### Basınç deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi

28 günlük karot numunelere uygulanan basınç dayanımı sonuçlarına göre oluşturulan grafik Şekil 69’da verilmiştir.

Şekil 69’dan, en yüksek dayanım değerlerinin AEA kullanılmayan grup olan A0’dan (yatay-dikey karot alımı, kür uygulanıp uygulanmaması gözetilmeksizin ortalama olarak 27,2 MPa), onun ardından AEA’nın en az katıldığı A1 grubundan (ortalama 26,7 MPa) elde edildiği görülmektedir. A1,5 ve A2 grupları birbirine yakın (sırasıyla, ortalama 14,6 MPa ve 15,1 MPa) dayanım elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı (34,4 MPa) A0KH numunelerinden, en düşük basınç dayanımı (12,6 MPa) ise A1,5KH numunelerinden okunmuştur. Betondaki hava miktarının artması basınç dayanımını azalmaktadır. Basınç dayanımı, her %1’lik hava miktarı artışı için yaklaşık % 6-10 arasında azalmaktadır (Şahin 2003, Şahin 2013).



Şekil 69. Basınç dayanımlarının beton gruplarına göre değişimi

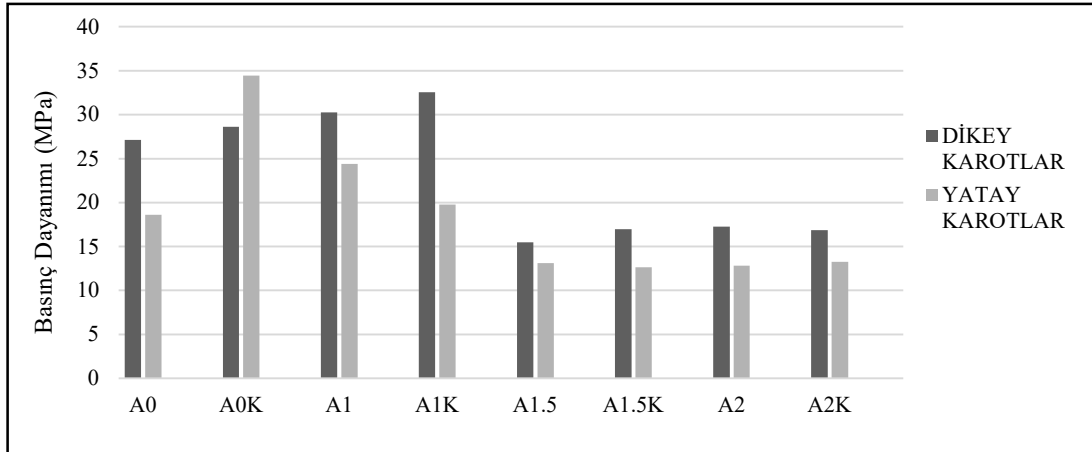
Taze beton deneyleri bölümünde verilen Tablo 10’dan görüldüğü üzere  $5 \times 5 \times 5$  cm<sup>3</sup> lük numunelerin dayanımları A0 grubunda 54,54 MPa, A1 grubunda 28,63 MPa, A1,5 grubunda 18,94 MPa ve A2 grubunda ise 11,75 MPa’dır. Karot numunelerin sonuçları incelendiğinde ise



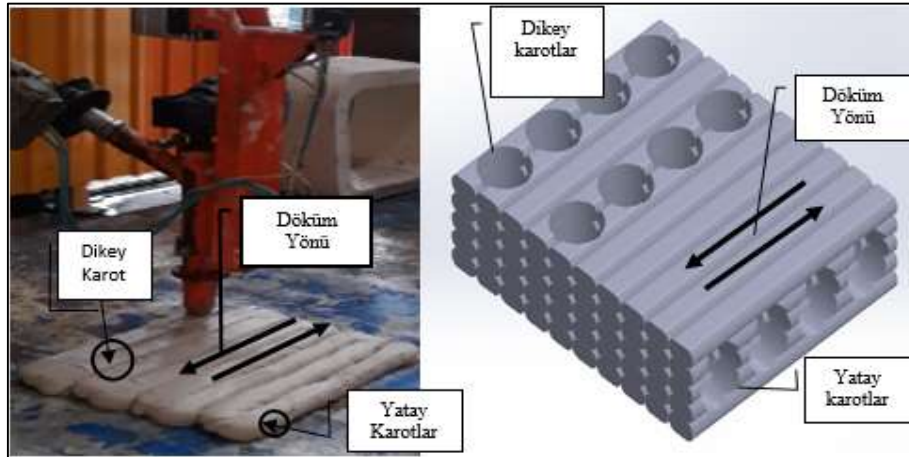
A0 grubu ortalama 27,2 MPa dayanıma sahip olmuş yani AEA etkisi olmaksızın tabaka tabaka dökülen 3D elemanlardan alınan karot numunelerinin dayanımı yaklaşık %50 oranında azalmıştır. Fakat AEA katılan gruplarda basınç dayanım değerleri oldukça farklı seyretmiştir. A1 grubunda yalnızca % 6'lık bir azalma, A1,5 grubunda yaklaşık % 23'lük bir azalma olmuş, buna karşın, A2 grubunda ise % 29'lük bir dayanım artışı gerçekleşmiştir.

Yatay ve dikey yönde karot alınması ve kür uygulanıp uygulanmaması durumuna göre basınç dayanımının değişimi ise Şekil 70'de verilen grafikte gösterilmiştir.

Şekil 70'de verilen grafik incelendiğinde hemen hemen bütün gruplarda dikey (vertical) yönde alınan karotların dayanımlarının yatay (horizontal) yönde alınan karotlara göre daha büyük olduğu, yalnızca A0K grubunda tam tersi bir durum olduğu görülmektedir. Dikey yönde alınan karotlar döküm yönüne dik olduğundan betonun bu yönü Şekil 71'de gösterildiği gibi tabakalanmalara (laminasyona) diktir, dolayısıyla, mukavemeti daha yüksektir. Yatay yönde alınan numuneler ise döküm yönüne paralel tabakalardan oluşmaktadır, dolayısıyla, bu yöndeki bağlar uygulanan kuvvetler karşısında daha zayıftır ve kolayca ayrılmıştır.



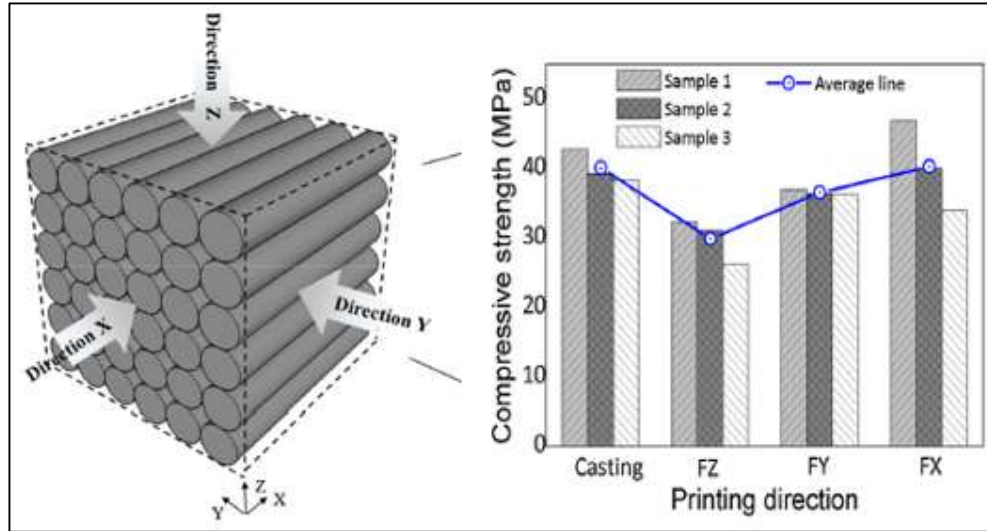
Şekil 70. Karot alım yönüne göre numunelerin basınç dayanımlarının kıyaslanması



Şekil 71. 3D betonların döküm yönü ve karot alım yönleri

Şekil 70 ve 71 ile Tablo 13’de verilen sonuçlardan görüleceği üzere diğer sertleşmiş beton sonuçlarında olduğu gibi basınç dayanımı sonuçlarında da kür katkısının etkisi pek görülmemiştir. Yalnızca A0 grubunda kür katkısı uygulanan numunelerin ortalama basınç dayanımı 31,53 MPa iken kür edilmeyen numunelerin ortalama basınç dayanımı 22,84 MPa’dır. Yani A0K grubu A0 grubundan yaklaşık %30 daha fazla dayanıma sahiptir. Fakat diğer grupların sonuçları birbirine oldukça yakındır. A1 grubunun ortalama dayanımı 26,73 MPa iken A1K grubunun 26,15 MPa, A1,5 grubunun 14,30 MPa iken A1,5K grubunun 14,81 MPa, yine A2 grubunun dayanımı 15,05 MPa iken A2K grubunun basınç dayanımı 15,06 MPa’dır. Dolayısıyla 3D betonları kür etmek için uygulanan bu membran türü kür malzemesi (curing-compound) beklenen etkiyi gösterememiştir.

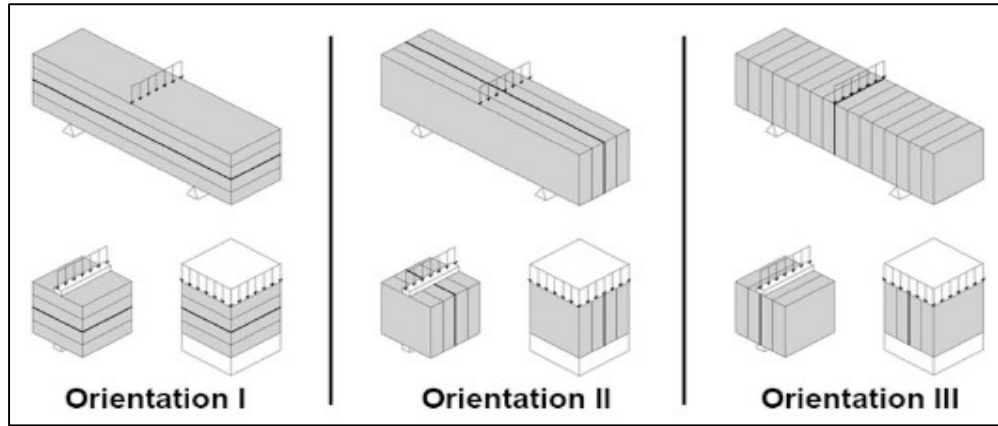
Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde Ma et al. (2019), x, y ve z doğrultularında kesim yapılarak oluşturulan numunelerin (Şekil 72) basınç dayanımlarının yöne bağlı olarak değiştiğini belirtmişlerdir. Şekil 72’de verilen grafikten görüldüğü üzere tabakalanmaya dik olan X yönünde en yüksek dayanımlar elde edilirken tabakalanma yönüne paralel Z yönünde en düşük dayanımlar gözlenmiştir. Yine kesilen numunelerin dayanımları kalıpla üretilen numunelerin dayanımına yakın değerlerde bulunmuştur.



**Şekil 72.** 3D beton elemana x, y ve z yönünde uygulanan basınç dayanım testi ve sonuçları (Ma et al. 2019)

Assaad et al. (2020) geleneksel çelik donatılarla güçlendirilmiş 3D baskılı kiriş ve kolon elemanları üretebilen modüler bir yaklaşım geliştirmeyi amaçladıkları çalışmalarında üretmiş oldukları birim ağırlığı  $2090 \text{ kg/m}^3$  olan 3D betonun basınç dayanımını 42,5 MPa olarak belirlemişlerdir. Nerella et al. (2019) ekstrüzyon esaslı malzeme birikimi ile üretilen 3D baskılı elemanlarda katmanlar arasındaki arayüzleri, hem makro hem de mikro-ölçeklerde inceledikleri çalışmada,  $2230$  ila  $2291 \text{ kg/m}^3$  birim ağırlığa sahip numunelerden 29 MPa ila 100 MPa

arasında değişen basınç dayanımları elde etmiş ve hem eğilme ve hem de basınç dayanımlarının arayüz mikroyapısına bağlı olarak değiştirdiğini belirtmişlerdir. Rahul and Santhanam (2020) pistonlu pompa tabanlı bir 3D yazıcı sistemi kullanılarak ürettikleri betonda iri agrega ilavesinin baskının ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik özellikleri üzerine etkisini inceledikleri çalışmada iri agreganın dayanım üzerindeki etkisini değerlendirmek için, farklı döküm yaşlarından sonra beton üzerinde tek eksenli basınç testleri yapmışlardır. İri agrega içeren ve içermeyen karışımların her ikisinde de malzeme davranışı, erken yaşlarda elastoplastik sonraki yaşlarda ise sertleşmiş betonun tipik yumuşama tipi tepkisine (strain-softening) dönüşmüştür. Wolfs *et al.* (2019) yayınladıkları makalede, 3DCP (3D concrete printing) proses parametreleri ile 3D baskılı betonun yapışma mukavemeti arasındaki ilişki üzerine deneysel bir çalışmanın sonuçlarını sunmuşlardır. 3 işlem parametresinin (katmanlar arası aralık süresi, nozül yüksekliği ve yüzey dehidrasyonu) iki mekanik özelliğe (basınç mukavemeti ve çekme mukavemeti) etkisi araştırılmıştır. Şekil 73’de gösterildiği gibi, eğilme gerilmesi, yarmada çekme ve basınç testlerinde 3D baskılı tabaka yönelimleri etkili parametreler olmuşlardır. Basınç testleri, yönelim II ve III’ün yükleme açısından eşit oldukları için, bir numune serisinde birleştirilmiştir. Çalışma sonucunda da 25 MPa ila 45 MPa arasında değişen basınç dayanım değerleri elde etmişlerdir.



**Şekil 73.** 3D beton tabakalarının yönelimine göre değişen yüklemeler (Wolfs *et al.* 2019)

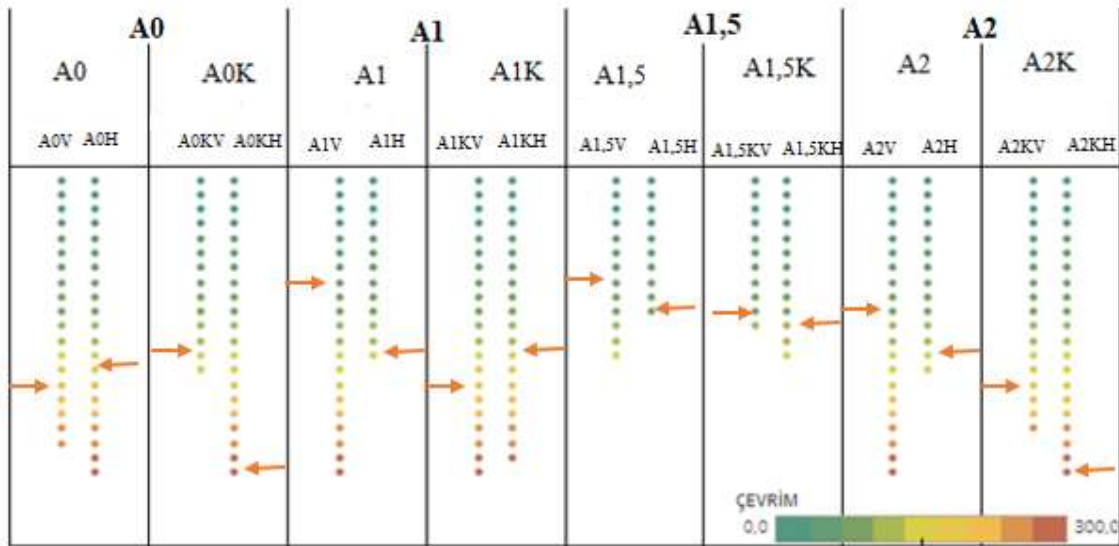
Literatür çalışmaları göz önüne alındığında bu tez kapsamında elde edilen basınç dayanımı sonuçlarına benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür. 3D baskılanabilir betonların basınç dayanımları tabakaların yönelimine göre değişmektedir. Ayrıca kullanılan katkı çeşitleri, betonların sahip oldukları boşluk şekilleri ve boşluk oranları, betonların mikro gözenek yapıları dayanım üzerinde oldukça etkili parametrelerdir. Literatürde basınç dayanımını belirlemek için geleneksel eksenel basınç testi kullanıldığından bu tez çalışması kapsamında da eksenel basınç deneyi yapılmıştır. Ancak, deneysel gözlemler ve elde edilen bulgulardan 3D betonların hem soğuk derzin yol çatığı tabakalar arası zayıf aderans problemi hem de bu betonların doğası

gereği var olan tabakalar arası boşluklar nedeniyle kullanılan klasik tek eksenli basınç testinin uygun olduğu düşünülmemektedir. Bu konudaki standardizasyon eksikliği giderilmeli ve bu betonların değerlendirilmesi geleneksel betondan farklı olarak yapılmalıdır.

### Donma – çözülme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Üretilen 3D beton numunelere ASTM C 666-15 (Anonymous 2015)/B prosedürü kullanılarak 300 çevrimlik donma-çözülme uygulanmıştır. Ayrıca her UPV ölçümünde boy değişimi, çap değişimi ve ağırlık değişimi ölçülmüştür. Tüm numunelerde donma-çözülme çevrimleri sonucu oluşan UPV, boy, ağırlık ve bağıl dinamik elastisite modülü değişimlerini gösteren grafikler aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

Bütün numune gruplarından (A0, A1, A1,5 ve A2) kürlü ve kürsüz ayrıca dikey ve yatay son olarak sağ ve sol numune olmak üzere üretilen 32 adet numune ile donma-çözülme deneyi gerçekleştirilmiştir. Fakat sağ ve sol numuneler aynı özellikleri barındırdığından sonuçlar değerlendirilirken bu iki numunenin ortalamaları alınmıştır. Örneğin A2VL numunesi ile A2VR numunesinin sonuçları ortalama alınarak A2V olarak verilmiştir. Numunelerin her ikisinin de dayanabildiği çevrim sayısına kadar iki numunenin ortalaması, numunenin birinin kırıldığı çevrim sayısından itibaren ise kalan tek numunenin sonucu verilmiştir. Numunelerin her ikisinin birlikte eriştiği son çevrim sayısı Şekil 74 deki grafikte ok işareti ile gösterilmiştir. Bu ok işaretinden sonra kalan tek numunenin sonucu verilmeye devam edilmiştir. Bu doğrultuda numune gruplarının maruz kalabildiği çevrim sayısını gösteren grafik Şekil 74’de verilmiştir.



Şekil 74. 3D beton numunelerin dayanabildikleri donma-çözülme çevrim sayıları

Deneyler esnasında ilk 100 çevrimde her 10 çevrimde bir, 100’den sonra ise 20 çevrimde bir ölçüm alınmıştır. Buna göre Şekil 74’de verilen ilk 10 noktanın her biri 10’ar

çevrimi, diğer noktaların her biri ise 20'şer çevrimi göstermektedir. Örneğin A1,5V sütununda 13 nokta bulunmaktadır. A1,5V numuneleri  $(10 \times 10) + (3 \times 20) = 160$ . çevrimden sonra ayrılmıştır. Grafikteki renk dağılımı ise çevrim sayısını göstermektedir. Yani yeşilden kırmızıya geçiş 0. çevrimden 300. çevrime gidişatı göstermektedir. Grafikten görüleceği üzere bazı numuneler 300 çevrime ulaşmadan (yeşil veya sarı renklere sahip olan numuneler) dağılmışlar ve bu numuneler için çevrim sonlandırılmıştır. Örneğin A1,5 grubundaki hiçbir numune 300. çevrime ulaşamamıştır.

Şekil 74'de görülebileceği gibi 300 çevrime kadar bütün numuneler dayanmamıştır. Birçok numune 300 çevrimi tamamlamadan tabakalar arası temas yüzeylerinden ayrılmıştır. Geleneksel betonda don hasarı neticesinde ortaya çıkan parça kopmaları, yüzeysel çatlamlar bu betonlarda oluşmamış, yalnızca tabakaların birleşim yerlerinde donma-çözülme çevrim sayısına paralel olarak çatlaklar oluşmuş ve çevrim sayısı arttıkça çatlak derinleşmiş ve bir noktadan sonra beton ara yüzeyde meydana gelen bu çatlaklardan ikiye ayrılmıştır. Çimento dozajının çok yüksek ( $680 \text{ kg/m}^3$ ) olması, su/bağlayıcı oranının düşük (0,35) olması, maksimum tane çapı çok küçük (1 mm) olan ince agregası içermesi, agregası-matris geçiş bölgesinin (arayüzey) mineral katkı ile güçlendirilmiş olması ve içerdiği çok sayıdaki kimyasal katkının sürüklediği hava - ki A0 grubunun hava içeriği bile %2,5'dur- nedenlerinden dolayı 3D betonların kütleli donma-çözülme dirençleri yüksek çıkmıştır. Bu betonlarda asıl sorunun tabakalar arasındaki temas bölgesi olduğu tespit edilmiştir. Nitekim dikey olarak alınan karotlar boyuna doğrultuda ikiye ayrılırken yatay olarak alınan karotlar yatay yönde ikiye ayrılmıştır.

Şekil 75a' da görüldüğü gibi, çevrimler esnasında 3D beton numunelerde öncelikle katmanların birleşim yerlerinde çatlaklar görülmekte çevrim devam ettikçe bu çatlaklar ilerlemekte ve en sonunda numunenin bu bölgeden ayrılmasıyla numuneler hasara uğramaktadır. Bazı numunelerde katmanların birleşim yerlerinde olan boşlukların yanı sıra nozul ucundan döküm esnasında ortaya çıkan çeşitli boyutlarda boşluklar da bulunmaktadır (Şekil 75b). Bu boşlukların bulunduğu numunelerde genellikle boşlukların civarından parça kopması şeklinde donma çözülme hasarları da gözlemlenmiştir.

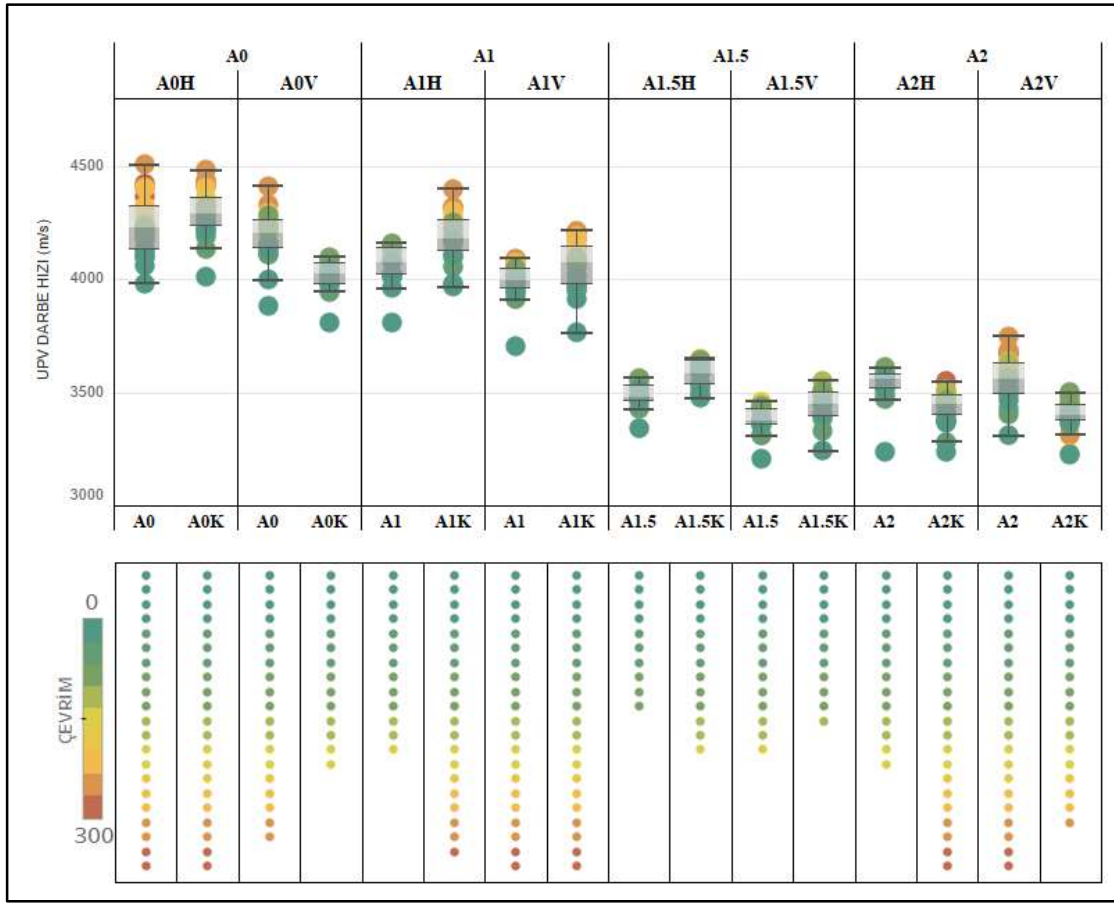


**Şekil 75.** a: Donma-çözülme uygulanan 3D beton numunelerde hasar oluşumu ve numunelerin kırılması, b: Numunelerde bulunan çeşitli boyutlardaki boşluklar

#### ***Donma-çözülmeye maruz kalan numunelerdeki UPV değişimi***

300 çevrim donma-çözülme uygulanan numunelerde oluşan iç hasar ultrases hızı ölçümleriyle belirlenmeye çalışılmıştır. 3D beton numunelerin çevrimlere göre ultrasonik ses iletim hızı değişimi Şekil 76'daki grafikte verilmiştir.

Şekil 76'daki grafikten görüleceği üzere hemen hemen bütün numunelerde çevrim sayısı arttıkça UPV değeri artmaya devam etmiştir. Yani geleneksel betondaki tecrübelerle istinaden beklendiği gibi, donma-çözülme çevrimleri numuneleri yeterince hasara uğratmamış her geçen gün numuneler hidrasyon devam ettiği için dayanım kazanmaya devam etmişlerdir. Dolayısıyla UPV değerleri artmıştır. A0 grubunda en yüksek UPV yaklaşık 4500 m/s'lik ses iletim hızıyla A0KH grubunda elde edilmiştir. A1 grubunda ise yaklaşık 4400 m/s'lik UPV değeriyle A1KH grubu, A1,5 grubunda ise yaklaşık 3700 m/s'lik UPV değeriyle A1,5KH grubudur. A2 grubunda ise ~3800 m/s'lik UPV değerine sahip olan A2V grubunu hemen ardından ise ~3700 m/s'lik UPV değerine sahip olan A2H grubu izlemiştir.

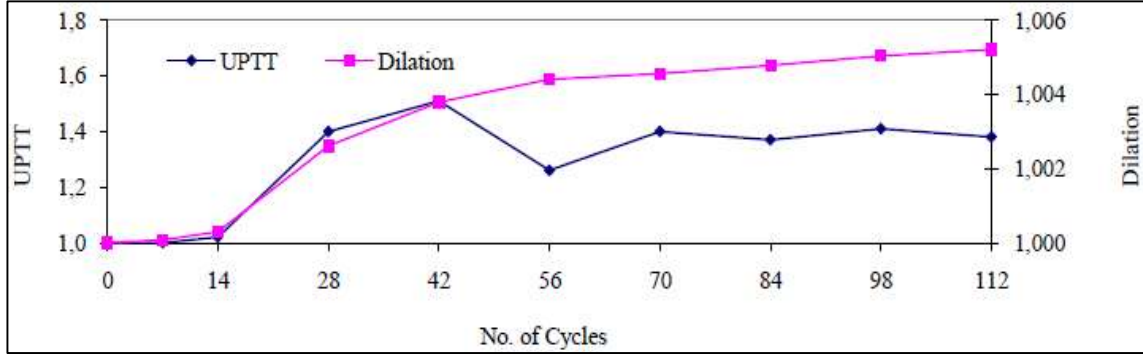


**Şekil 76.** Donma-çözülme çevrimlerinde numunelerdeki UPV değişimi

Yukarıdaki şekilden anlaşılacağı üzere genel itibariyle yatay karot numuneleri ve kür katkısıyla kür edilen numuneler daha yüksek UPV değerlerine sahip olmuşlardır ve çevrim sayısı arttıkça yani gün geçtikçe beton numuneler hidrasyona devam ettiği için UPV değerleri artmaya devam etmiştir. Dolayısıyla donma-çözülme çevrimlerinden çok az etkilenmişlerdir. Genel itibariyle hemen hemen tüm gruplarda dikey karot numuneleri donma-çözülme çevrimlerinden daha fazla etkilenmiş ve daha erken çevrim sayılarında tabakalar arası birleşim yerlerinden ayrılmışlardır. Yatay karot numunelerinin dikey karot numunelerine göre donma çözülme çevrimlerinden daha az etkilenmesinin sebebi olarak dikey karot numuneleri 3 adet tabakalar arası boşluğa sahip olması yatay karotların ise ortadan 1 adet boşluğa sahip olması yani dikey numunelerin yatay numunelere göre yaklaşık 3 kat daha fazla boşluğunun bulunması ile açıklanabilir.

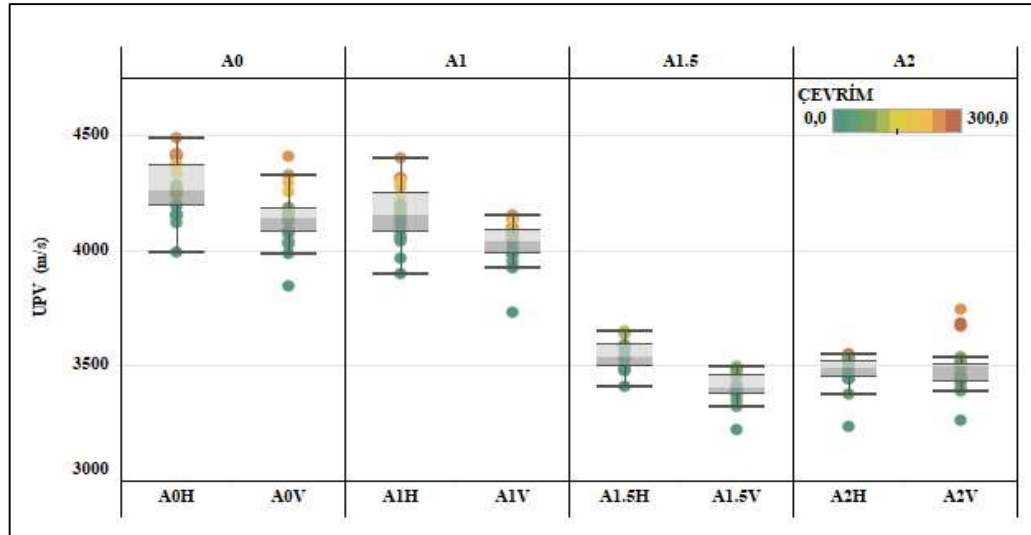
Şekil 76'deki grafiğe göre hemen hemen bütün numunelerin 0. çevrimden - ki ilk (başlangıç) okuma donma-çözülme çevrimine başlamadan hemen önce yapılmıştır- sonraki UPV değerleri örneklem dağılımına uygundur. Başlangıçtan sonra ilk UPV ölçümü 10. çevrimde alınmıştır. İlk 10 çevrimden sonra UPV değeri hemen hemen bütün numunelerde sıçrama yaparak yüksek miktarda artış göstermiş sonraki çevrimlerde ise artmaya devam

etmiştir. Nitekim Bager (2010) de donma-çözülme çevrimleri sonucu oluşan betondaki iç çatlaklar ile genişleme arasındaki ilişkiyi UPTT (Ultrasonik darbe iletim süresi, ultrasonic pulse transmission time) ölçümleri yaparak incelediği çalışmasında, ilk çevrimlerden sonra 14 çevrim sonrasında UPTT hızlıca yükseldiğini bundan sonraki çevrimlerde ise belli bir düzende devam ettiğini rapor etmiştir (Şekil 77). Bu tez çalışması kapsamında üretilen numunelerde de benzer durum söz konusu olmuştur.



Şekil 77. Ultrasonik dalga iletim hızı ile genişleme arası ilişki (Bager (2010))

Şekil 78'de verilen grafik kür etkisi gözetilmeksizin yatay ve dikey karot numunelerinin UPV değişimini daha net göstermektedir. Grafik, her bir grupta bulunan numunelerin ortalama UPV değeri alınarak çizilmiştir. Örneğin A0H numunesini gösteren grafik değeri A0HL, A0HR, A0KHL ve A0KHR numunelerinin ortalama UPV değerleri alınarak oluşturulmuştur.



Şekil 78. Yatay ve dikey yönde karot alınımının UPV değişimi üzerindeki etkisi

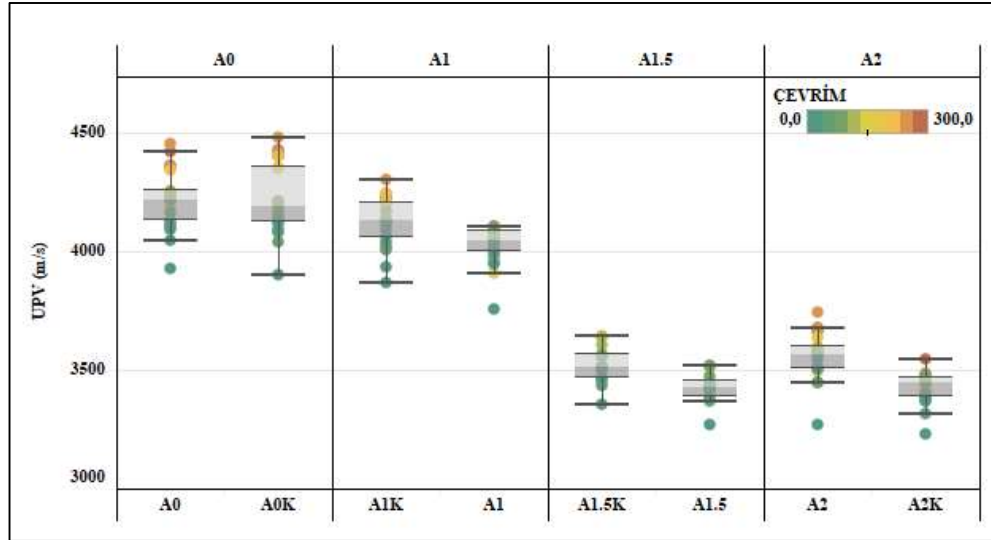
Şekil 78'de verilen grafikte görüldüğü üzere en yüksek UPV değerleri A0 grubunda elde edilmiştir. Basınç deneyi sonuçlarında da belirtildiği gibi AEA, beton içerisinde oluşturduğu boşluklar nedeniyle dayanımı düşürmüş donma-çözülme çevrimlerinde de bu durum değişmemiştir. Her bir numune grubunun UPV değeri çevrimler süresince kendi örneklem



dağılımına uygun olarak artmaya devam etmiştir. En yüksek UPV değeri yaklaşık 4500 m/s ile A0 grubunda ve yatay karot numunelerinden elde edilmiştir. A1, A1,5 ve A2 grupları da A0 grubunu takip etmiştir. Ancak, istisnai olarak, 300. çevrim sonunda A2 grubunda dikey karot numunelerinin yaklaşık 3800 m/s'lik UPV değerlerine ulaşmıştır (Şekil 78). Yalnız, A1,5 ve A2 grubunun diğer numunelerinin yarılmayıp da 300. çevrime kadar ulaşması durumunda sahip olacağı UPV değeri bilinemediğinden bu sonucun yorumlanmasında güçlük çekilmiştir. En düşük UPV değerleri ise A1,5V grubunda elde edilmiştir.

Bütün dikey karot numuneleri ve A2 grubunun yatay karot numuneleri başlangıç UPV değerinden sonra sıçrama yapmıştır. Yani donma-çözülme çevrimi öncesi UPV değeri örneklemin genel karakteristiğine uymamıştır. Dolayısıyla dikey yönde alınan karot numuneleri ilk 10 çevrimde bile donma-çözülme döngülerinden etkilenmiştir. Bunun sebebinin de yine dikey karot numunelerinin daha fazla tabakalar arası boşluğa sahip olması olduğu düşünülmektedir. Bu numunelerin fazla boşluklu olması donma-çözülme çevrimleri süresince suyun bu boşluklarda rahatlıkla ilerlemesini ve donarak boşluk hacminin artırmasını sağlamıştır. Dolayısıyla donma-çözülme nedeniyle numunelerin karakteristiği değişmiştir.

Şekil 79'deki grafikte ise kür işleminin donma-çözülme çevrimleri süresince numunelerin UPV değişimi üzerindeki etkisi verilmiştir. Bir önceki grafikte olduğu gibi burada da kürlü-kürsüz gruplardaki numunelerin ortalama UPV değerleri alınarak grafik oluşturulmuştur.



**Şekil 79.** Kür işleminin UPV değişimi üzerindeki etkisi

Şekil 79'da verilen grafikte görüldüğü üzere hava sürükleyici kullanılmayan A0 grubunun, özellikle de kür edilen numunelerinin (A0K), UPV değerleri diğer gruplardan ve numunelerden daha yüksektir. AEA kullanılan A1 ve A1,5 grubunda kürlü numunelerin UPV

değerleri kürsüz numunelerden fazladır ve çevrimler süresince durum bu şekilde devam etmiştir. Fakat en yüksek AEA oranı ile üretilen A2 grubuna bakılacak olursa kürsüz numunelerin kürlü numunelerden daha yüksek UPV değerlerine sahip olduğu görülecektir. Dolayısıyla AEA'nın fazla miktarda kullanılması durumunda kür katkısının, numunenin donma-çözülme direnci üzerinde olumlu etkisinin olduğu söylenez. Çünkü bütün gruplarda kür uygulanmış numunelerin maksimum UPV değerleri kür edilmemiş numunelerden fazla olmasına rağmen en yüksek oranda AEA kullanılan A2 grubunda durum bunun tam tersi olmuştur.

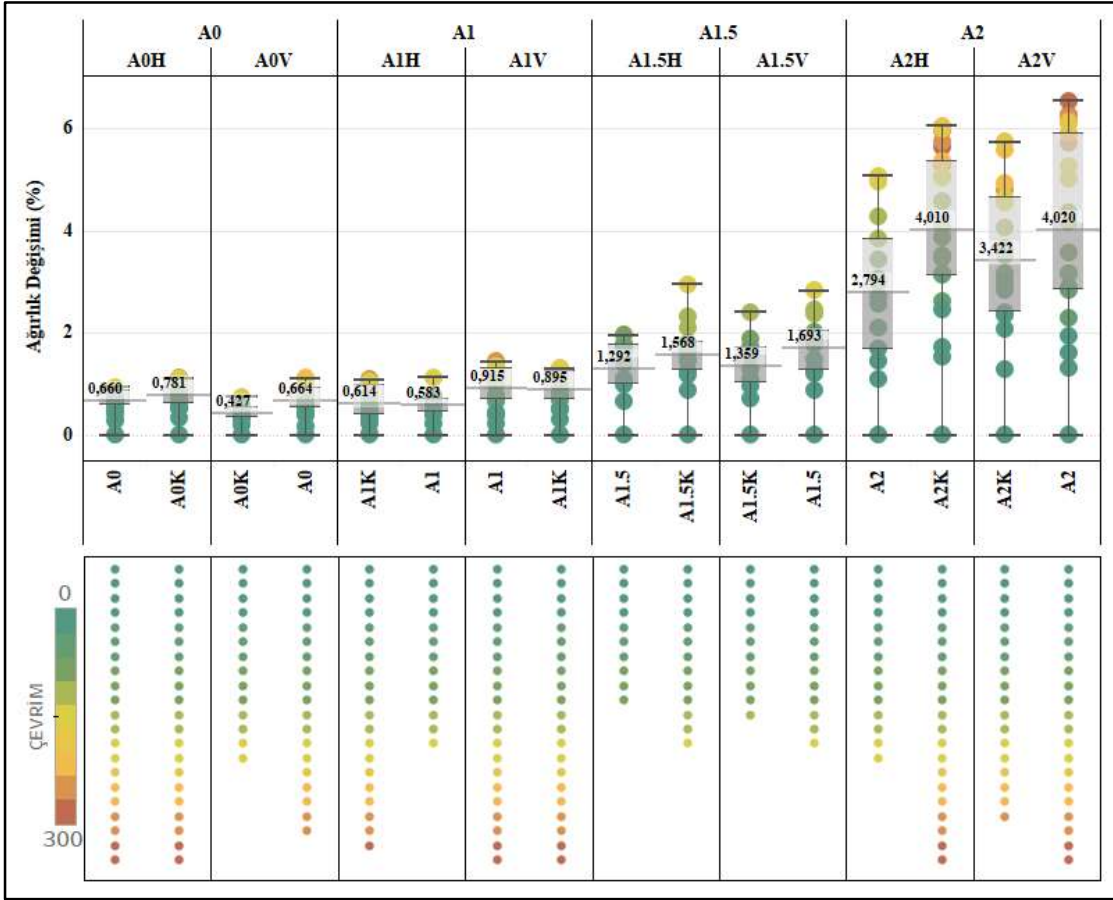
Örneklem dağılımına bakılacak olursa tüm kürsüz grupların ve yine istisnai olarak A2 grubunun kürlü numunelerinin başlangıç UPV değerlerinin örneklem dağılımına uymadığı görülecektir. Bu durumda kür katkısının donma-çözülme çevrimleri neticesinde numunenin karakteristiğinin değişmemesine katkı sağladığı söylenebilir. A2 grubunda yüksek AEA nedeniyle boşluk miktarının diğer gruplardan fazla olduğu düşünüldüğünde gerek kür katkısının gerekse de yatay dikey karot alınımının bu gruptaki numunelerin UPV değerlerini diğer gruplardan farklı etkilemesi normal olarak değerlendirilmiştir. Bu gruptaki numunelerin başlangıç UPV değerleri her durumda örneklem dağılımına uymamaktadır. Kürsüz numunelerde başlangıç UPV değeri ile çevrimler boyunca ölçülen UPV değerlerinin karakteristiği oldukça farklıdır. Ancak kür uygulanmış numunelerin UPV değerleri, başlangıç da dahil, örneklem dağılımına uygun olarak değişmiştir. Dolayısıyla kür katkısının, numunenin donma-çözülme çevrimlerinden olumsuz etkilenmesini bir miktarda olsa azalttığı söylenebilir.

Yine Şekil 79'deki grafikten görüldüğü üzere en yüksek UPV değeri yaklaşık 4500 m/s ile A0K grubunda elde edilmiştir. A0 grubunun UPV değeri de buna çok yakındır. Daha sonrasında A1 grubu sonra A1,5 ve A2 grupları gelmektedir.

3D beton numuneler üretildiği andan itibaren laboratuvar koşullarında tutulmuşlardır, yani, geleneksel numunelere uygulanan standart kür işlemi uygulanmamıştır. Donma-çözülme deneyine başlamadan önce de laboratuvar da bekletilen numunelerin doygun kuru yüzey olarak başlangıç UPV ölçümleri alındıktan sonra donma-çözülme döngüleri başlatılmıştır. ASTM 666/B prosedürüne göre havada donan numunelerin su ortamında çözülmesi gerçekleştirilmiştir. Donma-çözülme döngülerinden olumsuz olarak çok fazla etkilenmeyen 3D beton numunelerin UPV değerlerinin artmasında suda çözdürme işleminin "su kürü" etkisi gibi bir etki oluşturmuş olabileceği de düşünülmektedir. Bu etkinin hidratasyon reaksiyonunun devam etmesine neden olarak, kür uygulanmış numunelerde daha çok olmak üzere, çevrim sayısı ilerledikçe UPV değerlerindeki artışa yol açtığı değerlendirilmektedir.

## Donma-çözülme maruz kalan numunelerin ağırlık değişimi

Numunelerin birim hacim ağırlıklarında meydana gelen değişim Şekil 80’de verilmiştir.

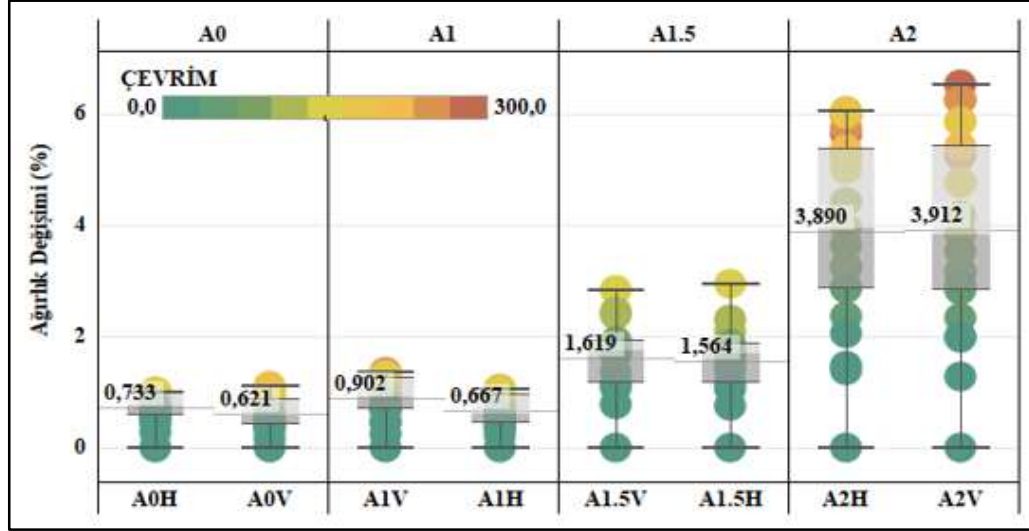


Şekil 80. Donma-çözülme çevrimlerinin tüm numunelerin ağırlık değişimine etkisi

Şekil 80’den numunelerin ağırlıklarında çevrimler ilerledikçe artışlar olduğu görülmektedir. En yüksek ağırlık değişimi değerlerinin AEA’ nın en fazla katıldığı yani boşluk miktarı en fazla olan A2 grubunda olduğu görülmektedir. Bu grupta ortalama olarak yaklaşık % 4 civarında ağırlık artışları meydana gelmiştir. Bu grubun hemen ardından % 0,15 oranında AEA kullanılan A1,5 grubunda yaklaşık % 1,5’luk ağırlık artışları meydana gelmiştir. Üstelik bu grubun numuneleri erken çevrim sayılarında ayrılmıştır. Çevrime devam etmiş olsalardı daha fazla ağırlık artışlarının olması beklenirdi. Bundan sonra ise yaklaşık % 0,5’lik ağırlık artışlarıyla sırasıyla A1 ve A0 grupları gelmiştir.

Şekil 80’deki grafikte özellikle A0 ve A1 gruplarında çevrim sayısını gösteren renklerin net olarak ayırt edilmemesinin bir nedeni de çevrimler süresince numunelerde bir yandan ağırlık artışı olmasına rağmen donma-çözülme hasarı nedeniyle de ara ara parça kopmaları ya da ufalanmaların yol açtığı ağırlık kayıplarıdır. Çevrimler süresince bazı numunelerde bu durum gözlenmiştir.

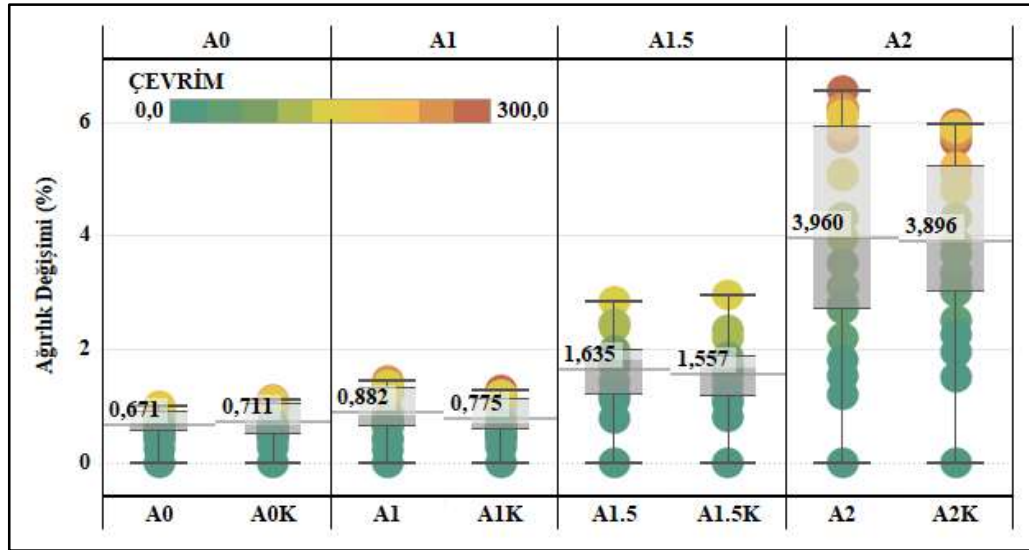
Yatay ve dikey yönde alınan karot numunelerin ağırlıklarının donma-çözülme çevrimleriyle değişimi Şekil 81'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 81. Karot alım yönünün ağırlık değişimi üzerindeki etkisi

Şekil 81'deki grafikten görüldüğü üzere 3D betonların farklı yönlerinden alınan karot numunelerin ağırlıkları donma-çözülme döngülerinden çok da farklı etkilennememiştir. Yatay ve dikey yönde alınan karot numunelerde ağırlıklar genel olarak bütün gruplarda birbirine çok yakın değerlerde değişmiştir. Bununla birlikte, A0 grubu hariç, tüm gruplarda dikey karot numunelerinin ağırlık artışlarının yatay karotlardan biraz fazla olduğu da söylenebilir. Dikey karot numunelerinde 3 adet tabakalar arası boşluk olduğundan bu numunelerin boşlukları daha fazla dolayısıyla genleşmeleri ve ağırlık artışları da daha fazla olmuştur. A0 grubunda ise dikey karot numuneleri yatay numunelere göre erken çevrim sayılarında ayrılmışlardır bu nedenle bu grupta yatay karotların ağırlık artışları bir miktar daha fazladır.

Kür edilen ve kürsüz numunelerin ağırlık değerlerinin donma-çözülme çevrimlerinden nasıl etkilendiği ise Şekil 82'deki grafikte verilmiştir.



**Şekil 82.** Kürlü-kürsüz numunelerin ağırlıklarındaki değişim

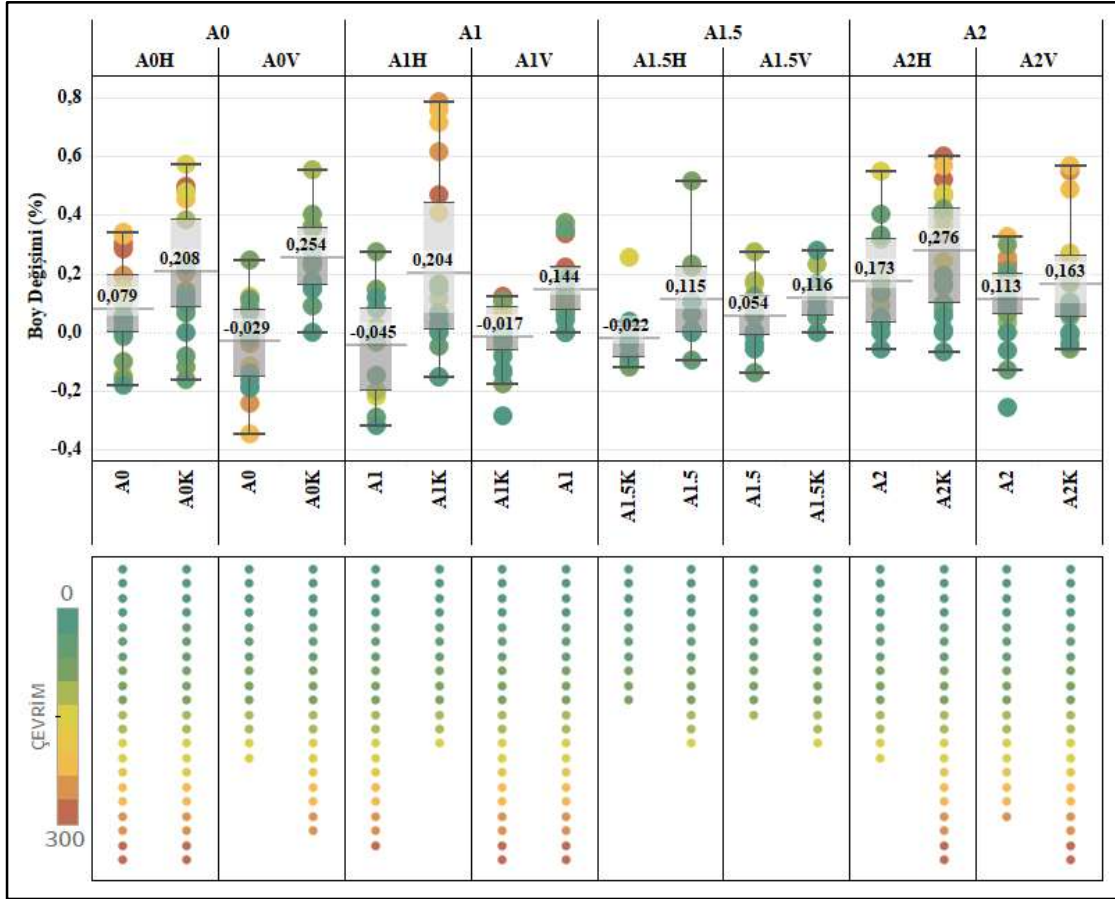
Şekil 82’de verilen grafikte görüldüğü üzere genel olarak kürlü ve kürsüz numunelerin ağırlık artış değerleri çok yakındır ve çevrimler boyunca yükselmeye devam etmiştir. A0 grubu hariç tüm gruplarda kürsüz numunelerin ağırlıkları kürlü numunelere göre daha fazla değişmiştir. Özellikle A2 grubunda kürsüz numunelerin ortalama ağırlık değişimleri kürlü numunelere göre ve diğer tüm numunelere göre daha fazla olmuştur. A0 grubunda sadece kürlü numunelerin ağırlıkları kürsüz numunelere göre daha fazla olmuş olmasının nedeni yine bu grup numunelerin daha uzun çevrim sayılarına ulaşmış olmalarıdır. Neticede kür katkısının numunelerin donma-çözülme çevrimleri sonucu oluşan ağırlık artışlarına karşı direnci artırdığı söylenebilir.

Kür uygulama işlemi ve yatay yönde karot alımı numunelerin donma-çözülme döngülerinde olumlu etkiler oluşturmuştur. Yatay yönde alınan karotlar dikey yöndeki karotlara göre daha az tabakalar arası boşluk içermektedir, boşluk miktarı az olan numuneler de daha iyi sonuçlar vermiş daha az ağırlık artışları göstermişlerdir.

Donma-çözülme döngülerine başlamadan önce tüm numunelerin birim hacim ağırlığı ortalama olarak  $1,798 \text{ g/cm}^3$  idi. Tüm numunelerin kırılmadan devam ettiği son çevrim olan 70. çevrimde ortalama birim hacim ağırlığı  $1,815 \text{ g/cm}^3$  olmuştur. 300 donma- çözülme çevrimi geçiren ve kırılmadan kalan tüm numunelerin ortalama birim hacim ağırlıkları ise  $1,884 \text{ g/cm}^3$  olmuştur ki bu numunelerin başlangıçta birim hacim ağırlık ortalaması  $1,879 \text{ g/cm}^3$  tü. Bu bulgular, donma-çözülme çevrimleri süresince numunelerin birim hacim ağırlıklarının az da olsa artmaya devam ettiğini göstermektedir.

### Donma-çözölmeye maruz kalan numunelerin boy değişimi

3D numunelerin donma-çözölmeye çevrimlerindeki boy değişimi Şekil 83'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 83. Donma-çözölmeye çevrimlerinin numunelerin boyları üzerindeki etkisi

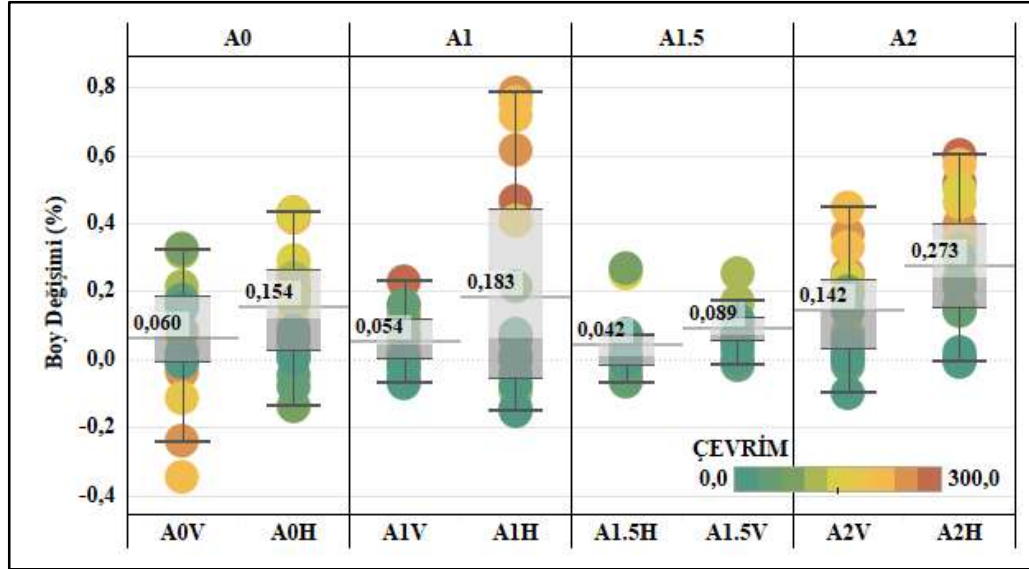
Şekil 83'deki grafikte göröldüğü üzere numunelerde meydana gelen boy değişimi basınç, UPV ve birim hacim ağırlık sonuçlarından farklıdır. En yüksek boy değişimi A2 grubunda A2KH numunelerinde meydana gelmiştir. Daha sonra A0 grubunda A0KH numunelerinde görölmüştür. En düşük boy değişimi ise A1,5 grubunda oluşmuştur.

A2 grubunun ortalama boy değişimi yaklaşık yüzde 0,18 iken, A0 grubunun 0,13, A1 % 0,08 ve A1,5 grubunun ise 0,07 olmuştur. En yüksek AEA içeriğine sahip olan A2 grubu donma-çözölmeye çevrimleri süresince en fazla boyca uzama göstermiştir. Bu grubun ardından en yüksek uzamayı AEA kullanılmayan A0 grubu gerçekleştirmiştir. Bu durum 300. çevrime kadar diğer gruplardan çok daha az numunenin gelebilmiş olması A0 grubunda ise birçok numune ayrılmadan çevrimlere ve dolayısıyla uzamaya devam etmiş olmasıyla da ilişkilidir.

Genel olarak tüm gruplarda numuneler örneklem dağılımına uygun olarak boy değişimi gerçekleştirmiştir. Yalnızca A1K ve A2 numunelerinin dikey karotlarının boy değişimi karakteristiği başlangıçtan sonra değişmiştir. Numunelerde çevrimler süresince donma sonucu

oluşan hacim artışı ve kılcal çatlakların ilerlemesi nedeniyle sürekli genişlemeler oluşmuş numune boyları ve çapları artmaya devam etmiştir. Fakat ara ara bazı numunelerde parça kopması veya ufalanmalar meydana gelmiş dolayısıyla bazı çevrimlerde numunelerin boy ve çaplarında azalmalar görülmüştür. Örneğin A1KH grubunda boy, çevrim sayısı arttıkça uzamaya devam ederken 300. çevrime yaklaştıkça azalmaya başlamıştır.

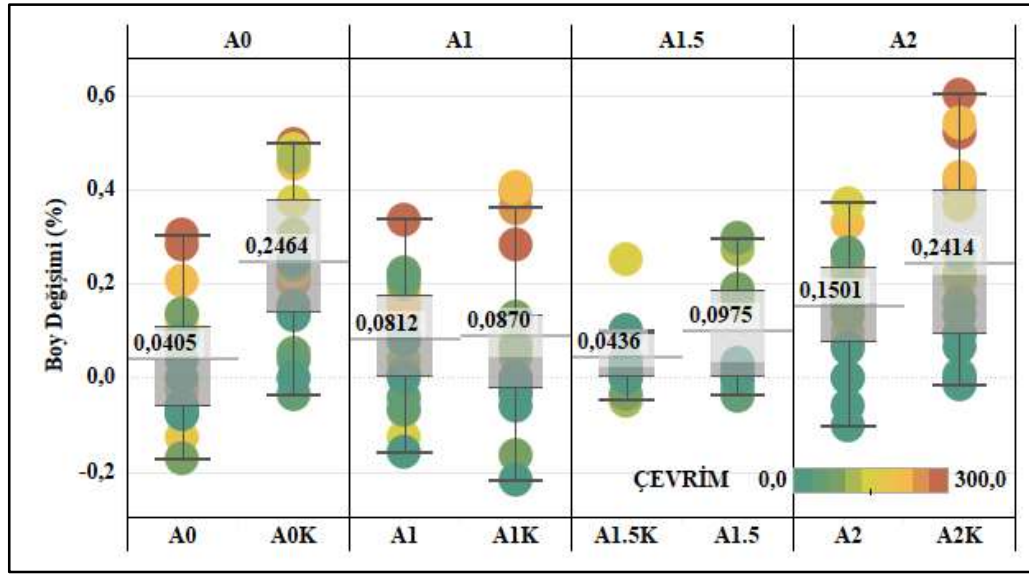
Yatay ve dikey yönde alınan karot numunelerin donma-çözülme çevrimleri süresince boy değişimleri Şekil 84'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 84. Karot alım yönünün boy değişimine etkisi

Şekil 84'deki grafikten görüldüğü üzere en yüksek boy değişimi ortalama % 0,27 ile A2H grubunda meydana gelmiştir. Hemen hemen tüm gruplarda yatay yönde alınan karot numuneleri dikey yönde alınan karot numunelerinden daha fazla boyca uzama göstermişlerdir. Yalnızca A1,5 grubunda durum tam tersidir fakat bu grupta boyca değişimler birbirine çok yakındır ve bu gruptaki numuneler 300 çevrime kadar direnememişlerdir. A2 grubundan sonra en yüksek boy artışı A1H ve A0H grubunda meydana gelmiştir. A0V grubu numunelerinin çevrim ilerledikçe boylarında azalma meydana gelmiş olması ilginç bulunmuş ve parça kopmasının da bu sonuç üzerinde etkili olduğu değerlendirilmiştir.

Kür etkisi sonucu numune boylarında meydana gelen değişim Şekil 85'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 85. Kür işleminin numunelerin boy değişimine etkisi

Şekil 85’de verilen grafik incelendiğinde A0, A1 ve A2 gruplarında kürlü numunelerin, A1,5 grubunda ise kürsüz numunelerin boyca değişiminin daha fazla olduğu görülecektir. En yüksek boy değişimi A2K grubunda gerçekleşmiş fakat ortalama olarak A0K grubu öne çıkmıştır. Bütün grup numunelerinde boy değişimi örneklem dağılımına uygun olarak gerçekleşmiştir.

#### ***Donma-çözülmeye maruz kalan numunelerin çap değişimi***

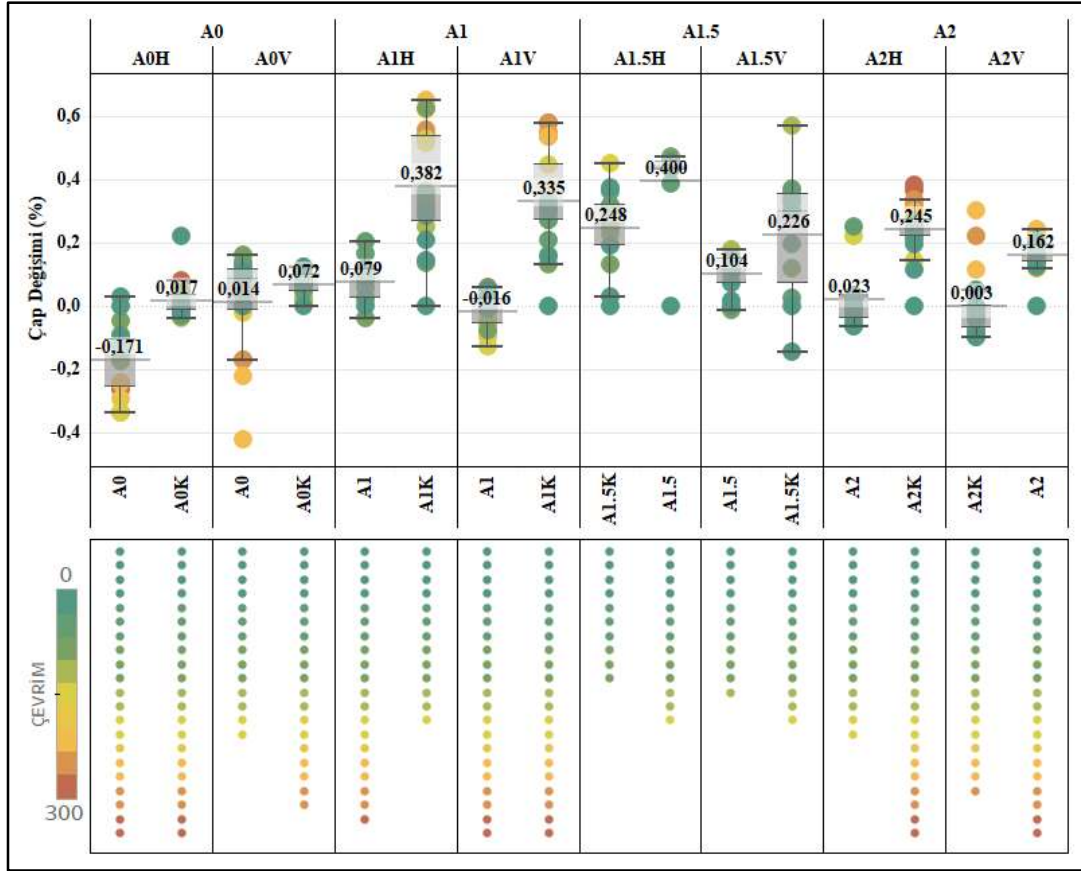
Numunelerin çevrimler sonucu çaplarında oluşan değişim Şekil 86’da verilmiştir.

Şekil 86’da görüldüğü üzere numunelerin çap değişimi boyca değişimlerinden farklı gerçekleşmiştir. En yüksek çap değişimleri yatay karot numunelerinden kürlü olan grup olan A1,5 grubunda meydana gelmiştir ve ortalama % 0,4 çap değişimi gerçekleşmiştir. Zaten bu grubun numunelerinin erken çevrim sayılarında ayrılmaları da muhtemelen bu nedenle olmuştur. Beton gevrek malzeme olduğundan çapta meydana gelen artışlar, tıpkı Yarmada Çekme işlemi gibi, betonda çekme gerilmeleri oluşturmuştur. Çekme dayanımı basınç dayanımının yaklaşık onda biri kadar olan beton da bu etkileri karşılayamamış ve ortadan (katmanlar arası birleşim yerlerinden) ikiye ayrılmışlardır.

A1,5 grubunun ortalama çap değişimi % 0,24 , A1 grubunun ortalama çap değişimi % 0,2, A2 grubununki 0,11 ve son olarak A0 grubunun çap değişimi ise % -0,02 olmuştur. Genel olarak bütün gruplarda çaplarda artmalar olduğu gibi azalma olan numuneler de mevcuttur. A0 grubunun numunelerinin yarısının çapları artmasına rağmen yarısının ise çapları azalmıştır. Aynı durum boy değişimleri için de geçerli olmuştur. A0H, A0KH, A0V, A0KV gibi

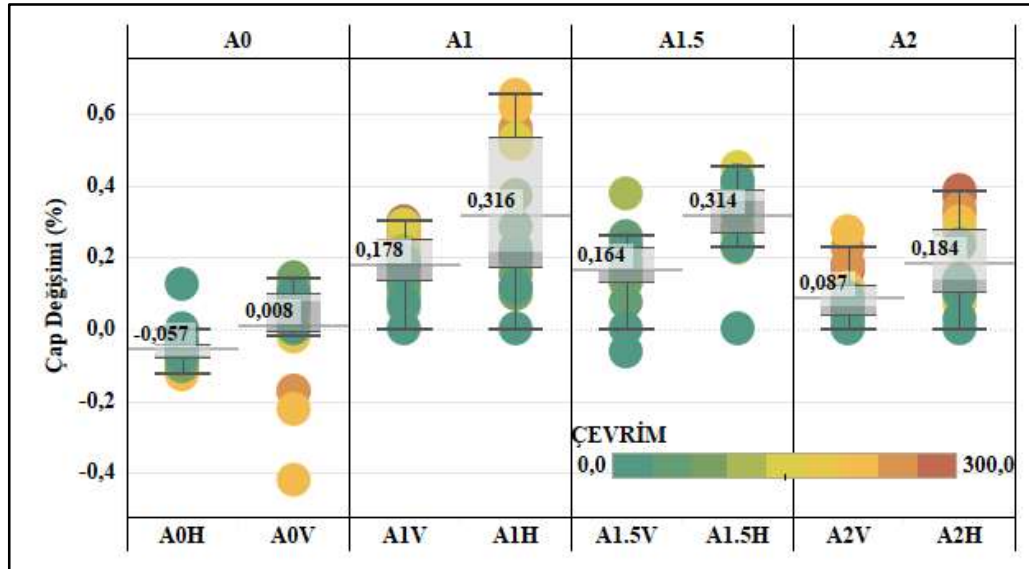


numunelerin çapları ve boyları çevrimler süresince azalmıştır fakat A0 grubunun diğer numunelerinin boyları ve çapları artmıştır.



Şekil 86. Donma-çözülme çevrimleriyle numunelerin çap değişimi.

Karot alım yönünün çap değişimi üzerindeki etkisi Şekil 87’deki grafikte verilmiştir.



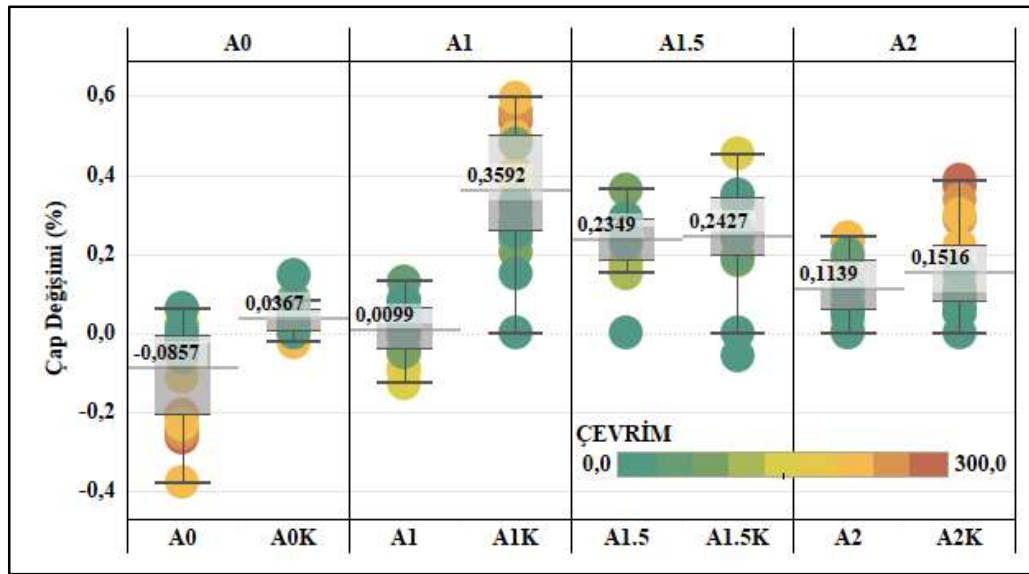
Şekil 87. Karot alım yönünün numunelerin çap değişimlerine etkisi

Şekil 87’deki grafikten görüldüğü üzere, boy değişimi grafiklerinde olduğu gibi, hemen hemen tüm gruplarda yatay karotların çap değişimi daha fazla olmuştur. Yalnızca A0 grubunda

yatay karot numunelerinin çapları çevrim sayısı ilerledikçe azalmıştır. Bu nedenle bu grupta dikey karot numunelerin ortalama çap değişimi biraz daha düşük çıkmıştır. En yüksek çap değişimi yaklaşık % 0,3 ile A1,5H ve A1H numune gruplarında gerçekleşmiştir.

Yatay karot numunelerinin hem boyları hem çapları hem de birim hacim ağırlıkları genel olarak dikey karot numunelerinden daha fazladır. Daha önce de bahsedildiği gibi bu numunelerin tabakalar arası boşluk miktarları dikey karotlardan daha azdır. Dolayısıyla bu numunelerde daha fazla genleşme oluşmasına rağmen donma-çözülme etkisine daha çok direnmişler ve ilerleyen çevrim sayılarında ancak ayrılmalar gerçekleşmiştir. Öyle ki 300 çevrim sonunda ayrılmadan kalan numunelerin çoğunluğu yatay karot numuneleridir.

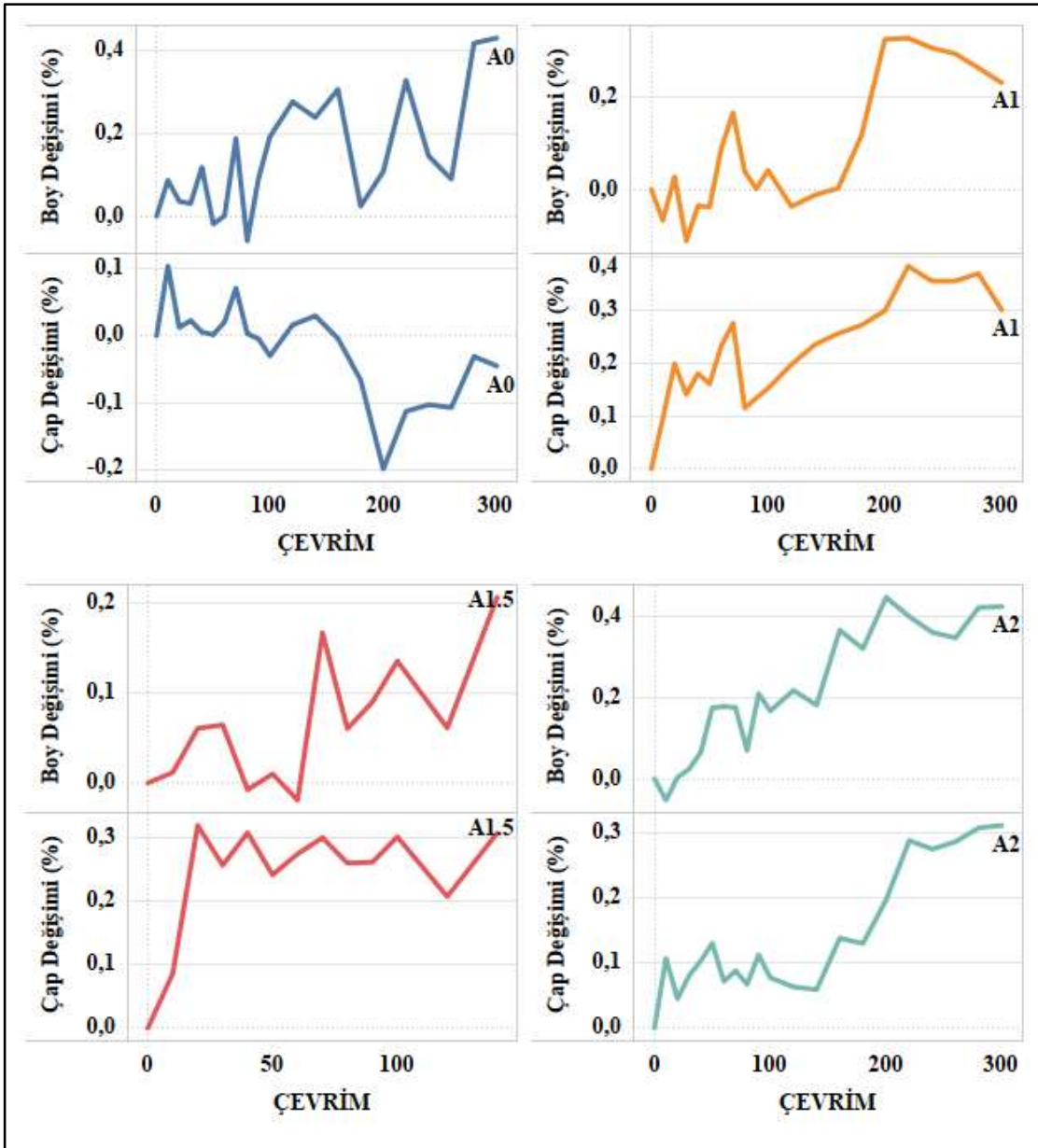
Kür işleminin çap değişimine etkisi ise Şekil 88'deki grafikte verilmiştir.



**Şekil 88.** Kür işleminin numunelerin çap değişimine etkisi

Yukarıdaki grafikten görüldüğü üzere hemen hemen tüm gruplarda kürlü numuneler kürsüz numunelere göre daha fazla çap değiştirmiştir. Yalnızca A1,5 grubunda çok yakın değerler olmakla birlikte kürsüz numuneler ortalama % 0,23 ile kürlü numunelere göre (% 0,22) biraz daha fazla çap değiştirmiştir. En fazla çap değişimi % 0,36 ile A1K grubunda meydana gelmiştir. Daha sonrasında A1,5 ve A2 grubu gelmiştir. En az çap değişimi ise % -0,085 ile A0 grubunda olmuştur. A2K grubu istikrarlı biçimde 300 çevrime doğru çap artışı göstermiştir. Genel itibariyle kürlü numuneler daha fazla genleşmesine rağmen daha fazla çevrim sayılarına kadar ayrılmadan ulaşabilmişlerdir

Numune gruplarının ortalama boy değişimleri ile çap değişimleri arasındaki ilişki Şekil 89'daki grafikte ele alınmıştır.

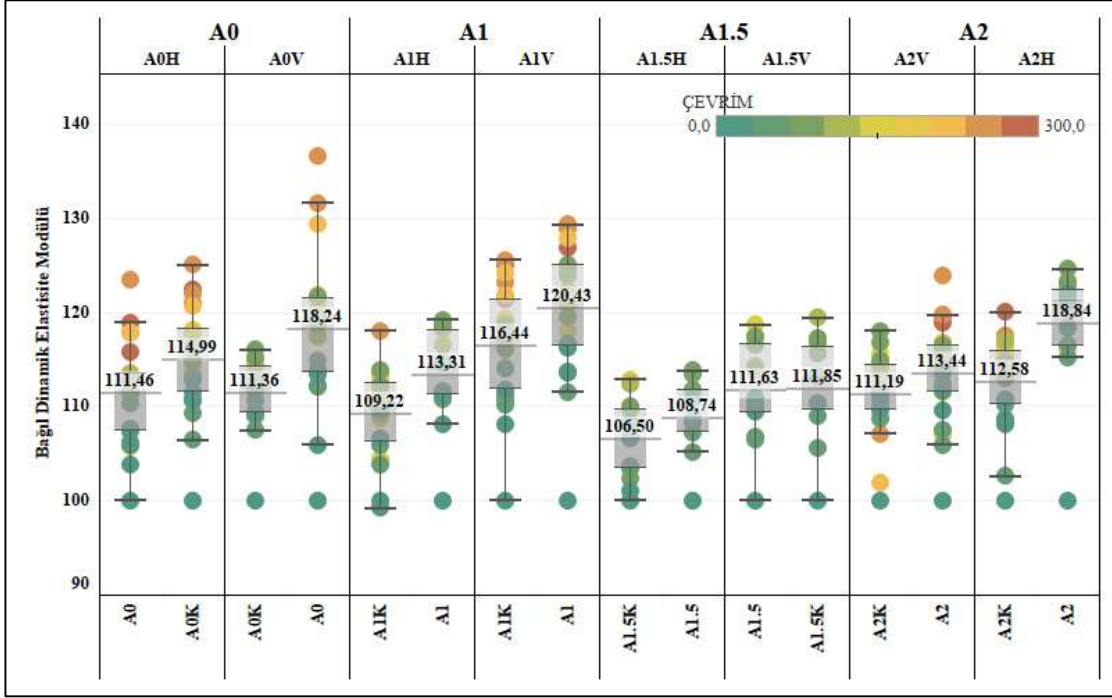


**Şekil 89.** Donma-çözülme çevrimlerinde boy değişimi ve çap değişimi arasındaki ilişki

89'daki grafiğe göre bütün gruplarda çevrimler süresince boy ve çap değişimleri arasında hemen hemen benzer ilişkiler gözlemlenmiştir. AEA kullanılmayan A0 grubunda ilk 100. çevrime kadar numunelerin boy ve çap değişimi arasında benzer bir ilişki olmasına rağmen 100 çevrimden sonra numunelerin boyları artmasına rağmen çapları azalmaya devam etmiştir. Bu gruptaki numunelerde parça kopması, ufalanmalar gibi betonda don hasarı etkileri diğer gruplara nazaran fazlaca meydana gelmiş olması muhtemeldir. Diğer gruplarda ise (A1, A1,5, A2) AEA' nın don hasarına karşın olumlu etkisi daha net görülmektedir. Hemen hemen tüm gruplarda çevrimler süresince boy ve çap değişimi birbirine paralel seyretmiştir. En uyumlu grup ise AEA' nın en fazla kullanıldığı A2 grubu olmuştur. Neredeyse tüm çevrimler boyunca çap ve boy değişimi paralel seyretmiştir.

## Donma-çözölmeye maruz kalan betonların bağıl dinamik elastisite modülleri

300 çevrim donma-çözölmeye maruz kalan betonların ASTM C666 standardına göre hesaplanan bağıl dinamik elastisite modülleri (BDEM) Tablo 15’de verilmiştir. Her bir numune için 300 çevrime kadar geçirdiği sürede bağıl dinamik elastisite modülünde meydana gelen değışikliğı gösteren grafik ise Şekil 90’da gösterilmiştir.



Şekil 90. Donma-çözölmeye maruz kalan betonların bağıl dinamik elastisite modülü değışimi

Tablo 15’de verilen sonuçlar ile Şekil 90’da verilen grafik birlikte değerlendirildiğinde numunelerin 300 çevrime doğru bağıl dinamik elastisite modüllerinin artmış olduğu görülür. UPV, ağırlık, boy ve çap değışimi sonuçlarında olduğu gibi, bağıl dinamik elastisite sonuçları da çevrim sayısı arttıkça üretilen 3D beton numunelerin donma-çözölmeye hasarından etkilenmediğini ortaya koymaktadır. Yalnızca A1KH ve A1,5KH numunelerinde başlangıç çevrimlerinde bir miktar dinamik elastisite modüllerinde azalma görölmüş daha sonra çevrimler ilerledikçe bu numunelerin de dinamik elastisite modülleri artmıştır.

**Tablo 15.** ASTM C 666'ya Göre Hesaplanan Bağlı Dinamik Elastisite Modülleri

ÇEVİRİM	A0				A1				A1.5				A2			
	A0H	A0KH	A0KV	A0V	A1H	A1KH	A1KV	A1V	A1.5H	A1.5KH	A1.5KV	A1.5V	A2H	A2KH	A2KV	A2V
0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
10	105,88	110,61	109,40	105,94	108,09	99,21	108,14	113,51	108,65	101,06	113,15	109,61	118,22	108,03	109,74	111,57
20	103,79	111,51	112,64	113,47	114,54	109,62	113,92	116,65	110,69	108,15	110,25	110,13	121,03	110,77	111,36	109,56
30	107,36	112,87	110,52	113,87	111,25	106,53	111,77	116,18	108,34	106,59	113,27	110,81	121,93	108,53	110,60	113,49
40	110,27	110,67	111,63	114,87	111,64	109,63	111,36	116,48	108,45	106,64	110,23	109,37	118,47	108,61	111,81	112,31
50	107,64	109,25	108,91	112,12	110,73	105,87	110,09	111,53	107,23	103,61	105,50	106,46	115,18	102,57	108,72	107,46
60	106,16	106,43	107,47	112,20	111,28	103,82	110,67	113,62	105,19	103,43	108,89	106,68	116,46	110,18	109,62	105,91
70	111,64	114,73	111,79	118,78	118,50	110,15	117,82	119,50	111,77	110,07	115,66	113,88	122,77	113,03	114,83	115,61
80	111,28	116,02	115,12	119,47	118,43	113,88	118,70	125,01	113,36	102,30	117,22	116,51	123,21	113,37	118,04	116,48
90	112,81	116,51	116,03	121,68	119,15	112,19	115,98	124,08	113,77	107,77	116,83	117,40	124,54	114,50	116,81	115,27
100	113,40	114,61	114,28	117,31	116,55	110,53	117,76	120,82		109,63	119,38	117,40	122,29	114,92	114,41	116,18
120	112,88	113,18	113,16	118,70	114,79	109,03	117,07	122,23		112,42		114,21	122,13	116,88	113,23	114,46
140	112,96	117,57	114,76	121,26	118,03	111,96	117,40	121,31		112,85		118,70	121,45	115,35	115,65	111,55
160	105,75	113,68	113,31	117,47		104,44	114,14	118,03					116,05	114,42	110,47	106,95
180	111,46	118,14		120,14		108,62	119,27	123,77						116,91	114,06	116,76
200	117,85	117,94		129,40		112,62	124,18	127,89						116,33	113,02	114,33
220	113,50	120,69		121,74		111,26	121,82	124,58						113,34	101,95	112,30
240	117,85	121,98		131,58		113,57	123,17	128,89						117,58	107,06	119,73
260	123,48	125,01		136,55		117,98	125,55	129,27						115,89		123,93
280	118,87	120,94				113,57	121,29	126,88						112,90		118,82
300	115,77	122,41					125,07	128,83						119,99		119,66

Şekil 90'daki grafikten hemen hemen bütün numunelerin başlangıç karakteristiğinin ilk on çevrimden sonra değiştiği görülecektir. İlk ölçüm alındıktan sonra örneklemin karakteristiği belli bir düzende ilerlemiş çevrimler süresince değişmemiştir. A0 grubunda A0V numunelerinde en yüksek bağıl dinamik elastisite modülü elde edilmiştir. Bu numunenin dinamik elastisite modülü yaklaşık %137 seviyelerine kadar yükselmiştir. Dolayısıyla numunenin çevrimler süresince dayanımı artmaya devam etmiştir. Ayrıca bu numuneler tüm gruplar içerisinde en yüksek artış gösteren numunelerdir. Bu numunenin hemen ardından A2 grubundan A2H numuneleri en yüksek artışı (yaklaşık %124) göstermiştir. Ayrıca bu numunelerin örneklem karakteristiği başlangıç durumundan sonra çok fazla değişmiş sonraki çevrimlerde değişmemiş belli bir düzende ilerlemiştir. A1 grubundan A1V numuneleri de yine yaklaşık %130'luk oranla en yüksek bağıl dinamik elastisite modülüne sahip olmuştur. En düşük seviyeler ise erken çevrim sayılarında ayrılan A1,5 grubunda görülmüştür. Bu grupta en yüksek değer ise A1,5KV numunelerinde elde edilmiştir. Kürlü numuneler daha yüksek dinamik elastisite modülü artışı ve buna bağlı olarak da daha yüksek dayanım artışı göstermişlerdir.

Malhotra (1986) yaptığı çalışmada w/b oranı 0,40 olan hava sürüklenmiş bir betona 217 donma-çözülme çevrimi uygulamış ve BDEM'in değişmediğini tespit etmiştir. Leung (1997) tarafından yapılan çalışmada, normal kür edilen ve su/bağlayıcı oranı 0,40 olan ve hava katkısız numunelerin BDEM'leri yaklaşık 175 çevrim sonunda %60'a kadar düşmüştür. Ancak hava sürüklenerek yapılan numunelerde ise 300 çevrim sonunda herhangi bir düşüş olmamıştır. Miao *et al.* (2002), yaptıkları çalışmada su/bağlayıcı oranı 0,26, 0,32 ve 0,44 olan numunelere donma-çözülme (ASTM C-666/A prosedürü) uygulamışlardır. Su/bağlayıcı oranı 0,44 olan numunelerin BDEM değerleri 300 çevrimden daha önce %60 düzeyine inmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0,26 olan numuneler ise aynı seviyeye ancak 1150 çevrimden sonra inmişlerdir. Cwirzen ve Penttala (2005) yaptıkları çalışmada su/bağlayıcı oranı azaldıkça BDEM'in arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca su/bağlayıcı oranı 0,30 olan numunelerin BDEM'lerinde dikkate değer bir düşüş olmadığını tespit etmişlerdir. Palecki and Setzer (2006) yaptıkları çalışmada su/bağlayıcı oranı azaldıkça BDEM'in arttığını belirtmişlerdir. Kim *et al.* (2007) yaptığı çalışmada, su/bağlayıcı oranı 0,25 olan betonların 300 donma-çözülme sonunda BDEM'de bir azalma olmadığını belirlemiştir. Peng *et al.* (2007) yaptıkları çalışmada su/bağlayıcı oranı 0,32 olan numunelerin BDEM'inde 100 ve 200 çevrim sonunda hem hava katkısız hem de hava katkılı karışımlarda bir azalma olmadığını belirtmişlerdir. 300 çevrim sonunda hava katkılı numunelerin yine BDEM'inde azalma olmazken hava katkısız numunelerin BDEM'i 250 çevrimde %50 seviyesinde belirlenmiştir.

Molero *et al.* (2012) yaptıkları çalışmada, ultrasonik görüntülemenin donma-çözülme döngülerine maruz kalan betonda bir değerlendirme aracı olarak kullanımını incelemişlerdir. Bu bozulma sürecindeki hasarı değerlendirmek için, AEA maddeleri içeren ve içermeyen beton numunelerde ultrasonik hız ölçümleri yapmışlardır. AEA içermeyen numunelerinin bağıl dinamik elastisite modülleri ortalama olarak % 80 değerlerine kadar azalmışken AEA içeren numuneleri ortalama %110 seviyelerine kadar artış göstermiştir. Dolayısıyla bu doktora tez çalışması kapsamında üretilen AEA içeren ve içermeyen numuneler de yeterince hava boşluğuna sahip olduğundan don hasarından etkilenmemiştir ve bağıl dinamik elastisite modülleri artmıştır.

### **Mikroyapısal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi**

Üretilen 3D beton elemanlardan alınan karot numunelerine uygulanan donma-çözülme döngüleri tamamlandıktan sonra numuneler üretildikleri andan itibaren 180 günlük olmuşlardır. Mikroyapısal analizleri gerçekleştirmek için hem donma-çözülme uygulanan hem de donma çözülme geçirmeyen basınç dayanım deneyi yapıldıktan sonra laboratuvar ortamında bekletilen numunelerden örnekler alınmıştır. Numuneler üzerinde boşluk boyut dağılımını belirlemek için BET ve Civalı porozimetre analizleri, kristalografik yapıyı belirlemek için de XRD analizi gerçekleştirilmiştir.

#### **BET yüzey alanı deneyi ile mikrogözenek boyutu belirleme analizi sonuçları**

Donma-çözülme çevrimleri bittikten sonra donma çözülme çevrimlerine maruz kalan ve kalmayan 3D beton numuneler kırılarak toz haline getirilmiş ve BET yüzey alanı analizi gerçekleştirilmiştir. Aynı numune üzerinde donma-çözülme öncesi ve sonrası analiz yapılmasının imkânı bulunmamaktadır. Bu nedenle analizler, donma-çözülme maruz kalan ve kalmayan ancak özdeş numuneler üzerinde yapılmıştır.

Sabit sıcaklıkta adsorban tarafından adsorplanan madde miktarı ile denge basıncı veya derişimi arasındaki bağıntıya adsorpsiyon izotermi adı verilmektedir. Adsorpsiyon izotermi, aktif karbonun bir maddeyi ne kadar adsorplayabileceği konusunda fikir vermektedir. Adsorplanan maddenin miktarı, adsorplanacak maddenin özelliklerine, derişimine ve sıcaklığına bağlıdır. Adsorpsiyon izotermilerinin belirlenmesi ve bunlardan hareketle yüzey alan, gözenek boyut ve dağılımı gibi bazı hesaplamaların yapılması BET analizi ile mümkündür (Orbak 2009).

BET analizi ile izoterm eğrileri elde edilerek numunelerde bulunan mezo ve mikro gözenekler belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca numunelerin gözenek-boyut dağılımı grafikleri,

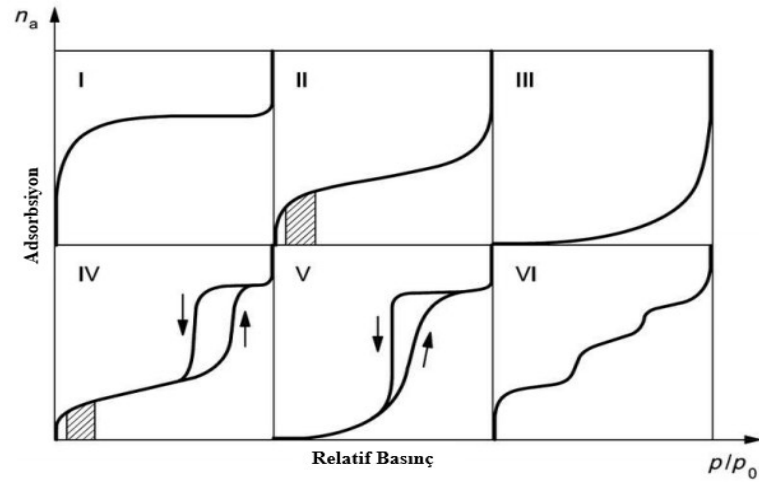
ortalama boşluk çapı, yüzey alanı gibi bir takım özellikleri belirlenmiştir. Tablo 16'da numunelerden BET analizi ile elde edilen yapısal özellikler verilmiştir.

**Tablo 16.** BET Analizi Sonucu Belirlenen Yapısal Özellikler

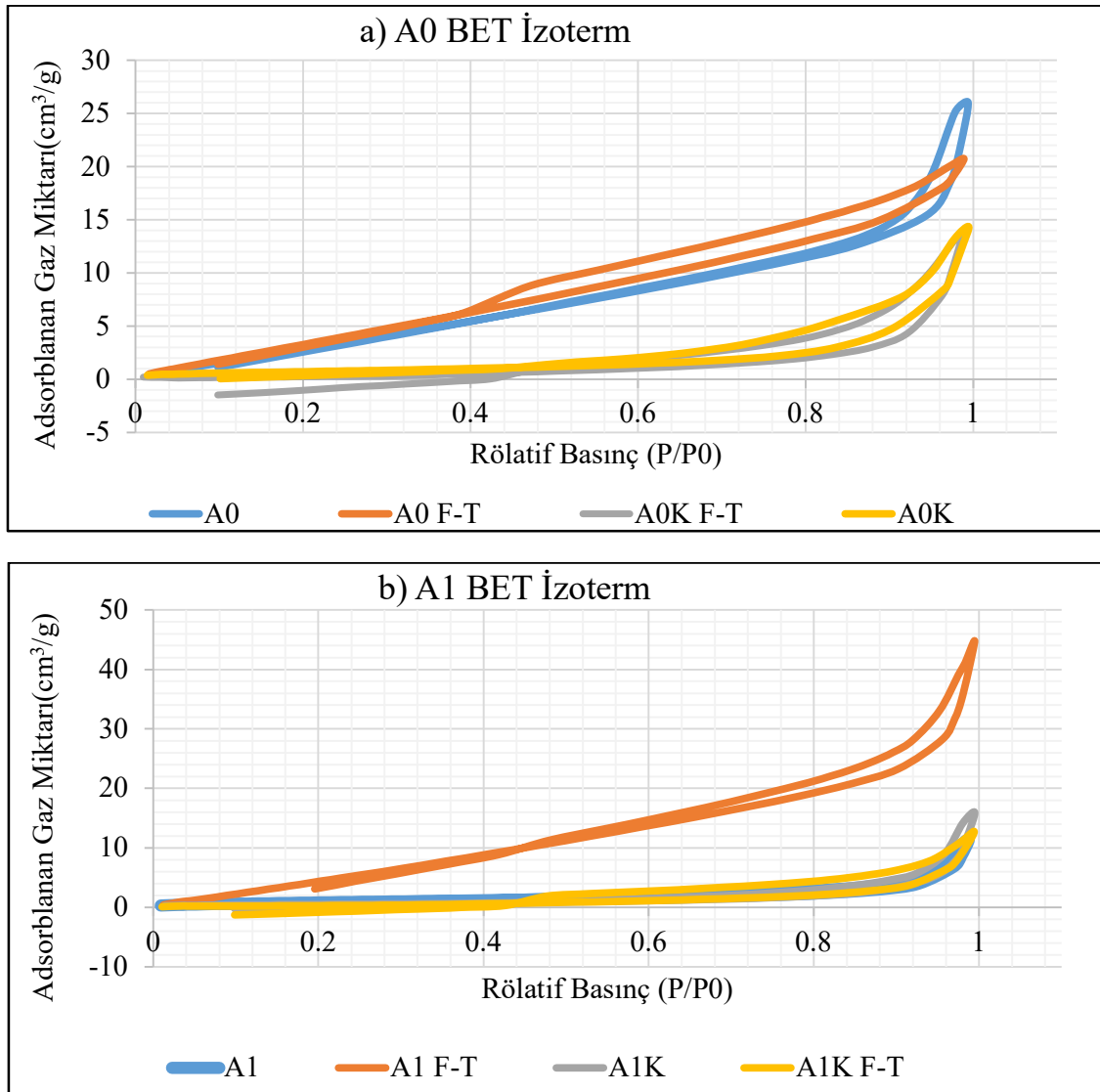
Numune	Yüzey Alanı			Boşluk Hacmi			Boşluk Boyutu	
	BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g)	1,7000 nm ve 300,0000 nm genişlikteki boşlukların BJH Adsorpsiyon kümülatif yüzey alanı (m <sup>2</sup> /g)	1,7000 nm ve 300,0000 nm genişlikteki boşlukların BJH Desorpsiyon kümülatif yüzey alanı (m <sup>2</sup> /g)	t-Plot mikro gözenek hacmi (cm <sup>3</sup> /g)	1,7000 nm ve 300,0000 nm genişlikteki boşlukların BJH Adsorpsiyon kümülatif hacmi (m <sup>2</sup> /g)	1,7000 nm ve 300,0000 nm genişlikteki boşlukların BJH Desorpsiyon kümülatif hacmi (m <sup>2</sup> /g)	Adsorpsiyon ortalam a boşluk çapı (nm)	Desorpsiyon ortalam a boşluk çapı (nm)
A0	19,4933	18,6369	19,8110	-0,008718	0,038621	0,039358	4,9607	6,0587
A0K	2,6650	3,6965	6,6008	-0,000196	0,022090	0,022048	16,6973	23,1739
A0 F-T	22,0938	20,8029	25,1385	-0,009961	0,030211	0,031323	4,8219	5,2809
A0K F-T	1,0442	3,5886	7,5745	-0,000389	0,021223	0,021221	37,5159	60,1906
A1	3,3750	3,6916	4,6888	-0,000788	0,017479	0,017622	9,4069	12,2713
A1K	1,8407	3,0987	5,0545	-0,000117	0,024564	0,024442	17,9153	26,2652
A1 F-T	35,0113	31,3349	35,8848	-0,014735	0,066812	0,067757	4,8402	5,7130
A1KF-T	1,1788	3,5516	8,8071	-0,000335	0,019649	0,019644	28,8765	44,0667
A1,5	3,1153	3,7261	5,7497	-0,000534	0,026797	0,026777	12,6163	18,0018
A1,5K	3,3714	3,7302	5,2371	-0,000347	0,026731	0,026752	12,2970	16,5445
A1,5 F-T	4,3219	4,7874	8,2412	-0,000406	0,027888	0,027906	9,9827	16,7993
A1,5K F-T	9,6675	11,3267	14,8245	0,003542	0,033106	0,033764	7,8592	10,6607
A2	3,1099	3,4018	4,4884	-0,000379	0,026389	0,026434	10,5237	16,2666
A2K	5,8443	7,0542	8,6205	-0,002003	0,034241	0,034574	8,4810	11,1188
A2 F-T	9,4465	12,1192	17,1463	-0,004351	0,035106	0,034817	8,6640	11,5587
A2K F-T	7,6298	9,2347	16,8690	-0,002276	0,025257	0,025468	8,4733	11,0404

Gazların katılar tarafından adsorpsiyonuna ait altı genel izoterm mevcuttur. BET analizi ile deneysel yoldan belirlenen adsorpsiyon izotermi Şekil 91'de gösterilen 6 tip izoterm eğrisinden birine benzer (Orbak 2009). Bu doktora tez çalışması kapsamında üretilen numunelere uygulanan BET analizi neticesinde elde edilen izoterm eğrileri her bir grup için ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 92'de verilmiştir. Örneğin, Şekil 92(a)'da görüldüğü gibi, A0 grubu; A0(donma-çözölmeye maruz kalmamış kürsüz), A0K (kür uygulanan), A0 F-T (donma-çözölme döngülerine maruz kalan kürsüz), A0K F-T (donma-çözölme döngülerine maruz kalan ve kür uygulanan) numunelerinden oluşmaktadır. Numunenin boşluk yapısını etkileyebilecek faktörlere göre BET analiz numuneleri belirlenmiştir. Çalışmada yalnızca donma-çözölmeye uğrayıp uğramadığı ve kür katkısı uygulanıp uygulanmadığı dikkate alınmıştır. Mesela karot alım yönü dikkate alınmamıştır. Çünkü numuneler toz boyutuna kadar kırıldığından karot alım yönünün önemi kalmamıştır.

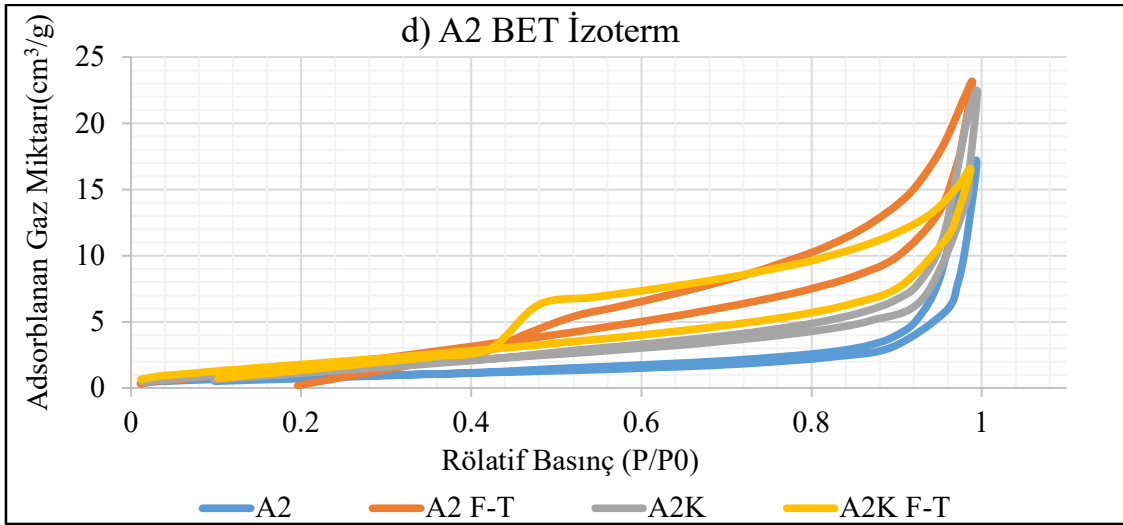
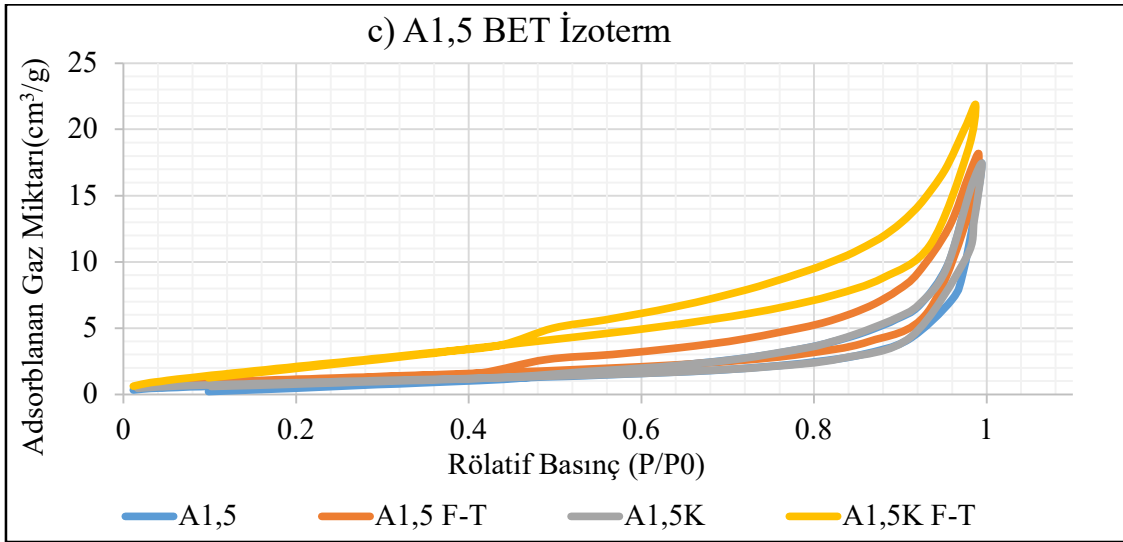




Şekil 91. Adsorpsiyon izoterm tipleri



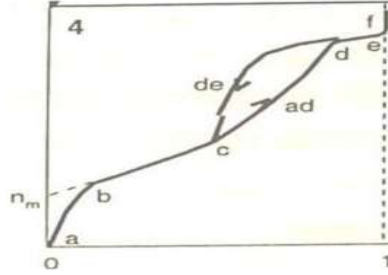
Şekil 92. İzoterm eğrileri (a: A0, b: A1, c: A1,5 ve d: A2 grubu)



Şekil 92. İzoterm eğrileri (a: A0, b: A1, c: A1,5 ve d: A2 grubu) (devam)

Şekil 92'den görüldüğü üzere bu doktora tez çalışması kapsamında üretilen tüm 3D beton numunelerinin izoterm eğrileri tip IV sınıfında çıkmıştır. Şekil 93'de detaylı şekli gösterilen tip IV sınıfı izoterm eğrisi, mezo gözenekli katılardaki adsorpsiyonu gösterir. Birinci tabakanın adsorpsiyon ısısı yoğunlaşma ısısından daha büyük olan ve kılcal yoğunlaşmanın çok olduğu adsorpsiyon izotermi bu eğriye benzer. Diğer izotermelerde adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi aynı yolu izlemesine karşın, IV. tip izotermde orta bağıl basınçlarda izlenen yol farklıdır. Adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi farklı yollar izlemesine "adsorpsiyon histerezisi", izoterm arasında oluşan ilmeğe de "histerezis ilmeği" adı verilir. Genellikle mikro ve mezo gözenek içeren katılardaki adsorpsiyon izotermi bu tipe uymaktadır. Tek tabaka kapasitesi yaklaşık olarak bulunmaktadır. Bu bölgede kılcal yoğunlaşma söz konusudur. Kılcal yoğunlaşma, P denge basıncının Po doygun buhar basıncına ulaşmadığı ( $P/P_o < 1$ ) durumda gözeneklerde görülen yoğunlaşma olayıdır. İzoterm ab

parçası boyunca tek tabakalı adsorpsiyon, bc parçası boyunca çok tabakalı adsorpsiyon, cd parçası boyunca ise kılcal yoğunlaşma olmaktadır. Kılcal yoğunlaşma tamamlandıktan sonra gözeneklerin ağızlarındaki çukur yüzeyler de dolmakta ve e-f boyunca adsorplanan madde yığın olarak ayrılmaktadır (Bal 2007).



**Şekil 93.** Tip IV izoterm eğrisi

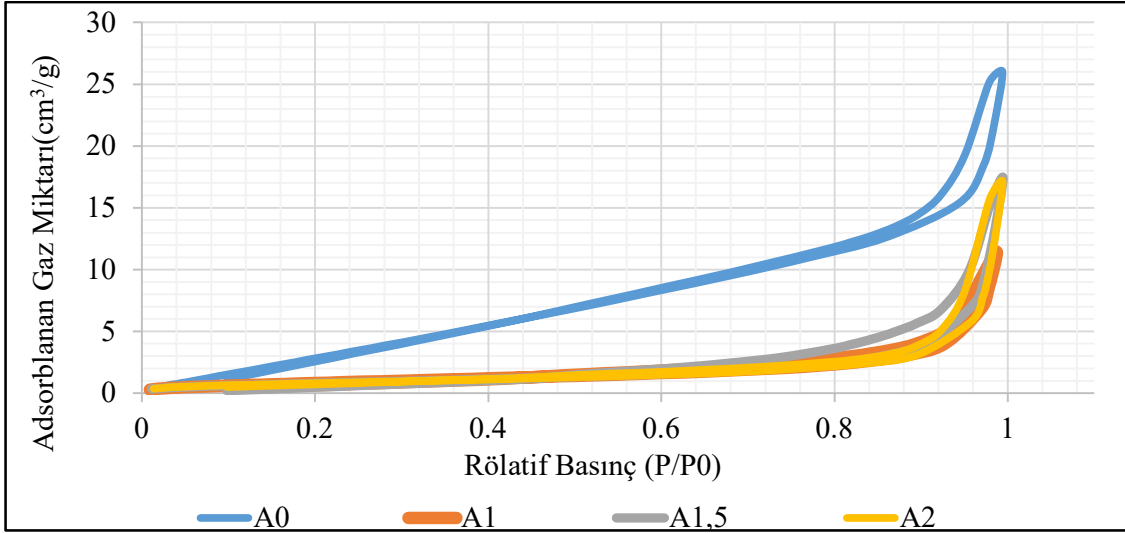
Bu bilgiler ışığında Şekil 92'de verilen grafikler incelenecek olursa aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

A0 grubu BET izotermelerinde A0 ve A0 F-T numunelerinin izotermelerinin birbirine benzediği A0K ve A0K F-T numunelerinin bunlardan farklı fakat kendi içerisinde benzer olduğu görülecektir. Dolayısıyla bu grup numuneleri için kür katkısının etkisinin donma-çözülme etkisinden daha açık olduğu söylenebilir. Grafikten görüldüğü üzere aynı basınç altında A0 ve A0 F-T numunelerinde daha fazla gaz adsorblanmıştır. Dolayısıyla bu numunelerin boşluk miktarlarının kürlü numunelerden daha fazla olduğu söylenebilir. Yani kür katkısı boşluk miktarını azaltmıştır.

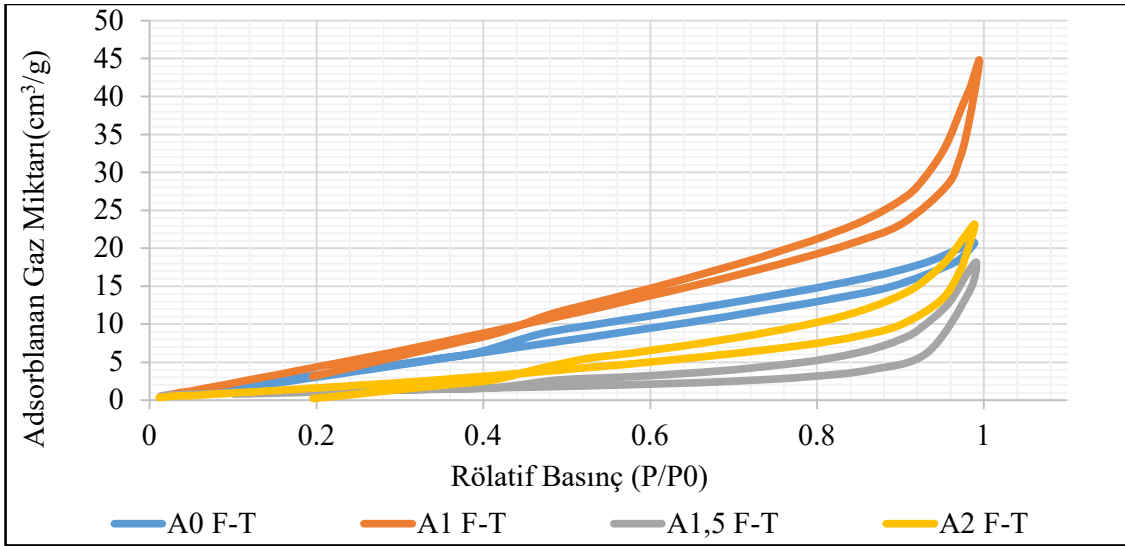
A1 grubu BET izotermelerinde A1 F-T numunesi diğer üç numuneden oldukça farklı izoterm eğrisine sahip olmuştur. A1, A1K ve A1K F-T numuneleri birbirine benzer izoterm davranışı sergilemişlerdir. A0 grubundan farklı olarak bu grupta AEA etkisi söz konusudur. A1 grubu BET izotermelerinde, A1 F-T numunesi A1 numunesinden çok daha fazla boşluğa sahip olmuştur dolayısıyla donma-çözülme döngüleri numunenin boşluk miktarını artırmıştır. Fakat kür katkılı numunelerde durum çok fazla değişmemiştir. Yani, donma-çözülme uygulanan numunelerin boşluk miktarları uygulanmayanlarla oldukça yakındır.

A1,5 grubu ve A2 grubu izoterm eğrilerinde sonuçlar birbirine oldukça benzerdir. Genel itibariyle her iki grubunda bütün numuneleri birbirine oldukça yakın izoterm eğrileri vermiştir. A1,5 grubunda A1,5K F-T ve A1,5 F-T numuneleri ile A2 grubunda A2 F-T ve A2K F-T numuneleri diğer numunelere göre daha fazla gaz adsorblanmış dolayısıyla donma-çözülme döngüleri numunelerde boşluk miktarını artırmıştır. A1 grubundan daha fazla AEA içeren bu gruplarda kür katkısının etkisi çok fazla hissedilememiştir.

AEA, kür katkısı ve donma-çözülme işlemi etkisinin numunelerin BET izotermeleri üzerindeki etkisi ise Şekil 94'de verilen grafiklerde gösterilmiştir.

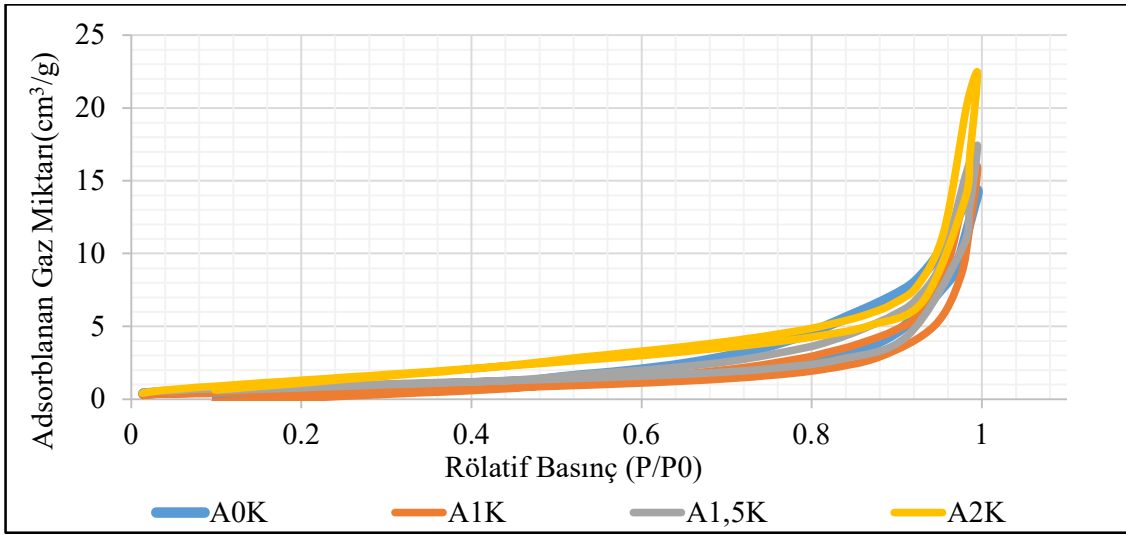


a

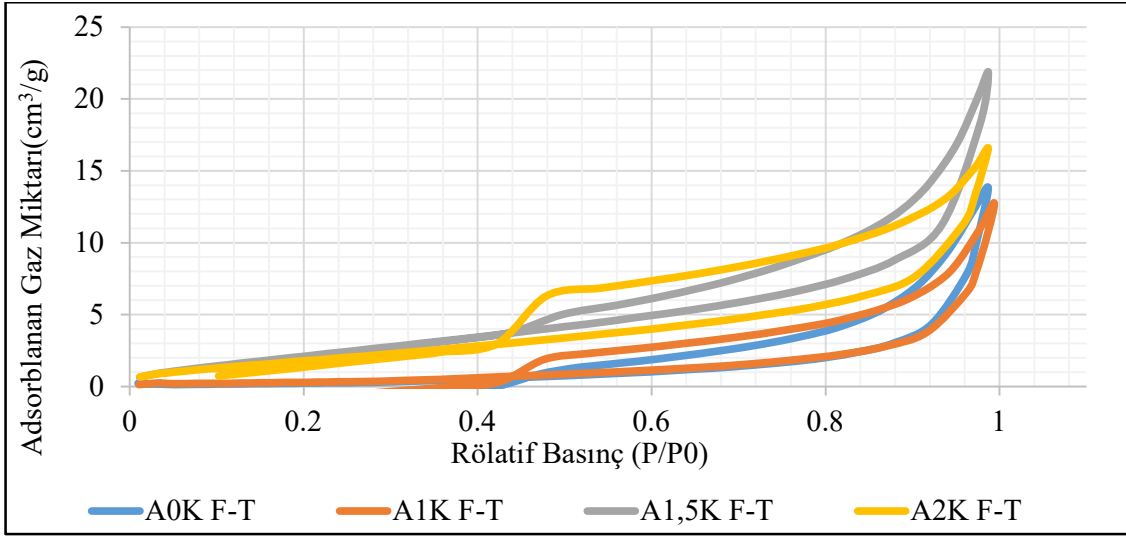


b

**Şekil 94.** Mukayeseli BET izotermeleri (a: donma-çözülme uygulanmayan numunelerde hava sürükleyici katkının BET izotermelerine etkisi. b: donma-çözülme uygulanan numunelerde hava sürükleyici katkının BET izotermelerine etkisi. c: kür katkılı ve donma-çözülme uygulanmayan numunelerde hava sürükleyici katkının BET izotermelerine etkisi. d: kür katkılı ve donma-çözülme uygulanan numunelerde hava sürükleyici katkının BET izotermelerine etkisi)



c



d

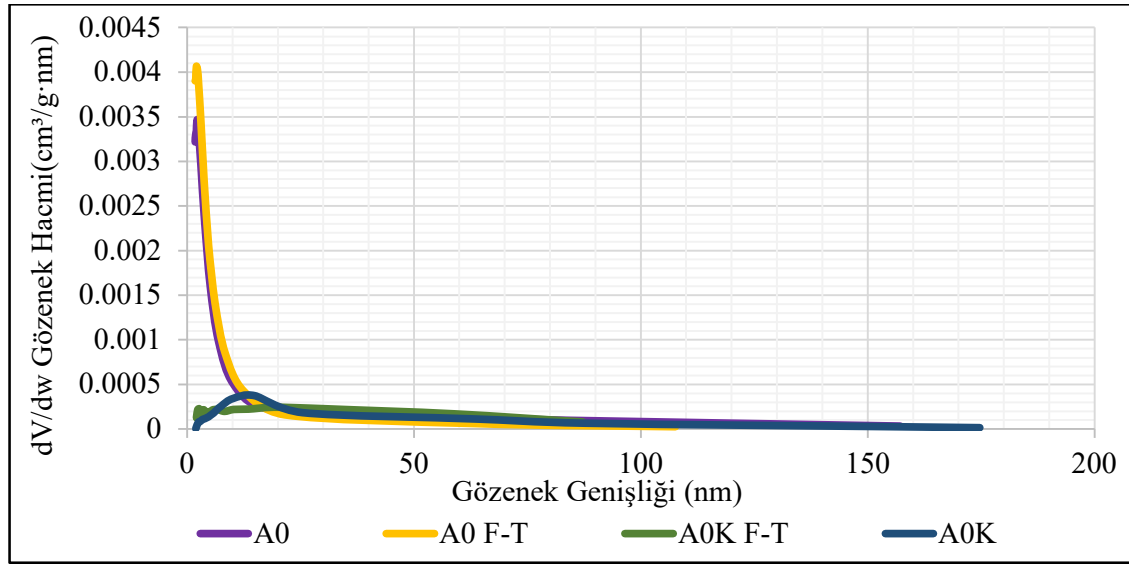
**Şekil 94.** Mukayeseli BET izotermi (a: donma-çözülme uygulanmayan numunelerde hava sürükleyici katkının BET izotermine etkisi. b: donma-çözülme uygulanan numunelerde hava sürükleyici katkının BET izotermine etkisi. c: kür katkılı ve donma-çözülme uygulanmayan numunelerde hava sürükleyici katkının BET izotermine etkisi. d: kür katkılı ve donma-çözülme uygulanan numunelerde hava sürükleyici katkının BET izotermine etkisi) (devam)

Şekil 94(a) grafiği donma-çözülmeye maruz kalmayan ve kür uygulanmayan numunelerde AEA miktarının BET izotermine etkisi gösterilmiştir. Görüldüğü üzere AEA içeren A1, A1,5 ve A2 numuneleri birbirine çok yakın ve A0 numunesinden oldukça farklı izoterm eğrisine sahip olmuştur. AEA içermeyen A0 grubunun diğerlerinden daha fazla gaz adsorblaması ilginç bulunmuştur.

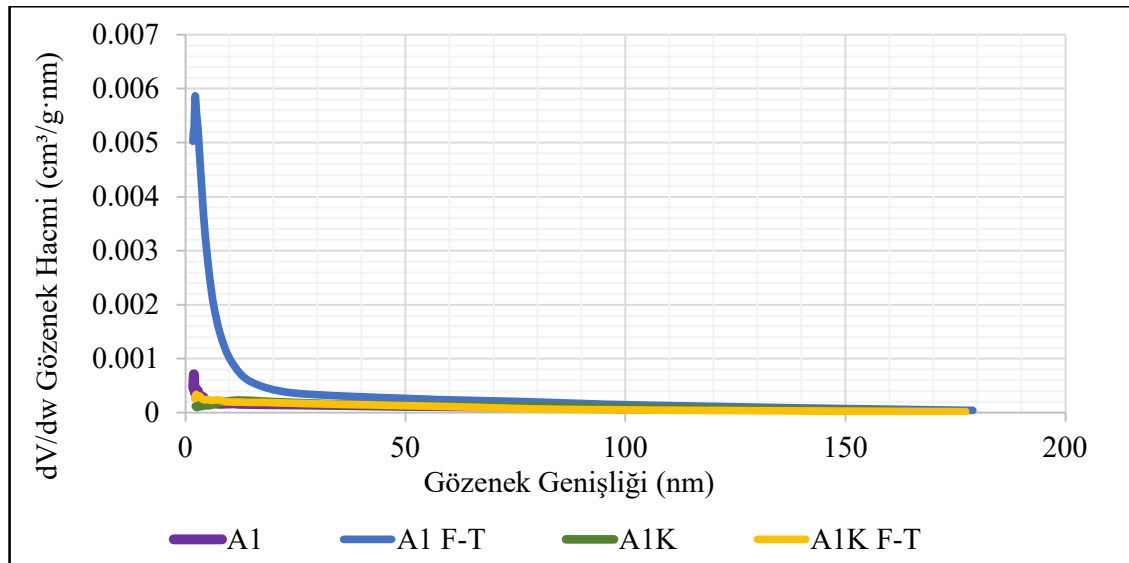
Şekil 94(b) grafiğinde ise yine kürsüz numunelerin donma-çözülmeye maruz kalması durumunda AEA etkisi belirtilmiştir. Donma-çözülme etkisinde tüm numuneler benzer izoterm eğrisi vermiş olmalarına rağmen yine de A1 F-T numunesinin diğer numunelerden bir miktar daha fazla gaz adsorblamış olduğunu belirtmek gerekir.

Şekil 94(c) grafiğinde donma-çözülmeye maruz kalmamış numunelerde kür katkısı ve AEA'nın BET izotermine etkisi gösterilmiştir. Görüldüğü üzere bütün numunelerin izotermi birbirine çok yakındır. Dolayısıyla kür katkısı boşluk miktarını AEA'dan daha fazla etkilemiştir denebilir. Ya da, AEA kullanılmayan A0 grubu ile değişik dozlarda kullanılan diğer üç grubun boşluk miktarları birbirine oldukça yakın olduğu söylenebilir. Şekil 94(d) grafiğinde ise donma-çözülme yapılmış numunelerde kür katkısı ve hava sürükleyici katkının BET izotermine etkisi gösterilmiş olup (c)'de olduğu gibi sonuçlar birbirine oldukça yakındır.

BET analizi uygulanan numunelerin boşluk boyut dağılımı (pore-size distribution) grafikleri Şekil 95 ve Şekil 96'da verilmiştir.

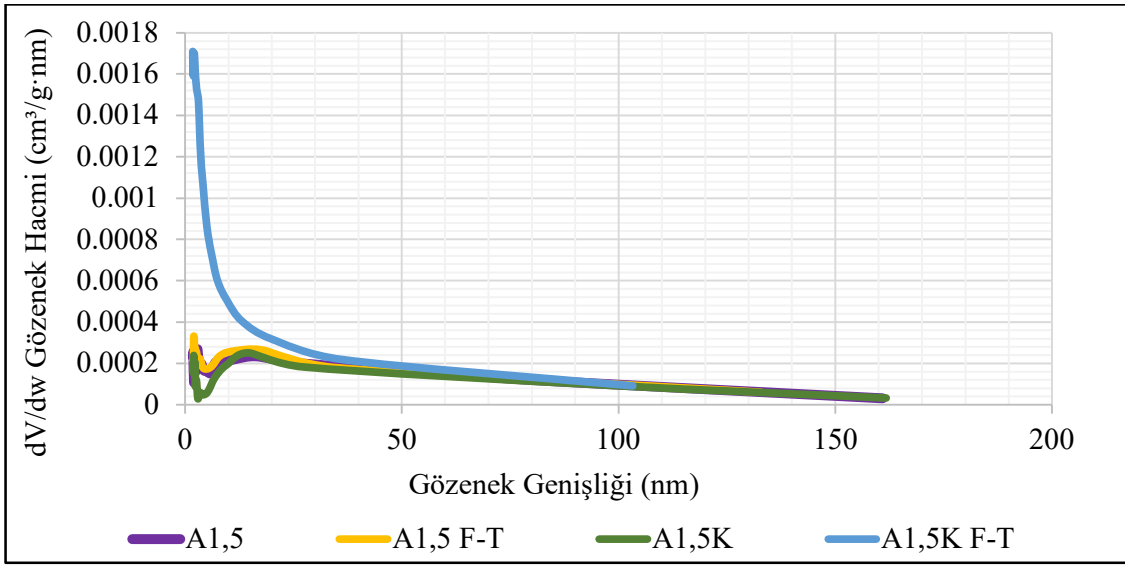


a

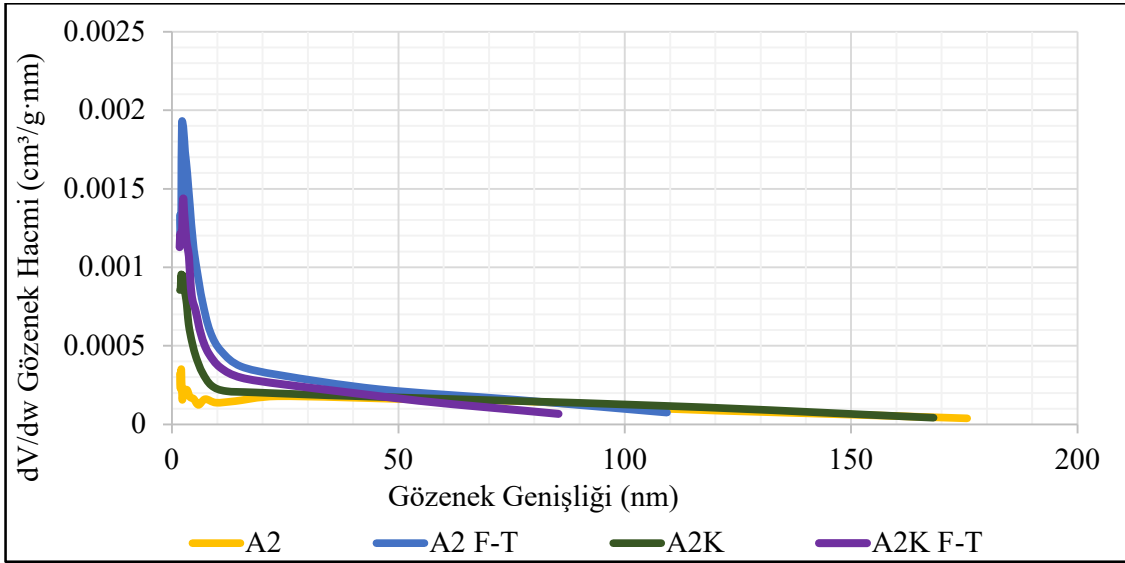


b

Şekil 95. BET analizi ile boyut boşluk dağılımı (a: A0, b: A1, c: A1,5 ve d: A2 grubu)



c



d

**Şekil 95.** BET analizi ile boyut boşluk dağılımı (a: A0, b: A1, c: A1,5 ve d: A2 grubu) (devam)

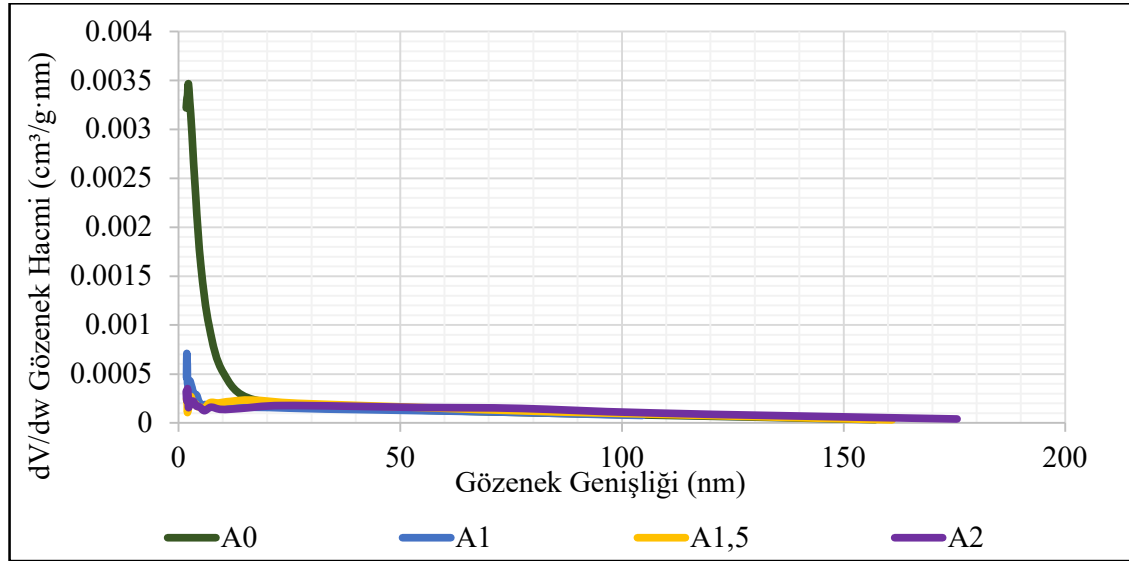
Şekil 95’da verilen grafiklerde görüldüğü üzere her bir numune grubunda bulunan her bir numune farklı özelliklerde boşluk boyut dağılımına sahiptir. Şekil 95(a) grafiği AEA içermeyen A0 grubu numunelerinden oluşmaktadır. Bu grubun izoterm eğrilerinde olduğu gibi A0 ve A0 F-T numuneleri kendi aralarında benzer, A0K ve A0K F-T numuneleri ise kendi aralarında benzer boşluk boyut dağılımına sahiptir. Bütün gruptaki numuneler ortalama 2 ila 100 nm arasında boşluk boyutlarına sahiptirler. A0 ve A0 F-T numunelerinin boşluk hacminin çoğunluğu 2-10 nm civarındadır. Fakat A0K ve A0K F-T numunelerinin boşluk boyut dağılımı grafiği herhangi bir noktada bariz bir pik yapmamıştır. Bu grupların boşlukları 2 ila 100 nm arasında dağılmıştır, denebilir.

Şekil 95(b) grafiği A1 grubunun boşluk boyut dağılımını temsil etmektedir. Yine izoterm eğrilerinde olduğu gibi yalnızca A1 F-T numunesi diğer numunelerden daha farklı bir boşluk boyut dağılımı eğrisine sahiptir. Bütün numunelerin boşluk boyutları yaklaşık 2nm ile 170 nm arasında dağılmıştır. Bu grup, A0 grubundan daha büyük bir boşluk boyut dağılımına sahiptir. A1 F-T numunesinin boşluk boyutlarının büyük çoğunluğu 2-10 nm arasında iken diğer numunelerin boşluk boyutları genel olarak homojen dağılmıştır.

Şekil 95(c) grafiği A1,5 grubunun boşluk boyut dağılımını temsil etmektedir. Grafikten görüldüğü üzere A1,5K F-T numunesi diğer üç numuneden farklı boşluk boyut dağılımı gösterirken diğer üç numune birbirine paralel bir dağılım sergilemiştir. A1,5K F-T numunesi yaklaşık 2 ile 100nm arası boşluklara sahiptir ve bu boşlukların çoğunluğu 2 nm civarındadır. Diğer üç numune ise yaklaşık 2 ile 150 nm arası boşluk boyutlarına sahiptirler ve bu numunelerin de boşluk boyutlarının çoğunluğu yaklaşık 10 nm civarındadır.

Şekil 95(d) grafiği ise A2 grubunun boşluk boyut dağılımını göstermektedir ve görüldüğü üzere bu gruptaki hemen hemen bütün numuneler aynı boşluk boyut dağılımını sergilemişlerdir. AEA'nın en fazla kullanıldığı bu grupta boşluk boyutları donma-çözölmeye uğramayan A2 ve A2K numunelerinde 2 ile 170 nm arasında değişmiş ve büyük çoğunluğu her iki numunedeki de 2 nm civarında olmuştur. Donma-çözölmeye etkisinde kalan A2 F-T ve A2K F-T numunelerinin boşluk boyutları ise 2 ile 100 nm arasında ve yine boşlukların büyük çoğunluğu 2nm boyutlarında olmuştur.

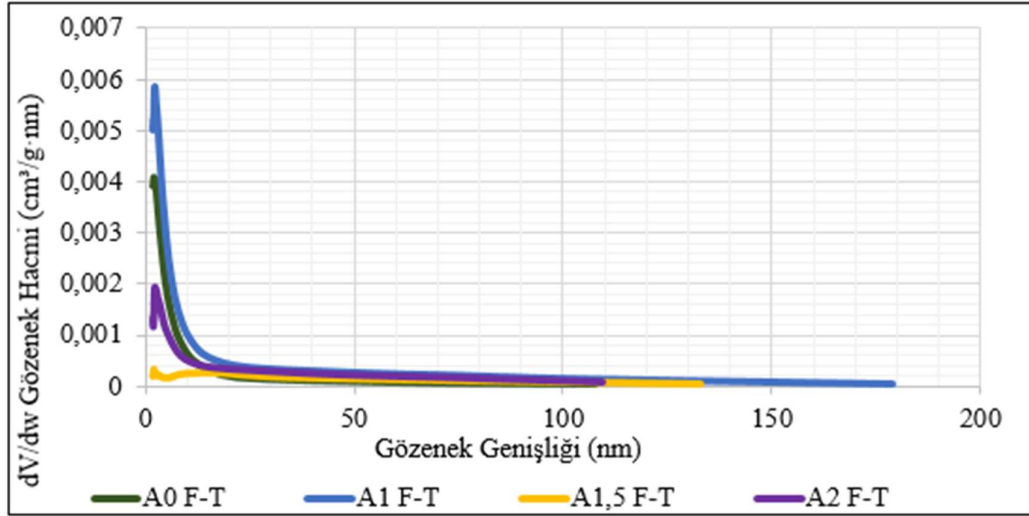
Şekil 96'de ise AEA, kür durumu ve donma-çözölmeye uğrayıp uğramama durumuna göre numunelerin boşluk boyut dağılımlarının karşılaştırılması yapılmıştır.



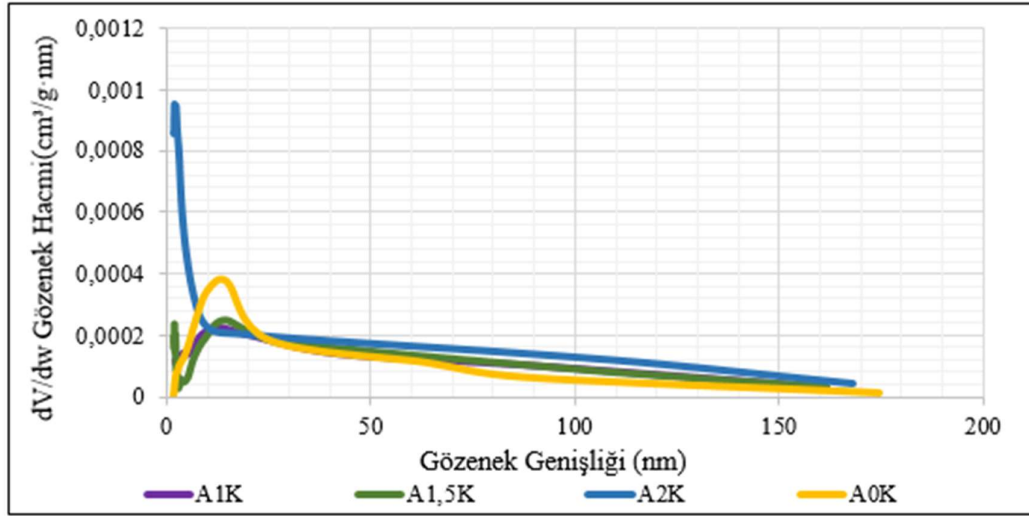
a

Şekil 96. Boşluk-boyut dağılımı üzerine hava sürükleyici katkının etkisi (a: donma-çözölmeye uygulanmayan, b: donma-çözölmeye uygulanan, c: kür katkılı ve donma-çözölmeye uygulanmayan, d: kür katkılı ve donma-çözölmeye uygulanan numuneler)

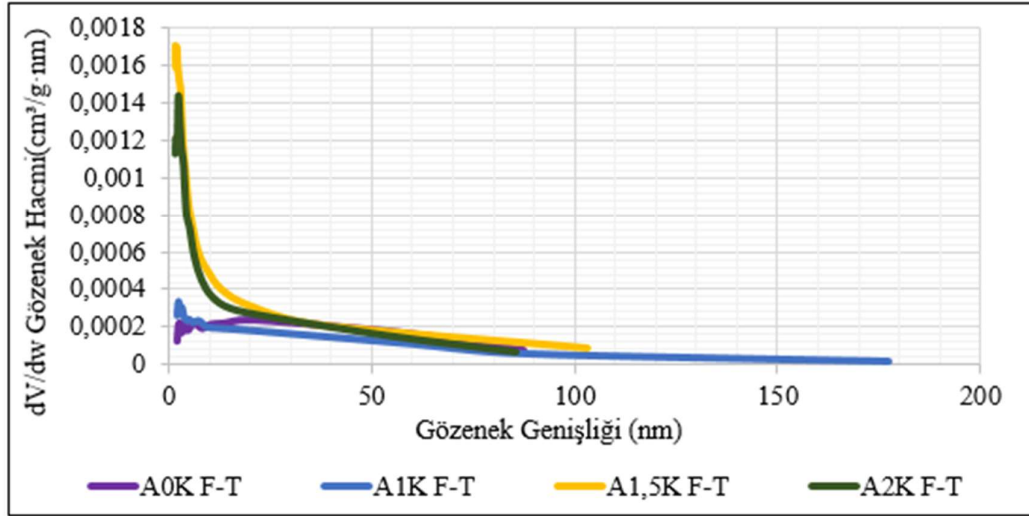




b



c



d

**Şekil 96.** Boşluk-boyut dağılımı üzerine hava sürükleyici katkının etkisi (a: donma-çözülme uygulanmayan, b: donma-çözülme uygulanan, c: kür katkılı ve donma-çözülme uygulanmayan, d: kür katkılı ve donma-çözülme uygulanan numuneler)

Şekil 96(a) grafiği kürsüz ve donma-çözülme uygulanmaksızın AEA'nın numunelerin boyut-boşluk dağılımına etkisi gösterilmiştir. Görüldüğü üzere A0 grubu 2-150 nm arası boşluk dağılımına sahiptir. Fakat büyük çoğunluğu 2-10 nm civarındadır. A1 grubu 2-100 nm arası dağılıma sahip olup çok büyük çoğunluğu 2 nm civarındadır. A1,5 grubu çoğunluğu 2-25 nm arası olmak üzere yaklaşık 2-150 nm arası, A2 grubu ise büyük çoğunluğu 2-100 nm arası ve neredeyse homojen olmak üzere yaklaşık 2-170 nm arası boşluk boyut dağılımına sahiptir. 2nm civarı en yüksek pik A0 numunesinde elde edilmiş ve numunenin boşluklarının büyük çoğunluğu bu değer civarında seyretmiştir. Dolayısıyla en küçük boşluk-boyut dağılımı beklendiği üzere bu numunededir. Sonraki gruplarda hava sürükleyici katkı oranına paralel olarak numunelerin boşluk boyutları artmış ve dağılımları homojenleşmiştir.

Şekil 96(b) grafiği AEA kullanımının donma-çözülme etkisindeki numunenin boşluk boyut-dağılımını nasıl değiştirdiğini göstermektedir. Şekil 96(a) grafiğinde A1 grubu yaklaşık 2-100 nm arası boşluklara sahipken donma-çözülme döngüleri sonucu bu aralık genişlemiş çoğunluğu 2-10 nm arası olmak üzere 2-170 nm arasına kadar ulaşmıştır. Dolayısıyla numunenin boşluk çapları genişlemiştir. A0 numunesini boşluk-boyut dağılımı 2-150 nm civarında iken 2-110 nm civarına kadar düşmüştür. Dolayısıyla donma-çözülme çevrimleri sürerken numune hidrasyonuna devam etmiştir. A2 grubu da A0 grubunda olduğu gibi donma-çözülme öncesi 2-170 nm arası bir dağılıma sahipken donma-çözülme sonrası 2-110 nm civarlarına kadar düşmüştür. Boşluk boyutları dolayısıyla yine bu grupta donma-çözülme çevrimlerinden çok etkilenmemiş, numune hidrasyonuna devam etmiştir. A1,5 grubunda boşlukların büyük çoğunluğu donma-çözülme öncesi olduğu gibi yine 25 nm boyutlarındadır ve diğer gruplarda olduğu gibi bu grupta da maksimum boyut 160 nm' dan 130 nm boyutuna kadar inmiştir.

Şekil 96(c) grafiğinde kür katkısının numunelerin boşluk-boyut dağılımını nasıl etkilediği gösterilmiştir. A2K grubu diğer gruplardan biraz daha farklı olarak boşluklarının büyük çoğunluğu 2-10 nm arasındadır. Diğer gruplar genel olarak 2-150 nm arasında homojen boşluk boyut dağılımına sahip olmuştur. Dolayısıyla kür katkısı hava sürükleyicinin en yüksek oranda kullanıldığı ve en fazla boşluk beklenen A2 grubunu olumlu etkilemiştir.

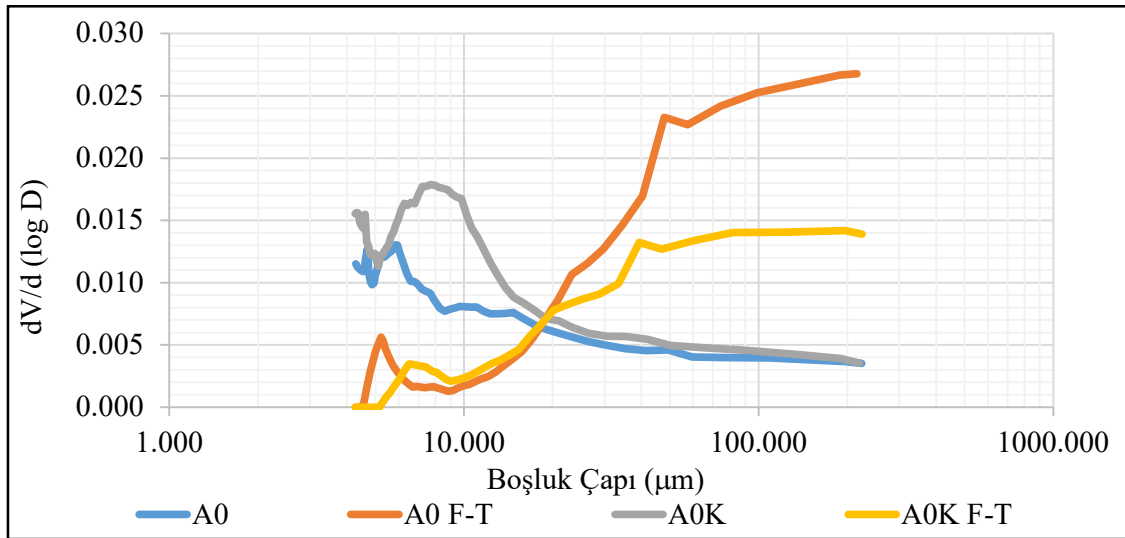
Şekil 96(d) grafiğinde kür katkısı ve donma-çözülme etkisinde numunelerin boşluk boyut-dağılımlarının nasıl değiştiği gösterilmiştir. Görüldüğü üzere A1K grubu boşlukları donma çözülme öncesi 2-150 nm boşluklara sahipken donma-çözülme sonrası boyutlar çok fazla değişmemiş bir miktar artarak 2-160 nm boyutlarına ulaşmıştır. Bu grup harici tüm grupların boşluk boyutları azalmıştır. 2-160 nm boyutlarından 2-100 nm boyutlarına kadar

inmiştir. Dolayısıyla numuneler hidrate olmaya devam etmiştir ve çevrimler boyunca ve kür katkısının da bu süreci olumlu etkilediği söylenebilir.

Grafikler her bir parametrenin nasıl etkilediğini göstermek için üst üste çizdirilmiştir dolayısıyla küçük detaylar fark edilememektedir. Bu yüzden BET analizinden elde edilen boşluk-boyut dağılımı grafikleri her bir numune için ayrı ayrı olmak üzere EK 2’de tekrar verilmiştir.

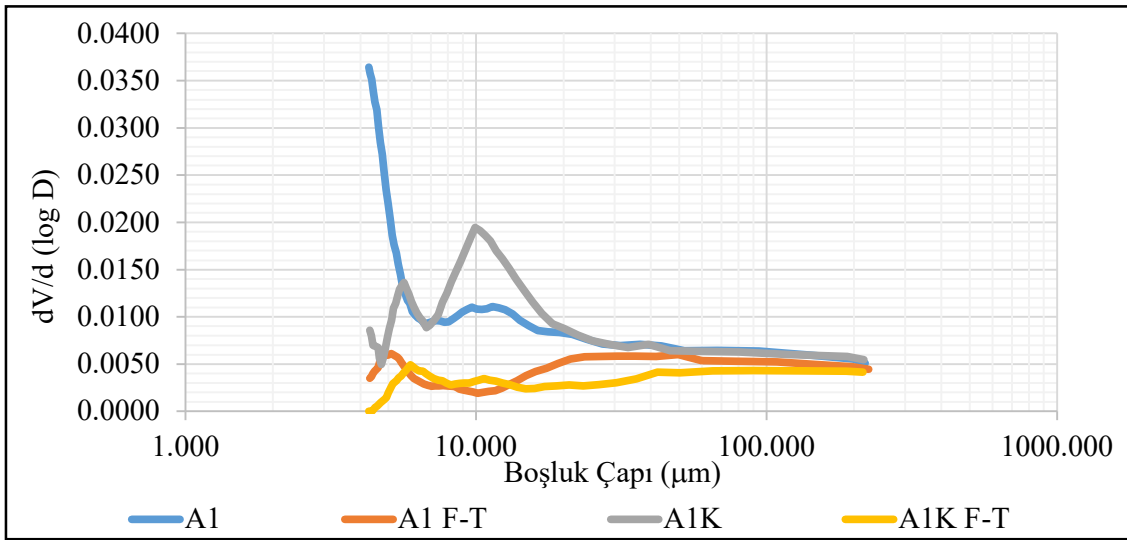
### Civalı porozimetre (MIP) deneyi sonuçları

Üretilen 3D beton numunelerin yaklaşık 2nm den 100 nm’ye kadar olan boşluk boyutları BET analizi ile belirlenmiş daha büyük gözenek boyutlarının belirlenmesi için de Civalı Porozimetre analizi yapılmıştır. Toplam boşluk ve ortalama boşluk çapının belirlenmesi için yapılan Civalı Porozimetre (MIP) deneyinde, deneysel veriler ölçüldükten ve doğrulandıktan sonra, gözenek yapısının ve donma-çözülme döngülerinin mezoskopik yapılar üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Deney sonucu elde edilen boyut-boşluk dağılım grafikleri Şekil 97’de verilmiştir. Grafiklerde dikey eksen  $dV/d(\log D)$  (kritik gözenek genişliği) olarak çizilmiştir. Burada D, giriş gözenek boyutu çapı; V ise betonun kuru birim ağırlığı cinsinden ifade edilen ve çapı D olan gözeneklerin hacmidir. Bu nedenle, belirli iki çap değeri ile sınırlanan alan, bu iki çap arasındaki gözeneklerin hacmini göstermektedir (Yukselen 2007).

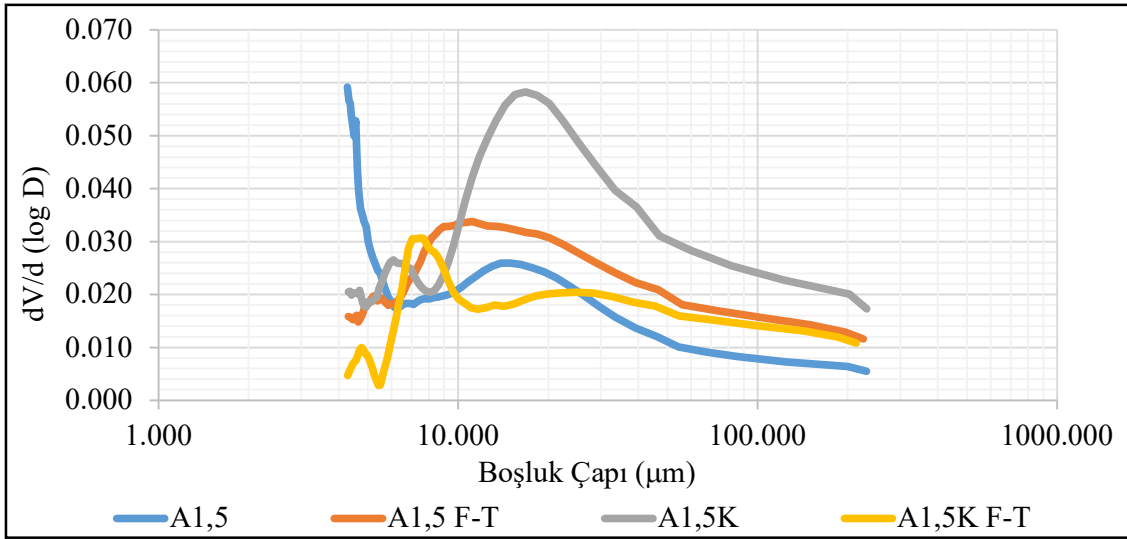


a

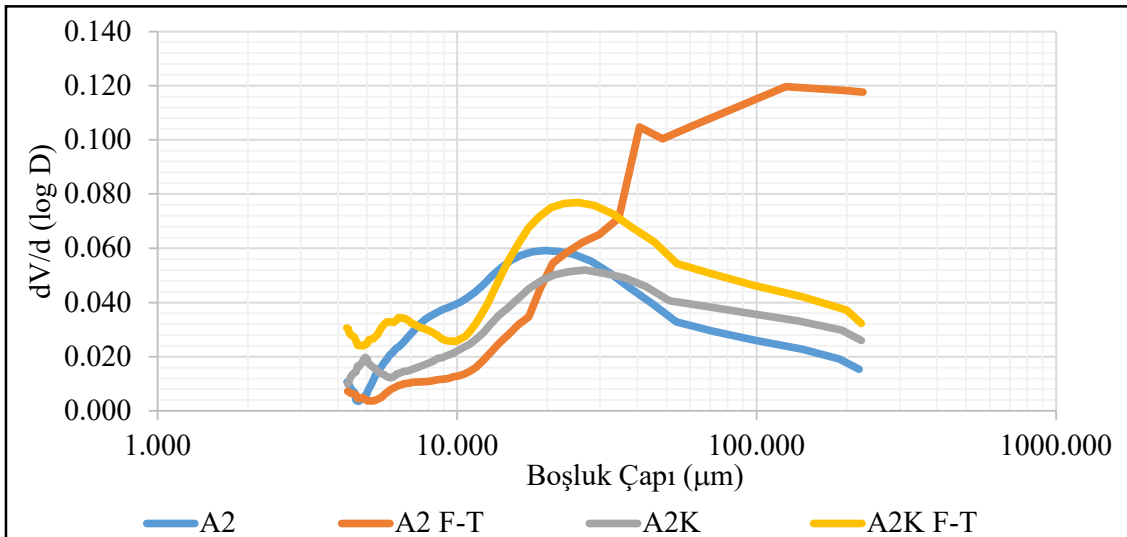
Şekil 97. MIP analizinden elde edilen boyut boşluk dağılım grafikleri



b



c



d

Şekil 97. MIP analizinden elde edilen boyut boşluk dağılım grafikleri (devam)

MIP analizi grafiklerinden görüldüğü üzere donma-çözülme işlemi hemen hemen tüm gruplarda boşluk-boyut dağılımı üzerinde oldukça etkili olmuştur.

Şekil 97(a) grafiği AEA katılmamış olan A0 grubunun MIP analiz sonuçlarını göstermektedir. Görüldüğü üzere donma-çözülme uygulanmayan A0 ve A0K numuneleri ile donma-çözülme uygulanan A0 F-T ve A0K F-T numunelerinin boşluk-boyut dağılımları birbirinden çok farklıdır. Düşük basınçta civa püskürtülerek uygulanan MIP analizinde bütün grup numunelerinin yaklaşık 5 ila 250  $\mu\text{m}$  arası boşluk boyutları belirlenmiştir. Donma-çözülme uygulanmayan A0 ve A0K numunelerinin boşluklarının büyük çoğunluğu 10  $\mu\text{m}$ ' lik boyutlara sahipken A0 F-T ve A0K F-T numunelerinin boşluklarının büyük kısmı yaklaşık 100  $\mu\text{m}$  boyutlarındadır. Dolayısıyla donma-çözülme işlemi numunelerin boşluk boyutlarının artmasına sebep olmuştur.

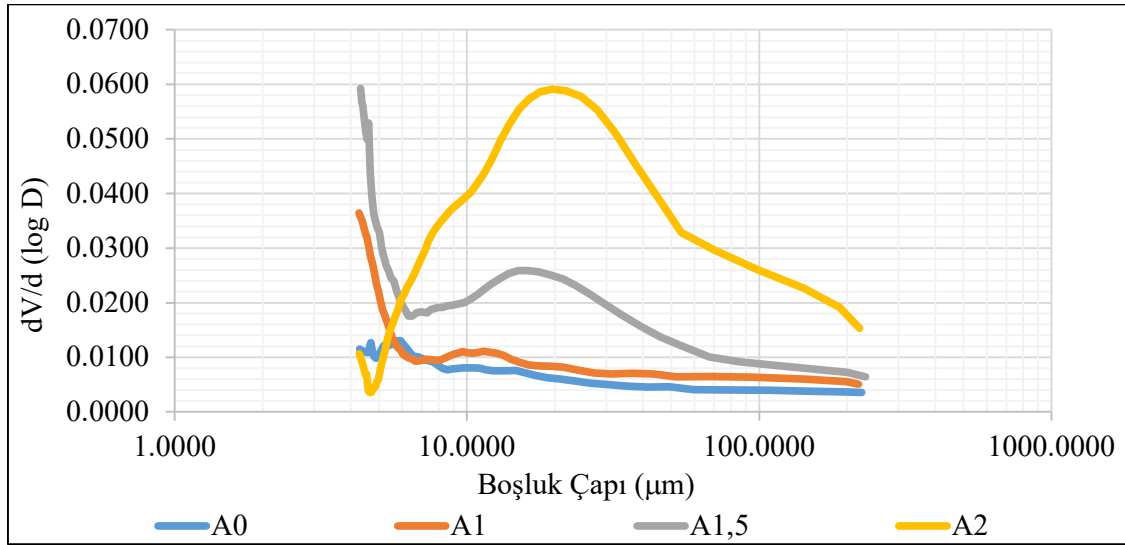
Şekil 97(b) grafiği AEA miktarının en az uygulandığı A1 grubunun MIP analiz sonuçlarını göstermektedir. Görüldüğü üzere A0 grubunda olduğu gibi donma-çözülme uygulanmayan A1 ve A1K numuneleri ile donma-çözülme uygulanan A1 F-T ve A1K F-T numunelerinin boşluk boyut dağılımları farklıdır. Fakat bu fark A0 grubundaki kadar değildir. A1 numunesinin boşluklarının büyük çoğunluğu 10  $\mu\text{m}$ ' den küçük boyutlarda, A1K numunesinin boşluklarının büyük çoğunluğu ise 10  $\mu\text{m}$  boyutlarındadır. A1 F-T ve A1K F-T numunelerinin boşlukları 5 ila 250  $\mu\text{m}$  arasında homojen dağılmıştır. Donma-çözülme uygulanmayan A1 ve A1K numuneleri, A1 F-T ve A1K F-T numunelerinden daha fazla civa adsorblamışlardır. Dolayısıyla AEA çok az miktarda kullanılmış olmasına rağmen beton numunelerin donma-çözülme hasarından etkilenmesine engel olmuştur. Numunelerin boşluk boyut dağılımları donma-çözülme çevrimlerine rağmen değişmemiştir.

Şekil 97(c) grafiği A1,5 grubunun MIP analiz sonuçlarını temsil etmektedir. Donma-çözülme uygulanan ve uygulanmayan numunelerin boşluk boyut dağılımları A0 ve A1 gruplarına göre daha az farklıdır. Yani AEA oranının artırılmasıyla numunelerin donma-çözülme hasarından etkilenme oranı azalmıştır. A1 grubunda olduğu gibi donma-çözülme uygulanmayan numuneler daha fazla civa adsorblamışlardır. A1,5 numunesinin boşluklarının büyük çoğunluğu 10  $\mu\text{m}$ ' den küçüktür. A1,5K, A1,5 F-T ve A1,5K F-T numunelerinin boşluklarının büyük çoğunluğu ise 20  $\mu\text{m}$  boyutlarındadır.

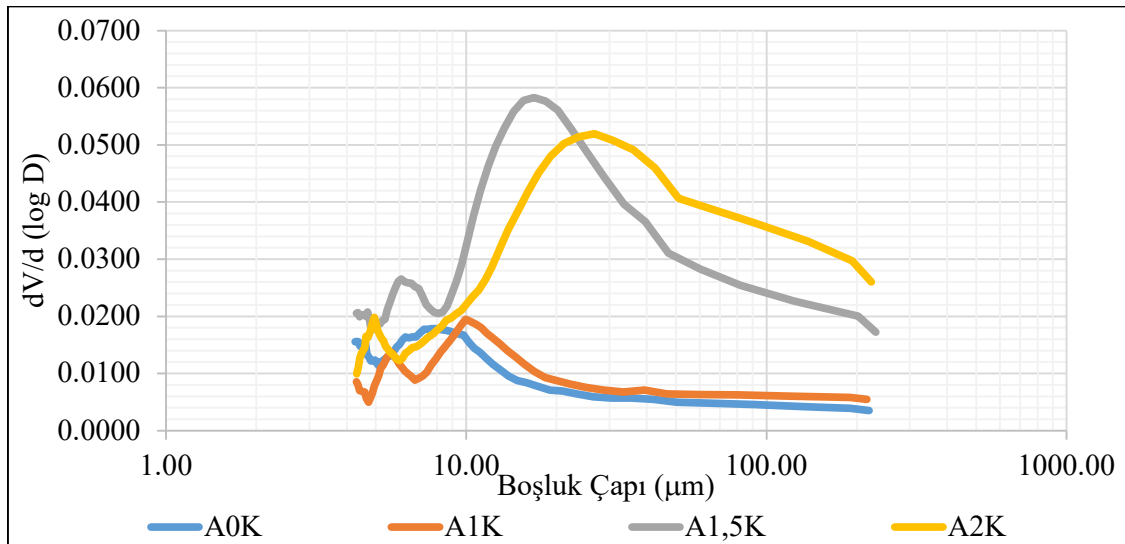
Şekil 97(d) grafiği A2 grubunun MIP analiz sonuçlarını göstermektedir. Grafikten görüleceği üzere hemen hemen bütün numunelerin boşluklarının çoğunluğu 20 ila 40  $\mu\text{m}$  arası boyutlardadır. Dolayısıyla en fazla oranda AEA katılan bu grupta boşluk dağılımı üzerinde AEA'nın etkisi çok büyüktür. A2 F-T numunesi en fazla civa adsorblayan numunedir. Bu

nedenle en fazla boşluk miktarının bu numunede olduğu söylenebilir. A2 F-T numunesi, A2 numunesinin 2 katından daha fazla boşluğa sahiptir, dolayısıyla, donma-çözülme çevrimleri numunenin boşluk miktarını artırmıştır. A2K F-T numunesi de A2K numunesine göre daha fazla boşluğa sahiptir dolayısıyla kürlü olan bu grup da donma-çözülme çevrimlerinden etkilenmiştir. Fakat kürsüz numunelere göre çok daha az boşluk hacimlerine sahip olduklarından kür katkısının numuneyi donma-çözülme hasarına karşı koruduğu sonucu çıkarılabilir.

AEA, kür malzemesi ve donma çözülme çevrimlerinin numunelerin boşluk boyutları üzerindeki etkisi ise Şekil 98’de verilen grafiklerde gösterilmiştir.

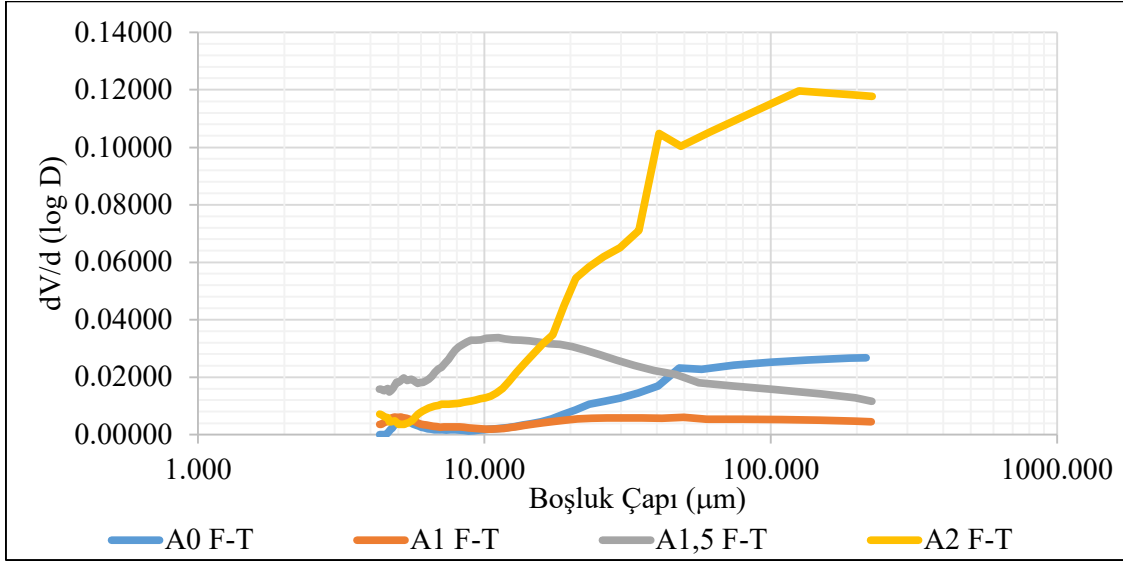


a

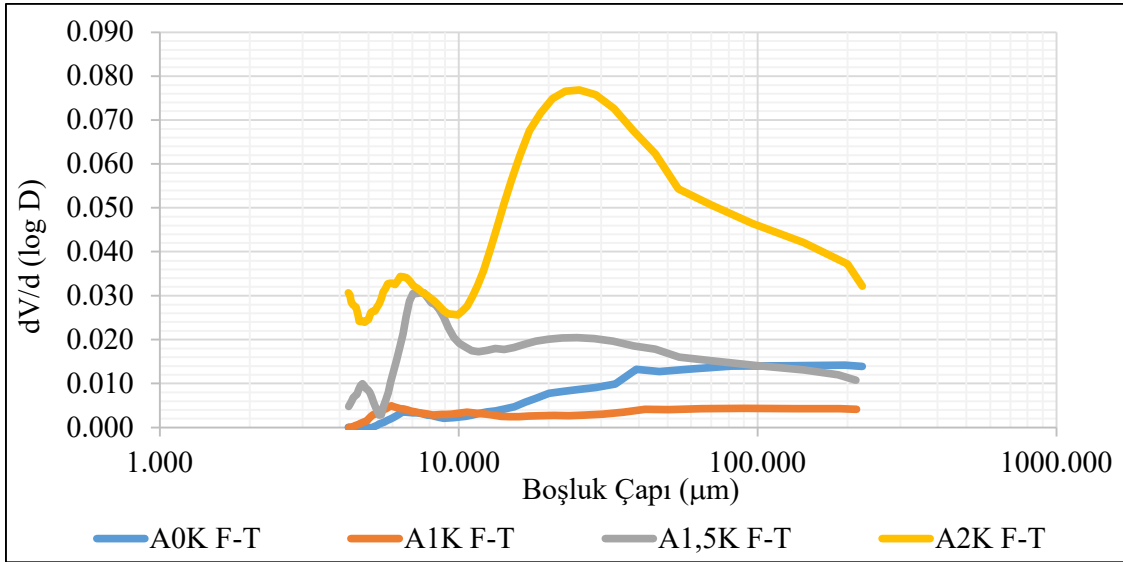


b

**Şekil 98.** Hava sürükleyici katkı etkisinin numunelerin boyut boşluk dağılımına etkisi (a: donma-çözülme uygulanmayan, b: donma-çözülme uygulanan, c: kür katkılı ve donma-çözülme uygulanmayan, d: kür katkılı ve donma-çözülme uygulanan numunelerde)



c



d

**Şekil 98.** Hava sürükleyici katkı etkisinin numunelerin boyut boşluk dağılımına etkisi (a: donma-çözülme uygulanmayan, b: donma-çözülme uygulanan, c: kür katkı ve donma-çözülme uygulanmayan, d: kür katkı ve donma-çözülme uygulanan numunelerde) (devam)

Şekil 98(a)'da verilen grafikten, beklendiği üzere, AEA miktarının artmasıyla numunelerdeki boşluk miktarının da arttığı görülmektedir. En düşük hacimde ve en küçük boyutlu boşluk miktarı (çoğunluğu 10µm' den daha küçük) A0 numunesinde oluşmuştur. Ardından boşluklarının çoğunluğu 10 µm civarında olan ve boşluk boyut dağılımı A0 numunesine benzeyen A1 numunesi gelmektedir. Daha sonra ise boşluklarının büyük çoğunluğu 40-50 µm civarında olan ve A0 ile A1 numunelerinin yaklaşık iki katı hacimde boşluk miktarına sahip olan A1,5 numunesi gelmektedir. Boşluk boyutlarının büyük çoğunluğu yine A1,5 numunesinde olduğu gibi 40-50 µm civarında olan fakat boşluk mktarı A1,5

numunesinin bile yaklaşık iki katı olan A2 numunesi gelmektedir. Dolayısıyla AEA miktarının çok küçük oranlarda bile olsa artışı numunenin hem boşluk çaplarını hem de boşluk miktarlarının çok fazla artışına sebep olduğu söylenebilir.

Şekil 98(b) grafiğinde kür uygulanan numunelere AEA oranının artışıyla numunelerin boşluk miktarlarının değişimi gösterilmiştir. En düşük miktarda ve boyutlarda boşluklar A0 numunesinde elde edilmiş sonra giderek artan bir şekilde A1, A1,5 ve A2 numuneleri gelmiştir. Fakat A1,5 ve A2 numunelerinde durum biraz daha farklı gelişmiştir. A1,5 numunesinin boşluk boyutlarının çoğunluğu 20 µm civarında A2 numunesinin boşluklarının büyük çoğunluğu 40 µm civarında ve boşluk miktarı A1,5 numunesinden bir miktar daha az olması ilginç bulunmuştur.

Şekil 98(c) grafiğinde donma-çözülme uygulanan numunelerde AEA oranı değişiminin numunelerin boşluk miktarına etkisi gösterilmiştir. Şekil 98(a) grafiği ile kıyaslanacak olursa, numunelere donma-çözülme uygulanmasıyla numunelerin boşluk miktarları ve boşluk-boyutlarının bir hayli değiştiği görülecektir. Yine en düşük miktarda boşluk miktarı A0 F-T ve A1 F-T numunelerinde elde edilmiş fakat boşluk boyutlarının çoğunluğu artık 10 µm civarında değil 80-90 µm civarına kadar yükselmiştir. A1,5 numunesinde A0 F-T ve A1 F-T numunelerinin yaklaşık iki katı kadar boşluk elde edilmiştir. A2 F-T numunesinde ise diğer numunelerinin hepsinin toplamından bile fazla miktarda boşluk miktarı ve boyutu elde edilmiştir. Beklendiği üzere numunelere donma-çözülme uygulanması numunelerin boşluk miktarlarını ve boyutlarını artırmıştır. AEA oranının artmasıyla da bu artış daha fazla olmuştur.

Şekil 98(d) grafiğinde kür işlemi uygulanan numunelere donma-çözülme uygulanması durumunda boşluk-boyut dağılımlarının değişimi gösterilmiştir. Bütün numunelerin boşluk miktarları bir miktar daha azalmıştır. Dolayısıyla kür malzemesi donma-çözülme etkisine karşı numunelerin direnç kazanmasını sağlamıştır. Yine en fazla miktar ve boyutlarda boşluk A2 numunesinde elde edilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde Li et. al. (2017) yapmış oldukları çalışmada, 300 çevrime kadar hızlı donma-çözülme deneyine tabi tutulan numunelerin gözeneklerinin hacimlerini ve boyutunu belirlemek için cıva intrüzyon porozimetrisi (MIP) ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizi gerçekleştirmişlerdir. Boşluk-boyutu dağılımının farklı sayıda donma-çözülme döngüsü ile varyasyonları, gözenek boyutu dağılım eğrilerinden elde edilmiştir. Farklı sayıda donma-çözülme döngüsü ile betonun gözenek, gözeneklilik, mod gözenek boyutu ve kritik gözenek boyutunun hacim yüzdeleri çevrim sayısı arttıkça giderek artmıştır. 300 döngüden sonra betonun mod gözenek boyutlarını gösteren MIP eğrilerinin maksimum değerleri 40 nm'den 55 nm'ye çıkmıştır. Bu artış, betonun gözenek



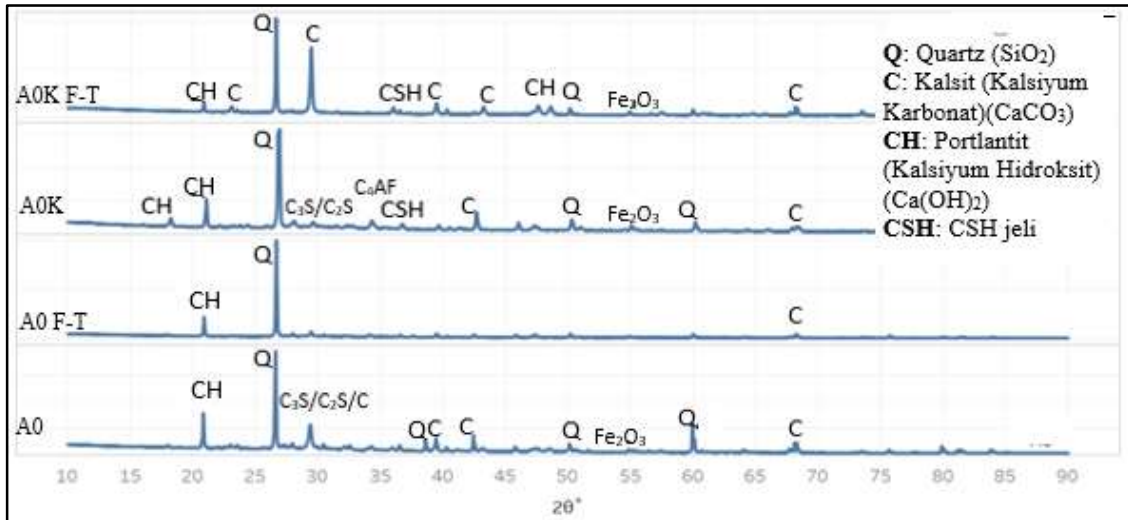
yapılarının değiştiği ve genişleyerek kararsız hale geldiği anlamına gelmektedir. Gözenek çaplarının hacim yüzdeleri önemli ölçüde artmıştır. Gözeneklilik, mod gözenek çapı ve kritik gözenek çapı gibi karakteristik gözenek parametreleri de artan sayıda donma-çözülme döngüsü ile değişmiştir. Özetle, tekrarlanan donma-çözülme döngüleri betonda önemli mikroskobik hasara ve gözenekli yapıların genişlemesine neden olmuştur.

Putten et al. (2018) yaptıkları araştırmada, baskı sürecini simüle etmek için özel yapım bir 3D baskı aparatı kullanmışlardır. 0, 10 ve 60 dakikalık gecikme süreli (sonraki katmanların yazdırılması arasındaki süre) katmanlı numuneler iki farklı baskı hızıyla (1,7 cm/sn ve 3 cm/sn) basılmıştır. Sıkıştırma ve katmanlar arası aderans mukavemeti dahil olmak üzere mekanik özellik deneyleri yanı sıra gözenek boyutu ve gözenek boyutu dağılımı üzerindeki etkisi, civalı porozimetre (MIP) analizleri gerçekleştirilerek ölçülmüştür. Örnekler 7 gün süreyle dondurulup çözdürüldükten sonra üst, alt ve orta bölgelerinden alınan numunelerde her seri için MIP analizi yapılmıştır. Tabakalar arası zaman farkı ve baskılama hızı arttıkça elemanların gözenekliliği artan bir eğilim göstermiş, basılı malzeme içinde daha büyük boşluklar ve gözenekler oluşturmuştur.

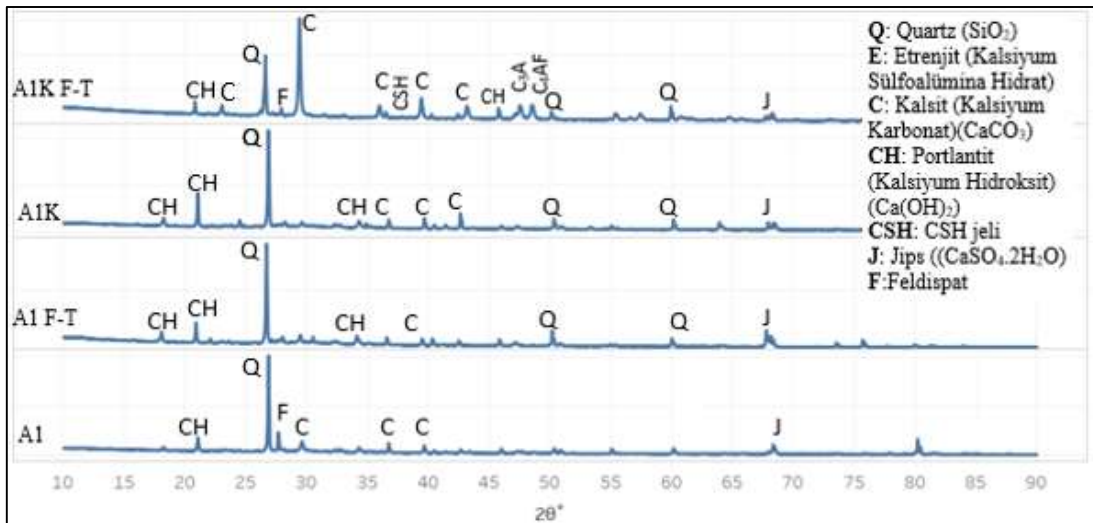
Mindess et al. (2003), kapiler boşluk sistemi için MIP yönteminin, mezo ve mikro boşluklar ile jel boşluk sisteminin analizinde ise BET'in daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Moon et al. (2006) ise betonda BET ile 1-3 nm arasındaki, MIP ile 3 nm–30 µm arasındaki, elektron mikroskobu ile de 30 µm–1 mm arasındaki boşlukların dağılımının belirlenebileceğini bildirmiştir. Bu doktora tez çalışmasında da birkaç nanometreden birkaç yüz mikrometreye değişen boşluk-boyut dağılımını ve çimento esaslı malzemelerin toplam porozitesinin ölçülebildiği MIP analizi kullanılarak donma-çözülme işlemleri boyunca değişen boşluk yapısı incelenmiştir. BET ve MIP analizi sonuçları ve literatür çalışmaları dikkate alındığında hava sürükleyici miktarının artması ve numunelerin donma-çözölmeye uğramasıyla boşluk boyutlarının arttığının tespit edilmiştir.

### **X-ışını kırınımı (XRD) analizi sonuçları**

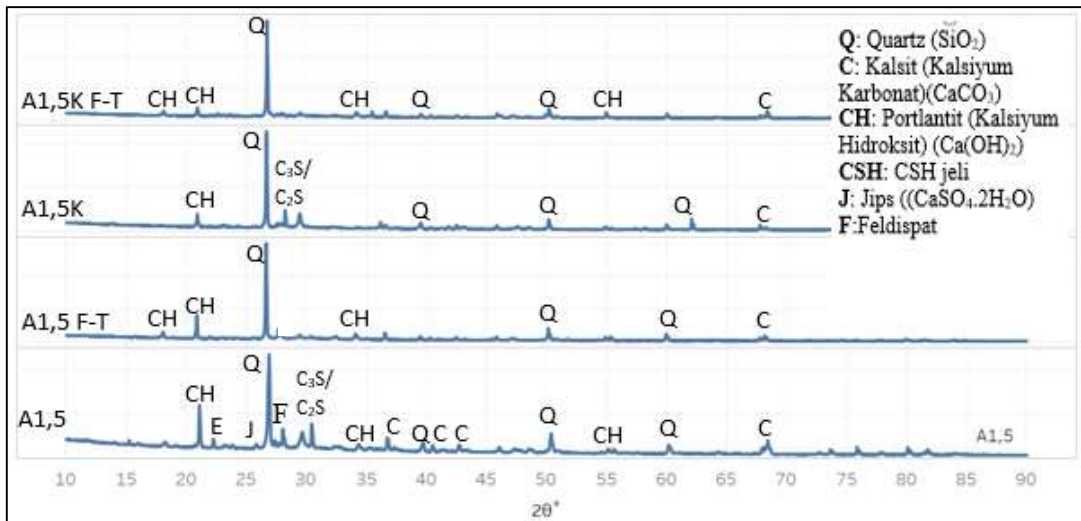
Numunelerin içeriği aynı olmak kaydıyla donma-çözölme öncesi ve sonrası XRD analizinden elde edilen kristalografik grafikler Şekil 99'da verilmiştir.



a

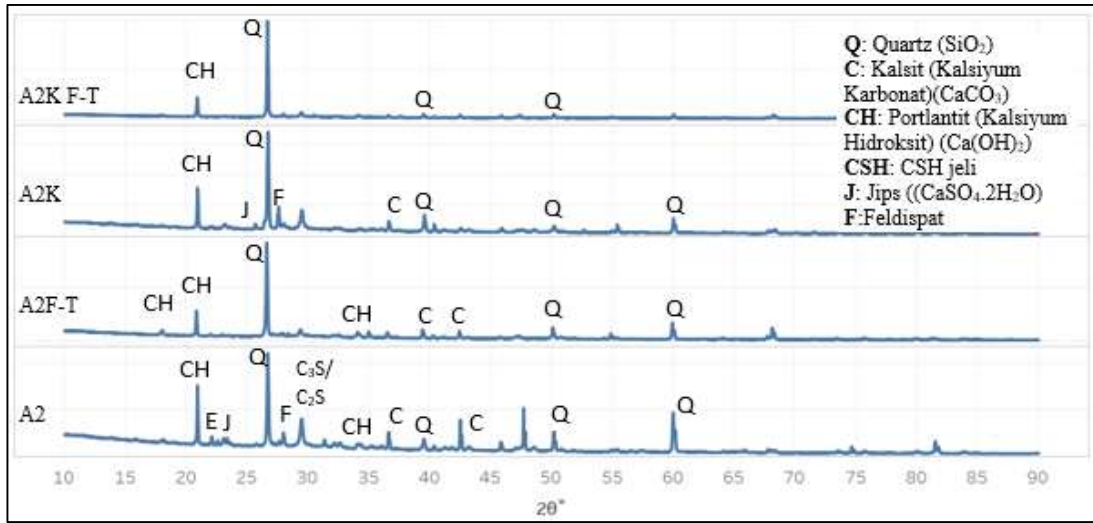


b



c

Şekil 99. Numunler üzerinden alınan XRD grafikleri ( a: A0, b: A1, c: A1,5, d: A2)



d

Şekil 99. Numunler üzerinden alınan XRD grafikleri ( a: A0, b: A1, c: A1,5, d: A2) (devam)

Şekil 99 a, b, c ve d’de verilen sırasıyla A0, A1, A1,5 ve A2 grubu numunelerinin XRD analiz sonuçları incelendiğinde genel itibariyle bütün gruplarda Quartz (SiO<sub>2</sub>), Kalsit (Kalsiyum Karbonat, CaCO<sub>3</sub>), Portlantit (Kalsiyum Hidroksit, Ca(OH)<sub>2</sub>), CSH jeli, Jips (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), Etrenjit (Kalsiyum Sülfoalümina Hidrat), Feldispat gibi agrega, çimento, cüruf ve kil fazlarından gelen temel bileşiklerin pikleri görülmüştür.

Şekil 99(a) AEA katılmayan A0 grubu XRD analiz sonuçlarını göstermektedir. A0 numunesi ile donma çözülme uygulanan A0 F-T numunesi içerik olarak aynı olmasına rağmen A0 F-T numunesinde pik şiddetleri azalmıştır yani numune içerisinde kristalografik yapı bozunarak daha amorf bir yapı oluşmuştur. Kürlü numunelerde ise bu değişim pek fark edilebilir nitelikte olmamıştır. A0K ve A0K F-T numunelerinin pikleri hemen hemen aynıdır. Bu numune grubunda istisnai olarak A0K F-T numunesinde diğer numunelerden farklı olarak yaklaşık 29,40 derecelik 2θ açısında C(kalsit) piki görülmüştür.

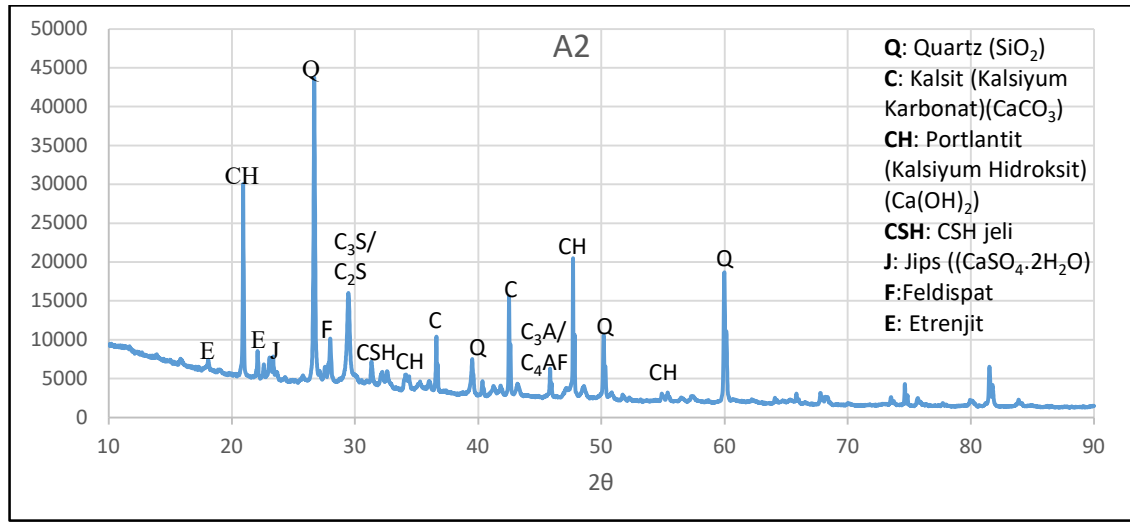
Şekil 99(b) A1 grubu numunelerin XRD analiz sonuçlarını göstermektedir. Bu grafikte yaklaşık 27 derece 2θ açısında kilden geldiği düşünülen Feldispat bileşiği elde edilmiştir. Yine bu grupta da donma-çözülme uygulanan numunelerin pik şiddetleri azalmıştır.

Şekil 99(c) A1,5 grubunun XRD analizine aittir. Bu grupta diğer A0 ve A1 grubundan farklı olarak kürsüz ve donma-çözülme uygulanmayan A1,5 numunesinde yaklaşık 22,9 derecelik 2θ açısında Etrenjit piki elde edilmiştir. Fakat bu grubun diğer kürlü ve donma-çözülme maruz kalan numunelerinde bu pik görülmemiştir. A1,5 numunesi üretildikten sonra laboratuvar ortamında bekletilmiş herhangi bir kür işlemi görmemiştir. Dolayısıyla çimentonun prizi esnasında ortaya çıkan Etrenjit kristalinin varlığını korumuş olabileceği değerlendirilmektedir. Diğer numunelerde ise gerek kür katkısı yardımıyla gerekse de çözülme

işleminin suda gerçekleşmesi nedeniyle kür etkisi oluşmasından dolayı numune içerisindeki hidratasyon devam etmiştir ve etrenjit pikinin bu yüzden görülmediği düşünülmektedir.

Şekil 99(d) AEA miktarının en fazla olduğu A2 grubunun XRD analiz sonuçlarını temsil etmektedir. Bu grupta diğer gruplardan daha belirgin olarak A2 F-T ve A2K F-T numunelerinde Portlantit, Kalsit ve Quartzdan başka neredeyse hiç pik elde edilememiştir. Yine bu grupta da kürsüz ve donma-çözülme geçirmeyen A2 numunesinde etrenjit piki elde edilmiştir.

Yuakırda verilen difraktogramlarda birden fazla grafiğin üst üste gösterilmesi nedeniyle kristal pikleri net ayırt edilememektedir. Bu nedenle Şekil' 100 de A2 numunesinin XRD analiz sonuçları tek başına verilmiştir.

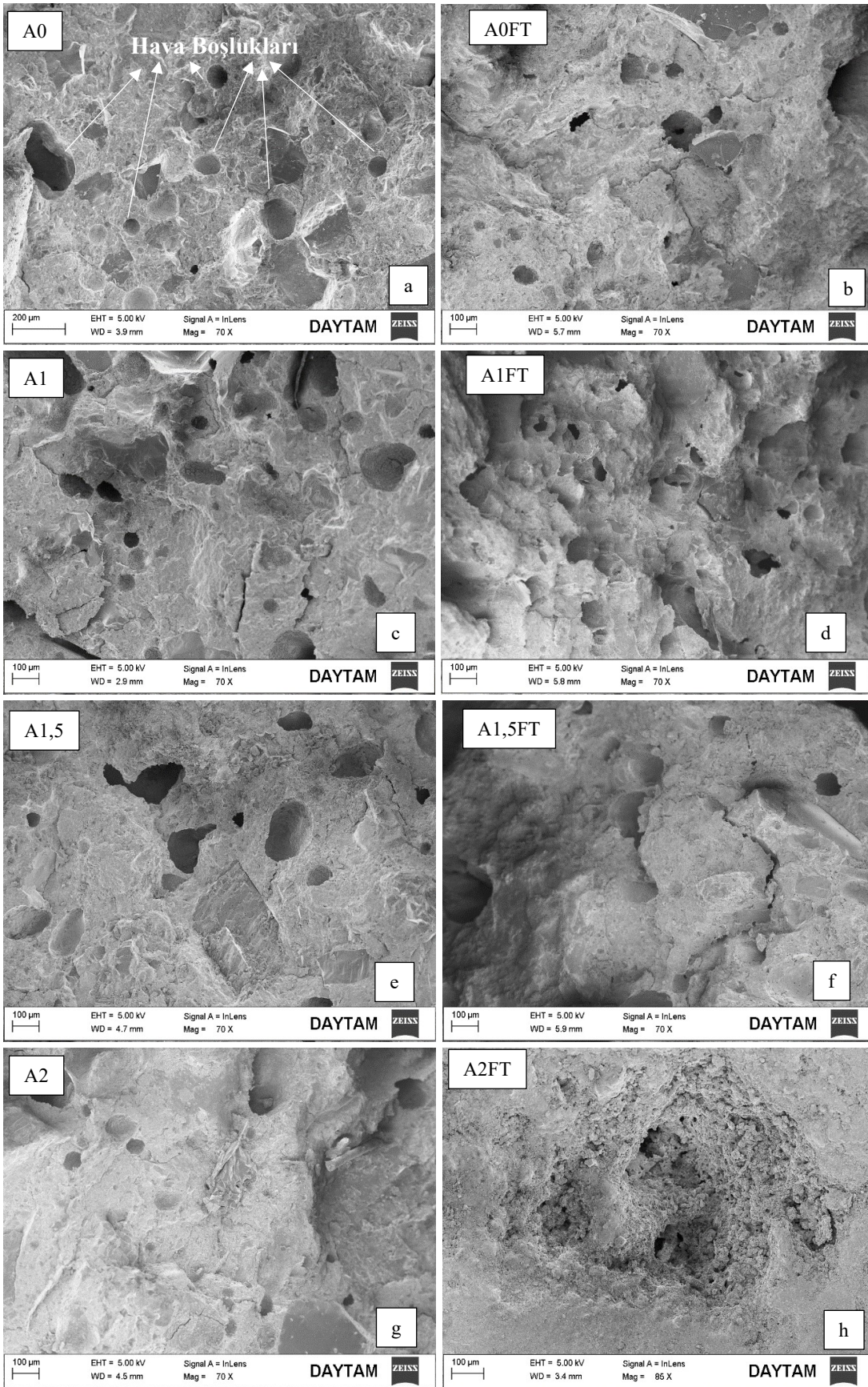


**Şekil 100.** A2 numunesinin XRD analiz sonucu

Şekil 100 de verilen grafik incelendiğinde oluşan etrenjit pikleri daha net bir biçimde görülecektir. XRD neticesinde ortaya çıkan kristal yapılar SEM analizi ile gözlenmeye çalışılmıştır.

### **Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleme sonuçları**

Üretildikleri tarihten itibaren yaklaşık 11 aylık (335 gün) olan, kür uygulanmayan donma-çözülme deneyi geçirmemiş A0, A1, A1,5 ve A2 numuneleri ile donma-çözülme maruz kalan A0FT, A1FT, A1,5FT ve A2FT numunelerine ait SEM görüntüleri Şekil 101 ve 102 de verilmiştir. Daha çok yüzeyde oluşan karbonasyon etkilerinden olabildiğince kurtulunmak için SEM numuneleri beton elemanların iç kısımlarından alınmıştır.



Şekil 101. Bütün numunelerin hava boşluk dağılımının SEM görüntüleri.

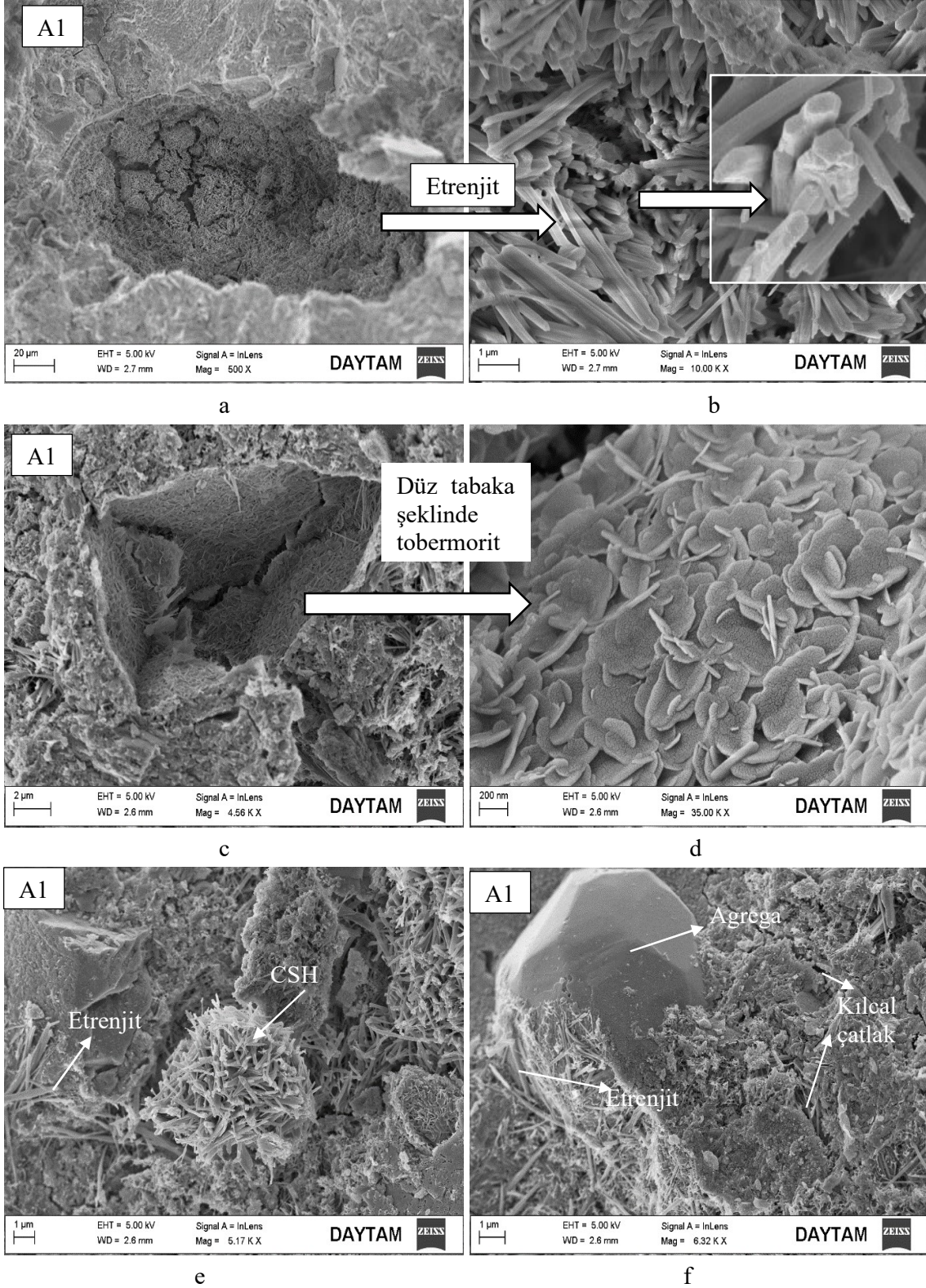
Şekil 101'den AEA içermeyen A0 grubu da dahil bütün numunelerin sürüklenmiş hava boşluklarına sahip olduğu görülmektedir. Öyleki, Şekil 101 (a)'dan görüldüğü ve önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, kullanılan çok fazla sayıda ve değişik karakterli kimyasal katkıların etkisiyle hava sürükleyici katkı içermeyen A0 grubu 3D beton numuneleri de küresel ve bağımsız hava boşluklarına sahip olmuşlardır. Bu nedenle bu grup da AEA katılan diğer gruplar kadar donma-çözülme etkilerine direnmiştir.

A1,5 ve A2 grubu oldukça fazla hasara uğrarken A1 grubundaki örneklerin donma-çözülme etkisine karşı direnci genelde daha yüksek çıkmıştır. Öyleki, A1 grubu numunelerinde donma-çözülme çevimleri sonucu oluşan yüzeysel ufalanmalar en azdır. Şekil 101 (c ve d)'de verilen A1 grubunda alıp SEM görüntüleri A1,5 ve A2 gruplarından alınan SEM görüntüleri ile karşılaştırıldığında, A1 grubunun daha fazla boşluğa sahip olduğu görülmektedir. Bu tespit, A1,5 ve A2 gruplarında hava sürüklenme işlemlerinin amaçlandığı şekilde gerçekleşmediği kanaatinin oluşmasına neden olmuştur. Yani, dozaj artışına paralel düzeyde kompozit içerisine sürüklenen hava miktarı artmamıştır. Bu da A1 grubunun donma-çözülme direncinin A1,5 ve A2 grubuna göre daha yüksek çıkmasına yol açmıştır. Elde edilen bu bulgular da donma-çözülme çevrimlerine dirençli 3D beton tasarımı ve üretimi için %0,1 oranında hava sürükleyici katkı kullanımının tavsiye edilmesine katkıda bulunmuştur.

Numunelerin hava boşluklarının iç yapıları, çimento hidrasyon ürünleri, lif ve agrega gibi yapıları içeren SEM görüntüleri Şekil 102'de verilmiştir. Bütün görüntülerde farklılık oluşmaması için tek bir numuneden (A1) elde edilen bulgular gösterilmiştir. Fakat diğer tüm grup numunelerinde benzer kristal formları ve yapıları görüntülenmiştir. Örneğin bütün numunelerde hava gözenekleri içerisinde etrenjit görüntüleri elde edilmiştir.

Şekil 102a ve b'de hava boşluklarının duvarlarında oluşan etrenjit gösterilmiştir. Bütün numunelerin bütün hava boşluklarında aynı oluşumlar gözlemlenmiştir. Etrenjit kristalleri yalnızca sürüklenmiş hava boşluklarında değil bazı çatlaklarda da gözlemlenmiştir.

Diamond (1996)' a göre, sürüklenmiş hava boşluklarının etrenjit tarafından tamamen doldurulması, donma-çözülme döngüleri sırasında betonun donma hasarını önlemede boşluk etkinliğinin kaybına neden olabilir. Boşlukların etrenjit ile doldurulması veya kapatılması sürüklenmiş hava boşluklarına erişimi engeller ve buz genişmesi çatlama neden olur. Ancak tüm hava boşluklarının etrenjit ile dolması nadiren olmaktadır.

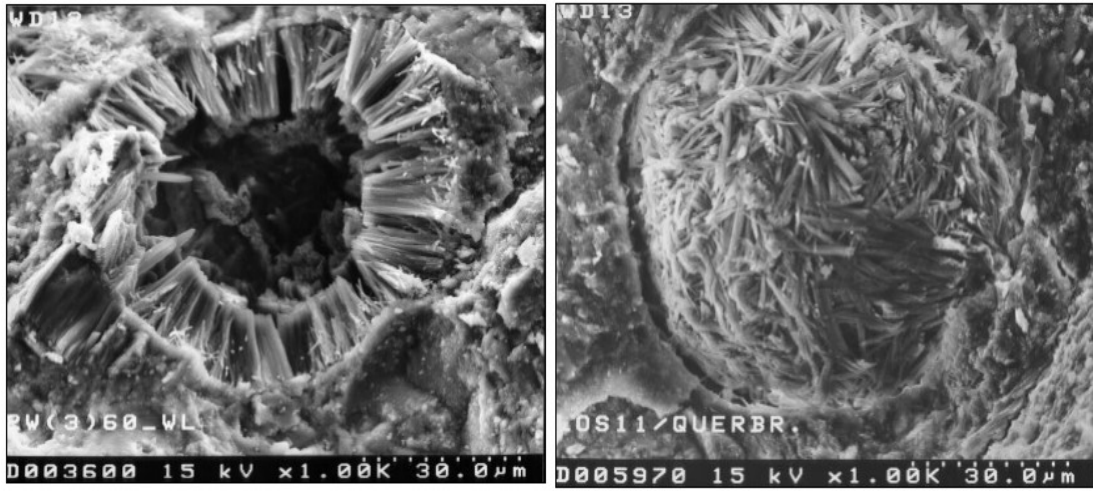


**Şekil 102.** a: hava gözenekleri içinde etrenjit oluşumu, b: oluşan etrenjitlerin yakın görünümü, c: Numunede gözlemlenen düz plaka şeklindeki tobermorit görünümü, d: tobermoritin yakın plan görüntüsü, e: bazı hidrasyon ürünlerinin görüntüsü, f: üretilen beton numunelerin agrega ve çimento hamuru iç yapılarının görünümü.

Lee et al. (2005) Iowa otoyolları betonlarını inceledikleri çalışmada hemen hemen tüm betonların yaklaşık %6 hacminde sürüklenmiş hava boşluğu, bu boşluklarının da etrenjit ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$ ) oluşumları içerdiğini belirtmişlerdir. İncelenen yol betonu örneklerinde, hava sürüklenen boşluk duvarlarından çıkıntı yapan iğnemsî kristaller olarak iki etrenjit formu oluşmuştur. İlk form, çapı  $<100\ \mu\text{m}$  olan daha küçük olan ve sürüklenen hava boşluklarını tamamen dolduran “boşluk doldurma” etrenjiti olarak adlandırılmışken ikinci form, boşlukların iç kenarları etrafında oluşan ve daha iri kristallerden oluşan "boşluk kenarı" etrenjiti olarak isimlendirilmiştir. Bu tip etrenjitin çapı genellikle  $100\ \mu\text{m}$ 'den büyüktür. Hem boşluk dolgusu hem de boşluk kenarı etrenjitlerindeki çatlakların bir kısmı çimento hamurunun içinde de devam etmiştir. İki tip etrenjitin oluşumu, boşluğun boyutuna ve boşluklardan geçen etrenjit oluşturan gözenek çözeltilerinin miktarına bağlanmıştır. Bu nedenle, etrenjitin boşluğu doldurma derecesi esas olarak boşluk boyutuna ve zamanına bağlanmıştır. Bazı bölgelerde etrenjit ayrıca çimento hamurundaki mikroskobik gözenekleri de doldurmuştur. Küçük boyuttan dolayı, interstisyel (çatlak oluşturan) etrenjit yalnızca yüksek büyütmele geri saçılmış elektronlu (backscattered elektrons) SEM görüntülerinde gözlemlenmiştir. Ancak, nadiren de olsa etrenjit, hamur ile ince kuvars agregası parçacıkları arasındaki sınır boyunca oluşan çatlaklarda da oluşmuştur. Araştırmacılar, tipik olarak sürüklenmiş hava boşluklarındaki etrenjit büyümesinin boşluk alanı kaybına neden olduğunu belirtmişlerdir.

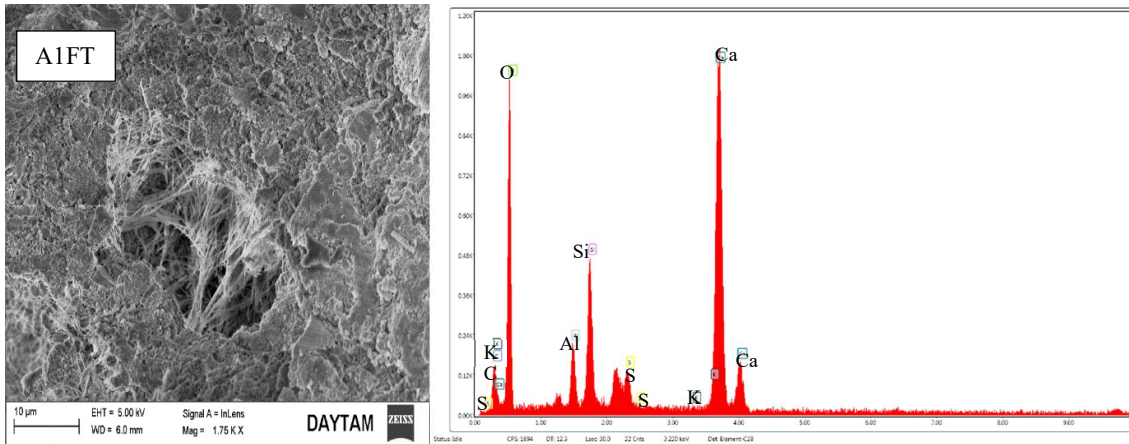
Stark and Bollmann (2000) beton yapısının gözenek, çatlak ve zayıf kısımlarında yüksek pH değerlerinde oluşan etrenjitin büyük olasılıkla nemli bir betonun gözenek sıvısında yavaş yavaş çözünüp ve yeniden kristalleştığını savunmuşlardır. Kapiler çatlaklarda gerçekleşen taşıma işlemleri, agrega ve sertleşmiş çimento hamuru arasındaki hava boşlukları, çatlaklar ve temas bölgeleri gibi kısımlarda kesintiye uğramaktadır. Bu tür yerler, taşınan bu maddelerin zenginleşmesine yol açar ve daha önce hava veya suyla dolu olan hava boşluklarında (Şekil 103'de gösterildiği gibi) gözlenen etrenjit birikimi gerçekleşmesi ile sonuçlanır. Stark and Bollmann (2000)' e göre etrenjitin oluşmasıyla kristal büyümesinden veya hacimdeki artıştan dolayı yapının mukavemetini aşan gerilmeler ortaya çıkabilir ve bu nedenle de hasar oluşabilir. Örneğin monosülfatın etrenjite dönüşümü ile hacimde 2,3 kat artış meydana gelmektedir. Bu araştırmacılar sertleşmiş beton yapıda oluşan etrenjit kristallerini ya gecikmiş (ilk hidratasyon sırasındaki yüksek sıcaklıklar nedeniyle oluşmuş olan) ya da iç sülfat kaynakları nedeniyle (örneğin donma, donma çözücü tuzun etkisi, karbonatlaşma yoluyla, klinkerden) meydana geldiğini ileri sürmüşlerdir.





**Şekil 103.** Hava gözenekleri içerisinde etrenjit oluşumu (Stark and Bollmann 2000)

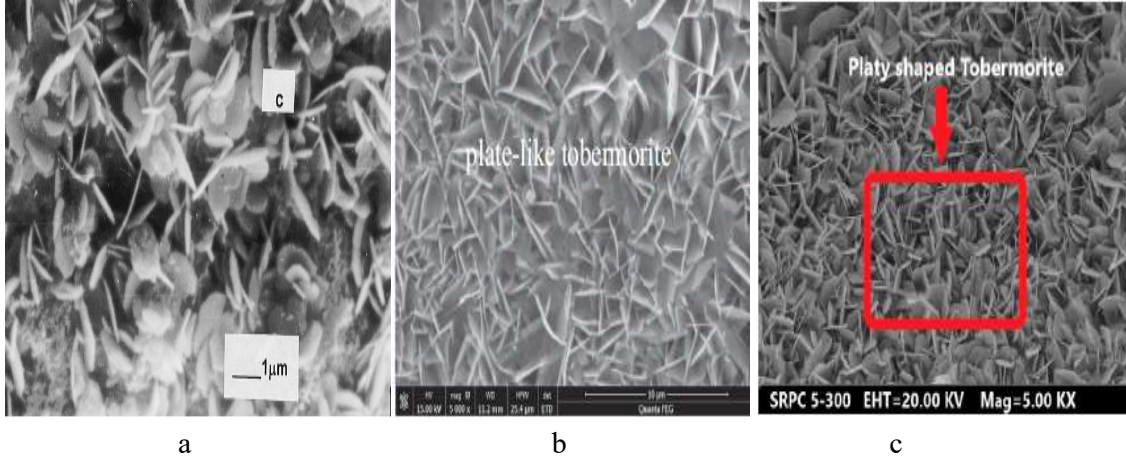
Bogue denklemlerine göre % 7,6  $C_3A$  içeriği ve % 2,3  $SO_3$  içeriğine sahip bir CEM I 42,5 R çimentosu en fazla 12,02 g etrenjit/100 g çimento oluşturabilir.  $300 \text{ kg} / \text{m}^3$  beton içeriği ve  $1,77 \text{ g/cm}^3$  etrenjit yoğunluğu ile bir metreküp betonda % 2,04 etrenjit oluşabilir. Aynı çimento içeriği ile çimentonun sülfat içeriği % 4,0' a yükseltirse bu, hacimce maksimum % 3,54' lük bir etrenjit hacmi artışına neden olur. Yani çimento miktarının artmasıyla, hacimce etrenjit oranında buna karşılık bir artış oluşur (Stark and Bollmann 2000). Bu çalışma kapsamında üretilmiş olan 3D betonun yüksek çimento içeriğinin yüksek hacimde etrenjit oluşuma yol açtığı söylenebilir. Nitekim, Şekil 104' de gösterildiği gibi, SEM analizlerinde bazı hava boşluklarının tamamen etrenjit kristalleriyle dolduğu görülmüş ve bu alana yapılan EDX analizi neticesinde ortamda sülfat olduğu tespit edilmiştir. Bu da bu yapının etrenjit olduğunu kanıtlamaktadır.



**Şekil 104.** Hava boşluklarında gözlemlenen etrenjitin boşluğu doldurması ve bu alanda yapılan EDX analizi

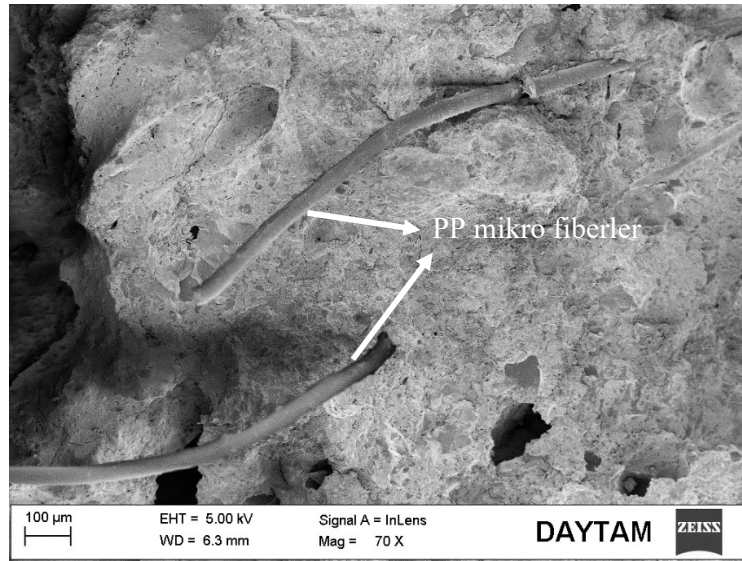
Şekil 102c ve d' deki kristallerin ise, NocuÖ-Wczelik, W. (1999), Li *et al.* (2018) ve Abid *et al.* (2019) çalışmalarında verilen ve Şekil 105' de gösterilen, düz tabaka şeklindeki tobermorit ( $Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2 \cdot 4H_2O$ ) jeli olduğu düşünülmüştür. Yüksek çimento içeriği

nedeniyle hidrasyon sırasında yüksek ısının açığa çıkmış olduğu düşünüldüğünde bazı boşluklarda tobermorit jeline rastlamanın doğal olduğu düşünülmüştür.



**Şekil 105.** a: Nocu $\ddot{O}$ -Wczelik, W. (1999), b: Li *et al.* (2018), c: Abid *et al.* (2019) tarafından gözlemlenen tabaka şeklindeki tobermorit jel yapıları

SEM analizleri ile XRD difraktogramlarında görülen bazı bileşikler görüntülenmiştir. Elde edilen SEM görüntülerinden çalışma kapsamında üretilen 3D betonların yoğun bir matris yapısına sahip olduğu da tespit edilmiştir. Üretilen betonların içine katılan lifler de SEM analizlerinde görüntülenmiş olup Şekil 106’da verilmiştir.



**Şekil 106.** 3D beton örneklerin içindeki pp liflerin SEM görüntüsü

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- 1) Hava sürükleyici katkı (AEA) miktarı arttıkça betonun hava içeriği de arttığından birim hacim ağırlığın azaldığı görülmüştür. Ayrıca hava içeriği miktarı bariz biçimde artmasına rağmen yayılma çapları çok fazla değişmemiş, AEA ilave edildiği gruplar birbirine çok yakın değerlerde yayılmışken katkının ilave edilmediği grup bunlardan farklı ve daha az olarak yayılmıştır. Priz sürelerinde ise AEA ilave edilmeyen grup oldukça erken bir sürede prize başlamışken AEA' nın en fazla katıldığı grup çok uzun süre sonra prize başlayabilmiştir.
- 2) Üretilen 3D betonlardan alınan küp numunlerin 28 günlük basınç dayanımları AEA dozajına göre değişmiştir. AEA katılmayan grupta 54,5 MPa'lık dayanım değeri elde edilmiş iken AEA dozajının artışı ile ters orantılı olarak betonların dayanım değerleri 11,8 MPa'a kadar düşmüştür.
- 3) Reolojik özelliklerin belirlenmesinde AEA katılmayan grubun akma dayanımı ve vizkozitesi diğer gruplardan daha yüksek bulunmuştur. AEA katılan diğer üç grubun hava sürükleyici miktarları dolayısıyla hava içerikleri farklı olmasına rağmen akma dayanımları ve vizkozite değerleri birbirine oldukça yakın çıkmıştır.
- 4) A0 grubundan A2 grubuna doğru gidildikçe kılcal su emme katsayısı artmıştır. Ancak, AEA'nın en fazla katıldığı grubun (A2) kılcal su emme katsayısı A1,5 grubundan daha düşük çıkmıştır. Diğer taraftan, dikey yönde alınan karot numunelerinin kılcal su emme katsayıları yatay yönde alınanlardan daha yüksek çıkmıştır. Buna paralel olarak dikey yönde alınan numunelerin birim hacim ağırlıkları yatay yönde alınan numunelerin birim hacim ağırlıklarından bir miktar daha fazla olmuştur. Membran türü kür malzemesi ile kür edilen numunelerde kılcallık etkisi de fazla oluşmuştur. Buna paralel olarak kür edilmeyen numunelerin birim hacim ağırlıkları kürlü numunelerden fazla çıkmıştır. 3D betonlarda tabakalar arası temasın/aderansın olduğu yerlerde su yükselmeye devam etmişken tabakalar arası boşluklara gelince su buralardan sızıntı yaptığı için ilerlemesi durmuştur. Dolayısıyla geleneksel beton numuneler için belirlenen kılcal su emme deneyinin 3D baskı beton numunelerde uygulanabilirliği tartışılmalıdır.
- 5) A0 ve A1 grubunun en yüksek ve birbirine yakın UPV değerlerine sahip olduğu belirlenmiş bunları yine birbirine yakın sonuçlarla A1,5 ve A2 grubunun izlediği

görülmüştür. En düşük değer A1,5 grubunda elde edilmiştir. Kılcal su emme katsayısı sonuçlarında olduğu gibi UPV sonuçlarında da kür katkısının bariz bir etkisi görülmemiştir. Yatay yönde alınan karot numunelerin UPV değerleri dikey yönde alınan numunelerden büyük çıkmıştır.

- 6) Karotların basınç dayanımı sonuçlarına göre AEA kullanılmayan grup olan A0 ile AEA'nın en az katıldığı A1 grubunun, karot doğrultusu ve kür uygulanıp uygulanmaması gözetilmeksizin, ortalama olarak aynı dayanım değerine (27 MPa) sahip olduğu belirlenmiştir. A1,5 ve A2 gruplarında da birbirine yakın ve 15 MPa civarında dayanım değeri elde edilmiştir. Diğer taraftan, taze betondan alınan küp numunelerden elde edilen basınç dayanım değerleri ile karotlardan elde edilen basınç dayanım değerleri arasında çok ciddi oranda farklar tespit edilmiştir. Karotların basınç dayanımları daha düşük çıkmıştır. Bu düşüş A0, A1, A1,5 ve A2 gruplarında, sırasıyla, %50, % 6, % 23 ve % 29 oranlarında gerçekleşmiştir. Dökme beton elemanların aksine, 3D baskılı beton elemanlar katman katman biriktirme yöntemiyle üretildiklerinden bitişik iki katman arasında kusurlu hatlar (soğuk derz) oluşmuştur. Bu kusurlu yapı da 3D baskı betonların belirgin anizotropik malzeme özelliği sergilemesine yol açmıştır. Sonuç olarak da 3D baskı betonların basınç dayanımları, aynı malzeme ile üretilmiş ancak katmanlı olmayan betonlarınkinden daha düşük çıkmasına yol açmıştır.
- 7) Hemen hemen bütün gruplarda dikey yönde alınan karotların dayanımlarının yatay yönde alınan karotların dayanımından daha büyük olduğu görülmüştür.
- 8) UPV sonuçları ile basınç dayanım sonuçlarının geleneksel betonda olduğu gibi birbirini desteklemediği tespit edilmiştir. Bu nedenle geleneksel betonların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla geliştirilen deney yöntemlerinin 3D betonlar için geçerliliğin kuşkulu olduğu sonucuna varılmıştır. 3D betonlar için yeni/özel deney yöntemlerini içeren standartların geliştirilmesi gerekmektedir.
- 9) Donma-çözülme deneyine tabi tutulan 32 adet numuneden yalnızca 8 tanesi yeterli performansı göstererek 300. çevrime kadar dayanabilmiştir. Birçok numune 300 çevrimi tamamlayamadan hasara uğramıştır. Çalışmada geleneksel betonda don hasarı neticesinde ortaya çıkan parça kopma, pullanma ya da yüzeysel çatlak gibi hasar göstergelerine pek rastlanılmamıştır. 3D betonlardaki donma-çözülme hasar mekanizması, tabakaların birleşim yerlerinde gelişen çatlakların çevrim sayısı arttıkça derinleşmesi ve bir noktadan sonra tabakalar arası temas yüzeylerinden ikiye ayrılması şeklinde gerçekleşmiştir.

- 10) 300 çevrime kadar devam eden donma-çözülme döngülerinde çevrim sayısı arttıkça betonların dinamik elastisite modülü artmıştır.
- 11) Dikey alınan karot numunelerinde başlangıç ağırlık değerlerinden çok daha yüksek ağırlık değerlerine ulaşılmış iken yatay alınan karot numunelerin ağırlıkları birbirine yakın çıkmıştır. 300 çevrim sonunda ayrılmadan kalan numunelerin çoğunluğu yatay karot numuneleri olmuştur. Bu sonucun yatay alınan karot numunelerinin tabakalar arası boşluk miktarlarının dikey karotlardan daha az olması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.
- 12) Gerek BET gerekse de civalı porozimetre (MIP) analizlerinde donma-çözülme çevrimlerinin numunelerin boşluk boyutlarını artırdığı görülmüştür. XRD analizi neticesinde ise beton bileşenlerinden ve karbonatlaşma etkisinden gelen kristal yapılar dışında ilave kristal yapılar gözlenmemiştir. Elde edilen veriler ile kantitatif analiz yapılması da mümkün olmamıştır.
- 13) Çimento dozajının çok yüksek ( $680 \text{ kg/m}^3$ ) olması, su/bağlayıcı oranının çok düşük (0,35) olması, maksimum tane çapı çok küçük (1 mm) olan ince agrega içermesi, agregamatrix geçiş bölgesinin (arayüzey) mineral katkı ile güçlendirilmiş olması, lif katkısı ve içerdiği çok sayıdaki kimyasal katkının sürüklediği hava -ki A0 grubunun hava içeriği bile %2,5'dur- nedenlerinden dolayı 3D betonların donma-çözülme dirençleri yüksek çıkmıştır. Bu arada çalışma kapsamında üretilen çimento esaslı kompozitin betona göre daha az boşluklu yapıya sahip olan harç olmasının da donma-çözülme etkisine karşı direncin yüksek çıkmasına katkıda bulunduğunu belirtmek gerekir. Bu ifadelerden 3D baskı betonların donma-çözülme davranışı üzerinde hava sürükleyici katkıların etkisinin geleneksel betonlar kadar önemli olmadığı sonucu çıkarılabilir. Bu da çalışmanın hipotezini doğrulamaktadır. Bununla birlikte, aşağıdaki maddede de belirtildiği gibi, düşük dozajda hava sürükleyici katkı kullanılmasının faydası olduğu tespit edilmiştir.
- 14) Deneysel çalışmalar neticesinde donma-çözülme çevrimlerine dirençli aynı zamanda yeterli basınç dayanımına sahip 3D betonlar üretilmek istenmesi durumunda düşük dozajda (bu çalışma için %0,1) AEA maddesinin kullanılması tavsiye edilmiştir. Yine, bu çalışmada etkisi çok net olarak belirlenememiş olsa da membran tipi kür malzemeleri (curing compound) ile yerinde üretimi yapılan 3D yapı ve yapı elemanlarına kür uygulanması tavsiye edilir.
- 15) Bu çalışmada olduğu gibi beton karşılımlarına çok fazla sayıda kimyasal katkı maddesi katılması, uygulama açısından bir takım sorunların yaşanmasına neden olabilir. Bu

nedenle, 3D betonlar için birden fazla etkiyi aynı anda sağlayabilecek özel kimyasal katkı maddelerinin üretilmesi önerilir.

- 16) Aynı beton elemandan dikey ve yatay yönlerde alınan karot numunlerinin fiziko-mekanik özelliklerinin farklı çıkması, 3D betonların doğası gereği katmanlı üretimin neden olduğu tabakalı yapıdadır. Tabkalar arası boyuna kusurlar mekanik ve fiziksel özellikleri etkilemekte ve 3D betonların anizotropik davranış sergilemesine yol açmaktadır. Bu sonuç, aynı zamanda, bu tez çalışmasının hipotezini de doğrulamaktadır.
- 17) Bu çalışmada 3D betonların en zayıf fazının tabakalar arası temas yüzeyi olduğu sonucuna varılmıştır. Konuya ilgi duyan araştırmacılara bu zayıf fazın güçlendirilmesine yönelik çalışma yapmaları tavsiye edilir. Yine 3D betonlardaki su kaybının yönü üzerinde çalışılarak bu betonlar için daha uygun kür yöntemlerinin geliştirilmesi faydalı olacaktır.

## KAYNAKLAR

- Abid, M., Hou, X., Zheng, W., and Hussain, R. R. 2019. Effect of fibers on high-temperature mechanical behavior and microstructure of reactive powder concrete. *Materials*, 12(2), 329.
- Agustí-Juan, I., Müller, F., Hack, N., Wangler, T. and Habert, G., 2017. Potential benefits of digital fabrication for complex structures: Environmental assessment of a robotically fabricated concrete wall. *Journal of Cleaner Production*, 154, 330-340.
- Akman, M. S., 1992. Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, Sayı: 1481, 245s, İstanbul, Türkiye.
- Al-Akhras, N. M., 1995. Characterization and deterioration detection of portland cement concrete using ultrasonic waves. Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
- Anonim 2004: TS EN 13057, Beton yapılar - Koruma ve tamir için mamul ve sistemler - Deney metotları - Kılcal su emmeye direncin tayini
- Anonim 2012: TS EN 12504-4, Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim 2016: TS EN 196-1, Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim 2017: TS EN 196-3, Çimento deney yöntemleri - Bölüm 3: Priz süreleri ve genişleme tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim 2017b: TS EN 206:2013+A1, Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim 2019a: TS EN 12350-5, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 5: Yayılma tablası deneyi. 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 12350-5, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 5: Yayılma tablası deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim 2019d: TS EN 12390-3, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim 2019e: TS EN 13791, Beton basınç dayanımının, yapılar ve öndökümlü beton bileşenlerde yerinde tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim 2020p: [http://e.kutuphane.teb.org.tr/pdf/tebakademi/modern\\_farmasotk/23.pdf](http://e.kutuphane.teb.org.tr/pdf/tebakademi/modern_farmasotk/23.pdf), (Nevin ÇELEBİ-Reoloji), (Son erişim: Eylül 2020).
- Anonim2020r: <http://kisi.deu.edu.tr/halit.yazici/YapiMALI/MALZEME-I-D7-REOLOJI.pdf>, Son erişim: Eylül 2020.
- Anonim 2020s: <https://www.cimsa.com.tr>, (Son erişim: Eylül 2020).
- Anonim 2020t: <http://www.nanokim.com.tr/default.asp?s=210>, (Son erişim: Eylül 2020).
- Anonim 2020u: [http://www.ktu.edu.tr/dosyalar/14\\_14\\_00\\_71570.pdf](http://www.ktu.edu.tr/dosyalar/14_14_00_71570.pdf) (Son erişim: Eylül 2020).
- Anonim 2020w: <http://mme.deu.edu.tr/wp-content/uploads/2017/07/YuZEYKiMYASIDERS.pdf> (Son erişim: Eylül 2020).

- Anonymous 2001: ACI REPORT. Butler, W. B., Janssen, D. J., Schell, H. C., Cabrera, J. G., Keck, R. H., Schmitt, J. W., and Klieger, P., Guide to durable concrete, ACI 201.2 R-01, American Concrete Institute.
- Anonymous 2006: BS EN 15167-1 Ground granulated blast furnace slag for use in concrete, mortar and grout. Definitions, specifications and conformity criteria, British-Adopted European Standard.
- Anonymous 2007: ASTM, C1437. Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. ASTM International, West Conshohocken.
- Anonymous 2008: ACI, A. 201.2 R-01 Guide to Durable Concrete reported by ACI Committee 201.
- Anonymous 2012: ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies, and ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies. Subcommittee F42.91 on Terminology. ASTM International, West Conshohocken.
- Anonymous 2014: ASTM C230/C230 M-14 Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement. ASTM International, West Conshohocken
- Anonymous 2015: ASTM, C666 / C666M-15. Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, American Society for Testing Materials. ASTM International, West Conshohocken.
- Anonymous 2016: Committe 201, American Concrete Institute, Hager, I., Golonka, A., and Putanowicz, R., 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction. Procedia Engineering, 151, 292-299, 39s, Detroit.
- Anonymous 2020a: [www.d-shape.com](http://www.d-shape.com), (Date accessed is Sept, 2020).
- Anonymous 2020b: [https://d-shape.com/bwg\\_gallery/radiolaria/](https://d-shape.com/bwg_gallery/radiolaria/) , Radiolaria designed by Andrea Morgante and printed with D-shape. (Date accessed is Sept, 2020).
- Anonymous 2020c: <http://www.winsun3d.com/> , Multi-storey houses produced in China by Winsun, (Date accessed is Sept, 2020).
- Anonymous 2020d: [https://cybe.eu/portfolio-item/rdrone\\_laboratory\\_3dprinting\\_on-site\\_in\\_the\\_desert\\_of\\_dubai/](https://cybe.eu/portfolio-item/rdrone_laboratory_3dprinting_on-site_in_the_desert_of_dubai/) , World's First 3d Printed Laboratory in Dubai, R and D Laboratory by CyBe, (Date accessed is Sept, 2020).
- Anonymous 2020e: <https://www.tue.nl/en/research/research-groups/structural-engineering-and-design/concrete-research-areas/3d-concrete-printing/#top> , Eindhoven University of Technology, Date accessed is July, 2020.
- Anonymous 2020f: <https://www.apis-cor.com/en/about/news> , 3D concrete printing house produced in Russia by Apis Cor, (Date accessed is Sept, 2020).
- Anonymous 2020g: <http://www.totalkustom.com/3d-castle-completed.html> , Castle in Minnesota, USA and Hotel suite interior in the Philippines by Total Kustom, (Date accessed is Sept, 2020).
- Anonymous 2020i: <https://www.media.mit.edu/projects/building-scale-3d-printing/overview>, MIT, (Date accessed is Sept, 2020).
- Anonymous 2020i: [https://www.emergingobject\\_s.com](https://www.emergingobject_s.com), (Date accessed is Sept, 2020).
- Anonymous 2020j: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/> , Gaia is a sample home by WASP (Date accessed is Sept, 2020).



- Anonymous 2020k: <http://www.xtreee.eu/post-in-aix-en-provence/> , Post In Aix-En-Provence by XtreaE, This 4m-high post supports the playground roof of a school in Aix-en-Provence, France (Date accessed is Sept, 2020).
- Anonymous 2020l: <https://iaac.net/project/minibuilders/>, (Date accessed is Sept, 2020).
- Anonymous 2020m: <https://iston.istanbul>, (Son erişim: Eylül 2020).
- Anonymous 2020n: <https://www.taek.gov.tr/> (Son erişim: Eylül 2020).
- Anonymous 2020o: <https://arum.ogu.edu.tr/> / (Son erişim: Eylül 2020).
- Assaad, J. J., Hamzeh, F. and Hamad, B., 2020. Qualitative assessment of interfacial bonding in 3D printing concrete exposed to frost attack. *Case Studies in Construction Materials*, e00357.
- Austin, W. and Khoshnevis, B., 1988. Intelligent simulation environments for system modeling. In *Institute of Industrial Engineering Conference*.
- Aytekin, M. and Durmuş, A., 1986. Betonarme İnşaatta Hafif Betonlar. *TMMOB Haber Bülteni*, (8), 12-15.
- Baradan B., Yazıcı, H., Aydın, S., 2012. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 334, 825 s, İzmir.
- Bager, D. H., 2010. Qualitative Description of the Micro-ice Body Freeze-thaw Damage Mechanism in Concrete. *Freeze-thaw Testing Of Concrete—Input To Revision of CEN Test Methods*. In *Workshop proceeding From a Nordic Mini-seminar* (pp. 4-5).
- Bager, D. H. and Sellevold, E. J., 1980. Ice formation in hardened cement paste—II. Steam-cured pastes with variable moisture contents. In *Durability of Building Materials and Components*, ASTM International.
- Bager, D. H. and Sellevold, E. J., 1986. Ice formation in hardened cement paste, Part II—drying and resaturation on room temperature cured pastes. *Cement and Concrete Research*, 16(6), 835-844.
- Bal, A. ve Koca,S., 2018. Reaktif Pudra Betonunun Kent Mobilyaları Tasarımında Kullanımının Araştırılması. 2. ULUSLARARASI MİMARLIK VE TASARIM KONGRESİ, Çanakkale.
- Bal, S., 2007. Isıl işlem görmüş kömürlere MTBE'nin adsorpsiyonu Doktora tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Banfill, P. F. G., 2003. The rheology of fresh cement and concrete—a review. In *Proceedings of the 11th international cement chemistry congress*, Vol. 1, pp. 50-62.
- Banfill, P. F. G., 1990. *Rheology of Fresh Cement and Concrete*. Proceedings of an International Conference, CRC Press, Liverpool.
- Bao, Y., Xu, M., Soltan, D., Xia, T., Shih, A., Clack, H. L. and Li, V. C., 2018. Three-dimensional printing multifunctional engineered cementitious composites (ECC) for structural elements. In *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, pp. 115-128, Springer, Cham.
- Barfield, M. and Ghafoori, N. 2012. Air-entrained self-consolidating concrete: A study of admixture sources. *Construction and Building Materials*, 26(1), 490-496.
- Bazant, Z. P., Chern, J. C., Rosenberg, A. M., and Gaidis, J. M., 1988. Mathematical Model for Freeze-Thaw Durability of Concrete. *Journal of the American Ceramic Society*, 71(9), 776-783.

- Bizinotto, M. B., Faleschini, F., Fernández, C. G. J. and Hernández, D. F. A., 2017. Effects of chemical admixtures on the rheology of fresh recycled aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 151, 353-362.
- Bong, S. H., Nematollahi, B., Nazari, A., Xia, M. and Sanjayan, J. G., 2018. Fresh and hardened properties of 3D printable geopolymer cured in ambient temperature. In *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, pp. 3-11. Springer, Cham.
- Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z. and Salet, T., 2016. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), 209-225.
- Buswell, R. A., De Silva, W. L., Jones, S. Z. and Dirrenberger, J., 2018. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, 37-49.
- Camacho, D. D., Clayton, P., O'Brien, W. J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R. and Salamone, S., 2018. Applications of additive manufacturing in the construction industry—A forward-looking review. *Automation in construction*, 89: 110-119.
- Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O. and Garrett, B., 2011. Could 3D printing change the world. *Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing*. Atlantic Council, Washington, DC, 3.
- Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V. and Pambaguian, L., 2014. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica*, 93, 430-450.
- Chan, C., 2006. Effect of deicing chemicals on the strength and deterioration of concrete. Master's Thesis, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.
- Chang, S. H., 2016. Exploring the evolution of additive manufacturing industry: a study of stakeholder requirements and architectural analysis of Desktop three-dimensional printing Segment. Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology.
- Chatterji, S., 2003. Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents. *Cement and Concrete Composites*, 25(7), 759-765.
- Chen, M., Li, L., Zheng, Y., Zhao, P., Lu, L. and Cheng, X., 2018. Rheological and mechanical properties of admixtures modified 3D printing sulphoaluminate cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 189, 601-611.
- Çankayalı, A., Gökçe, M., ve Levent, K. Y., 2009. Taze Beton Bünyesindeki İnce Malzeme Hamuru Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi.
- De Fontenay, C. L. S. and Sellevold, E. J., 1980. Ice Formation in Hardened Cement Paste—1. Mature Water-Saturated Pastes. In *Durability of Building Materials and Components*. ASTM International.
- De Schutter, G., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Habert, G. and Agusti-Juan, I., 2018. Vision of 3D printing with concrete—technical, economic and environmental potentials. *Cement and Concrete Research*, 112, 25-36.
- Diamond, S., 1996. Delayed ettringite formation—Processes and problems. *Cement and concrete Composites*, 18(3), 205-215.
- Diamond, S., 2000. Mercury Porosimetry an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials. *Cement and Concrete Res.*, 30, 1517-1525.

- Dils, J., Boel, V. and De Schutter, G., 2013. Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of UHPC. *Construction and Building Materials*, 41, 455-463.
- Doğan, Ü. A., 2009. Beton bileşim parametrelerinin geçirimsizlik özellikleri ve gömülü çelik donatı korozyonuna etkisi . Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Du, L. and Folliard, K. J., 2005. Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cement and concrete research*, 35(8), 1463-1471.
- Erdoğan, T. Y., 1997. *Admixtures for concrete*. METU Pres, Ankara.
- Erdoğan, T., Y., 2003. *Beton*. ODTÜ Yayıncılık, 757 s, Ankara.
- Fagerlund, G., 1973. Critical degrees of saturation at freezing of porous and brittle materials. Doctoral dissertation, Lund University.
- Fagerlund, G., 1973. Determination of pore-size distribution from freezing-point depression. *Matériaux et construction*, 6(3), 215-225.
- Fagerlund, G., 1994. Frost resistance of high performance concrete-some theoretical considerations. *Durability of HPC*, edited by H. Sommer, RILEM, 256 p, Cachan Cedex.
- Fagerlund, G., 1977. The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. *Matériaux et Construction*, 10(4), 217-229.
- Fagerlund, G., 1980. Durability of concrete structures. (Swedish) G. Fagerlund, CBI Report, (4).
- Fagerlund, G., 1992. Effect of the freezing rate on the frost resistance of concrete. *Nordic Concrete Research*. Publication No 11.
- Fagerlund, G., 1997a. Internal frost attack-state of the art. In *Rilem Proceedings* (pp. 321-338). Chapman and Hall.
- Fagerlund, G., 1997b. On the service life of concrete exposed to frost action. In *International Workshop in the Resistance of Concrete to Scaling due to Freezing in the Presence of De-icing Salts*, (pp. 23-41). E and FN Spon.
- Fagerlund, G., 2004. A service life model for internal frost damage in concrete. Report TVBM; Vol. 3119, Division of Building Materials, LTH, Lund University.
- Fridh, K., 2005. Internal frost damage in concrete-experimental studies of destruction mechanisms. Ph. D. Thesis, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, 378, Lund, Sweden.
- Gebler, M., Uiterkamp, A. J. S. and Visser, C., 2014. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, 74, 158-167.
- Ghaffar, S. H., Corker, J. and Fan, M., 2018. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in Construction*, 93, 1-11.
- Giergiczny, Z., Glinicki, M. A., Sokołowski, M. and Zielinski, M., 2009. Air void system and frost-salt scaling of concrete containing slag-blended cement. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2451-2456.
- Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J. and Morel, P., 2016. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete—a new processing route for architects and builders. *Materials and Design*, 100, 102-109.

- Hague, R., Campbell, I. and Dickens, P., 2003. Implications on design of rapid manufacturing. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 217(1), 25-30.
- Hambach, M., Rutzen, M. and Volkmer, D., 2019. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. In 3D Concrete Printing Technology (pp. 73-113). Butterworth-Heinemann.
- Hanjari, K. Z., Kettil, P., and Lundgren, K., 2013. Modelling the structural behaviour of frost-damaged reinforced concrete structures. Structure and Infrastructure Engineering, 9(5), 416-431.
- Hazaree, C. V., 2007. Transport properties and freeze-thaw resistance of roller compacted concrete (RCC) for pavement applications. MS Thesis, Iowa State University, USA.
- Helmuth, R. A., 1960. The Capillary Size Restrictions On Ice Formation In Hardened Portland Cement Pastes (No. 156).
- Henry, K. S., 2000. A review of the thermodynamics of frost heave. No. Erdc/Crrel-Tr-00-16, Engineer Research And Development Center Hanover Nh Cold Regions Research And Engineering Lab.
- Hopkinson, N., Gao, Y. and McAfee, D. J., 2006. Design for environment analyses applied to rapid manufacturing. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 220(10), 1363-1372.
- Jeon, K. H., Park, M. B., Kang, M. K. and Kim, J. H., 2013. Development of an automated freeform construction system and its construction materials. In ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (Vol. 30, p. 1). Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics and Property.
- Justnes, H. and Martius-Hammer, T. A., 2016. Sürdürülebilirlik-Beton İnovasyonundaki Öncü Rolü. Hazır Beton, 23, 77-82.
- Karakoç, B., 2010. Hafif Agreganın Ve Hava Sürükleyici Katkı Maddesinin Yüksek Dayanımlı Betonun Donma-Çözülme Dayanıklılığına Etkisinin İncelenmesi Ve Modellenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Kazemian, A., Yuan, X., Meier, R. and Khoshnevis, B., 2019. Performance-based testing of Portland cement concrete for construction-scale 3D printing. In 3D Concrete Printing Technology (pp. 13-35). Butterworth-Heinemann.
- Khorramshahi, M.R. and Mokhtari, A., 2017. Automatic Construction by Contour Crafting Technology. Italian Journal of Science and Engineering, 1(1), 28-33.
- Khoshnevis, B., 2004. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. Automation in construction, 13(1), 5-19.
- Khoshnevis, B. and Bekey, G. 1998. Centralized sensing and control of multiple mobile robots. Computers and industrial engineering, 35(3-4), 503-506.
- Khoshnevis, B. and Zhang, J., 2012. Extraterrestrial construction using contour crafting. Solid Freeform Fabrication Proceedings; University of Texas: Austin, TX, USA, 250-259.
- Klieger, P. and Hanson, J. A., 1961. Freezing and thawing tests of lightweight aggregate concrete. In Journal Proceedings (Vol. 57, No. 1, pp. 779-796).
- Krassenstein, E., 2014. World's First 3D Printed Castle is Complete-Andrey Rudenko Now to Print a Full-size House. 3Dprint. com.

- Kreiger, M. A., MacAllister, B. A., Wilhoit, J. M. and Case, M. P., 2015. The current state of 3D printing for use in construction. In *The Proceedings of the 2015 Conference on Autonomous and Robotic Construction of Infrastructure*, (pp. 149-158), Ames, Iowa.
- Labonnote, N., Rønquist, A., Manum, B. and Rütther, P., 2016. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72: 347-366.
- Lachemi, M., Hossain, K. M. A., Lambros, V., Nkinamubanzi, P. C. and Bouzoubaa, N., 2004. Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 185-193.
- Lamond, J. F. and Pielert, J. H., 2006. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials*. West Conshohocken, PA: Astm.
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. and Thorpe, T., 2012a. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and structures*, 45(8), 1221-1232.
- Lee, H., Cody, R. D., Cody, A. M., and Spry, P. G., 2005. The formation and role of ettringite in Iowa highway concrete deterioration. *Cement and Concrete Research*, 35(2), 332-343.
- Ley, M. T., Welchel, D., Peery, J., Khatibmasjedi, S. and LeFlore, J., 2017. Determining the air-void distribution in fresh concrete with the Sequential Air Method. *Construction and Building Materials*, 150, 723-737.
- Li, B., Mao, J., Nawa, T. and Han, T., 2017. Mesoscopic damage model of concrete subjected to freeze-thaw cycles using mercury intrusion porosimetry and differential scanning calorimetry (MIP-DSC). *Construction and Building Materials*, 147, 79-90.
- Li, X., Liu, Z., Lv, Y., Cai, L., Jiang, D., Jiang, W., and Jian, S. 2018. Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash in autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, 178, 175-182.
- Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G. and Thorpe, T., 2012. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in construction*, 21, 262-268.
- Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Wackrow, R., Austin, S. A., Gibb, A. G. and Thorpe, T., 2011. Development of a viable concrete printing process.
- Lim, S., Buswell, R. A., Valentine, P. J., Piker, D., Austin, S. A. and De Kestelier, X., 2016. Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components. *Additive Manufacturing*, 12, 216-230.
- Lim, S., Le, T., Webster, J., Buswell, R., Austin, A., Gibb, A. and Thorpe, T., 2009. Fabricating construction components using layered manufacturing technology. In *Global Innovation in Construction Conf.* 512-520.
- Litvan, G. G., 1972. Phase transitions of adsorbates: IV, mechanism of frost action in hardened cement paste. *Journal of the American Ceramic Society*, 55(1), 38-42.
- Litvan, G. G., 1973. Frost action in cement paste. *Matériaux et construction*, 6(4), 293-298.
- Litvan, G.G., 1976. Frost action in cement in the presence of de-icers. *Cement and Concrete Research*, 6, 351-356.
- Liu, Z., Zhang, Y., Jiang, Q., Sun, G. and Zhang, W., 2011. In situ continuously monitoring the early age microstructure evolution of cementitious materials using ultrasonic measurement. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3998-4005.

- Lu, B., Qian, Y., Li, M., Weng, Y., Leong, K. F., Tan, M. J. and Qian, S., 2019. Designing spray-based 3D printable cementitious materials with fly ash cenosphere and air entraining agent. *Construction and Building Materials*, 211, 1073-1084.
- Ma, G., Wang, L. and Ju, Y., 2018a. State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—an emerging technique for construction. *Science China Technological Sciences*, 61(4), 475-495.
- Ma, G., Li, Z., and Wang, L. 2018b. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. *Construction and building materials*, 162, 613-627.
- Ma, G., Li, Z., Wang, L. and Bai, G., 2019. Micro-cable reinforced geopolymer composite for extrusion-based 3D printing. *Materials Letters*, 235, 144-147.
- Malaeb, Z., AlSakka, F. and Hamzeh, F., 2019. 3D concrete printing: machine design, mix proportioning, and mix comparison between different machine setups. In *3D Concrete Printing Technology*, 115-136. Butterworth-Heinemann.
- Malhotra, V. M., 1976. Testing hardened concrete: Non-destructive methods, ACI Monograph No. 9, ACI. Iowa State University Press, Ames, Iowa.
- Marchand, J., Pleau, R. and Gagné, R., 1995. Deterioration of concrete due to freezing and thawing. *Materials Science of Concrete*, 4(4), 283-354.
- Marchand, J., Pigeon, M., Bager, D. and Talbot, C., 1999. Influence of chloride solution concentration on deicer salt scaling deterioration of concrete. *ACI Materials Journal*, 96 (4), 429-435.
- Marchon, D., Kawashima, S., Bessaies-Bey, H., Mantellato, S. and Ng, S. 2018. Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. *Cement and Concrete Research*.
- Mehta, P. K. and Monteiro, P. J., 2017. *Concrete microstructure, properties and materials*.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. and Carmona Filho, A., 1994. *Concrete: estrutura, propriedades e materiais*. Pini.
- Mehta, P. K. and Monteiro, P. J., 2006. *Concrete microstructure, properties and materials*.
- Mindess, S., Young, F. J. and Darwin, D., 2003. *Concrete 2nd Editio*. Technical Documents.
- Moeini, M. A., Hosseinpoor, M. and Yahia, A., 2020. Effectiveness of the rheometric methods to evaluate the build-up of cementitious mortars used for 3D printing. *Construction and Building Materials*, 257, 119551.
- Molero, M., Aparicio, S., Al-Assadi, G., Casati, M. J., Hernández, M. G. and Anaya, J. J., 2012. Evaluation of freeze–thaw damage in concrete by ultrasonic imaging. *Ndt and E International*, 52, 86-94.
- Moon, Y., Kim H.S. and Choi D.S., 2006. Relationship between average pore diameter and chloride diffusivity in various concretes. *Construction and Building Materials* 20, 725–732.
- Nadarajah, N., 2018. Development of concrete 3D printing. Master thesis, Aalto University School of Engineering, Building Technology, Finland.
- Nagi, M. A., Okamoto, P. A., Kozikowski, R. L. and Hover, K., 2007. Evaluating air-entraining admixtures for highway concrete (NCHRP Report no. 578). U.S. : National Cooperative Highway Research Program, [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_rpt\\_578.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_578.pdf) (29.09.2020)

- Nair, S. A., Panda, S., Santhanam, M., Sant, G. and Neithalath, N., 2020. A critical examination of the influence of material characteristics and extruder geometry on 3D printing of cementitious binders. *Cement and Concrete Composites*, 103671.
- Nematollahi, B., Xia, M., Sanjayan, J. and Vijay, P., 2018. Effect of type of fiber on inter-layer bond and flexural strengths of extrusion-based 3D printed geopolymer. In *Materials science forum*, 939, 155-162. Trans Tech Publications Ltd.
- Nerella, V. N., Näther, M., Iqbal, A., Butler, M. and Mechtcherine, V., 2019. Inline quantification of extrudability of cementitious materials for digital construction. *Cement and Concrete Composites*, 95, 260-270.
- Neville, A. M., 1995. *Properties of concrete* (Vol. 4). London: Longman.
- NocuÒ-Wczelik, W. 1999. Effect of Na and Al on the phase composition and morphology of autoclaved calcium silicate hydrates. *Cement and Concrete Research*, 29(11), 1759-1767.
- Orbak, İ., 2009. Aktif Karbon ile Çevre Kirletici Bazı Unsurların Giderilmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Özalp, F., Yılmaz, H. D. ve Yaşar, Ş., 2018. 3D YAZICI TEKNOLOJİSİNE UYGUN SÜRDÜRÜLEBİLİR VE YENİLİKÇİ BETONLARIN GELİŞTİRİLMESİ. Hazır beton dergisi.
- Öztütüncü, G. H., 1992. Ortalama hafif agrega boyutunun yarı hafif betonların dona dayanıklılığı üzerindeki etkileri. Doktora Tezi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Page, C. L. and Page, M. M. (Eds.), 2007. *Durability of concrete and cement composites*. Elsevier.
- Panda, B. and Tan, M. J., 2018. Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. *Ceramics International*, 44(9), 10258-10265.
- Panda, B., Lim, J. H. and Tan, M. J., 2019. Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction. *Composites Part B: Engineering*, 165, 563-571.
- Panda, B., Paul, S. C. and Tan, M. J., 2017. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. *Materials Letters*, 209, 146-149.
- Papachristoforou, M., Mitsopoulos, V. and Stefanidou, M., 2018. Evaluation of workability parameters in 3D printing concrete. *Procedia Structural Integrity*, 10, 155-162.
- Papadakis, V.G., Vayenas, C.G. and Fardis, M.N., 1991. Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete. *ACI Materials Journal*, 8 (2), 186-196.
- Paul, S. C., Tay, Y. W. D., Panda, B. and Tan, M. J., 2018. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(1), 311-319.
- Pegna, J., 1997. Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in construction*, 5(5), 427-437.
- Pekmezci, B. Y. ve Atahan, H. N., 2014. Kimyasal ve nano katkılar: betonda kullanımı ve beton performansına etkileri. *Hazır Beton Dergisi*, Mayıs-Haziran, 69-82.
- Penttala, V., 1998. Freezing-induced strains and pressures in wet porous materials and especially in concrete mortars. *Advanced cement based materials*, 7(1), 8-19.

- Penttala, V., 1999. Strains and pressures induced by freezing mortars exposed in sodium chloride solution. *Concrete Science and Engineering*, 1(1), 2-14.
- Penttala, V. and Al-Neshawy, F., 2002. Stress and strain state of concrete during freezing and thawing cycles. *Cement and Concrete Research*, 32(9), 1407-1420.
- Penttala, V., 2006. Surface and internal deterioration of concrete due to saline and non-saline freeze-thaw loads. *Cement and Concrete Research*, 36(5), 921-928.
- Pigeon, M. and Lachance, M., 1981. Critical air void spacing factors for concretes submitted to slow freeze-thaw cycles. In *Journal Proceedings*, 78(4), 282-291.
- Pigeon, M., Prevost, J. and Simard, J.M., 1985. Freeze-thaw durability versus freezing rate. *ACI Journal*, Sep-Oct, 684-692.
- Pigeon, M. and Pleau, R., 1995. *Durability of concrete in cold climates*. Suffolk: EandFN Spon.
- Pigeon, M., Marchand, J. and Pleau, R., 1996. Frost resistant concrete. *Construction and Building Materials*, 10(5), 339-348.
- Pigeon, M., Marchand, J. and Pleau, R., 1996. Frost resistant concrete. *Construction and Building Materials*, 10(5), 339-348.
- Pigeon, M. and Pleau, R., 2006. *Durability of concrete in cold climates*. London : Taylor and Francis.
- Pinto, R. C. and Hover, K. C., 2001. *Frost and scaling resistance of high-strength concrete*. Portland Cement Association.
- Powers, T. C., 1945. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. In *Journal Proceedings*, 41(1), 245-272.
- Powers, T. C. (1975). *Freezing effects in concrete*. Special Publication, 47, 1-12.
- Powers, T. C. and Helmuth, R. A., 1953. Theory of volume changes in hardened portland-cement paste during freezing. In *Highway research board proceedings* (Vol. 32).
- Powers, T.C., 1945. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. *Journal of the American Concrete Institute*, 16 (4), 245-272.
- Powers, T.C. and Helmuth, R.A., 1953. Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing. *Proceedings of the Highway Research Board*, 32, 285-297.
- Rael, R. and San Fratello, V., 2011. *Developing concrete polymer building components for 3D printing*.
- Rahul, A. V. and Santhanam, M., 2020. Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 103570.
- Rahul, A. V., Santhanam, M., Meena, H. and Ghani, Z., 2019. 3D printable concrete: Mixture design and test methods. *Cement and Concrete Composites*, 97, 13-23.
- Ramachandran, V. S. and Beaudoin, J. J., 2000. *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: principles, techniques and applications*. Elsevier.
- Rubio, M., Sonebi, M. and Amziane, S., 2017. *3D printing of fibre cement-based materials: fresh and rheological performances*.
- Rushing, T. S., Stynoski, P. B., Barna, L. A., Al-Chaar, G. K., Burroughs, J. F., Shannon, J. D. and Case, M. P., 2019. Investigation of concrete mixtures for additive construction. In *3D Concrete Printing Technology*, Butterworth-Heinemann, 137-160.



- Savaş, Z.B., 1999. Effects of microstructure on durability of concrete. PhD Thesis, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
- Scherer, G. W., 1999. Crystallization in pores. *Cement and Concrete research*, 29(8), 1347-1358.
- Schröfl, C., Nerella, V. N. and Mechtcherine, V., 2018. Capillary water intake by 3D-printed concrete visualised and quantified by neutron radiography. In RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Springer, Cham.
- Schulson, E. M., 1998. Ice damage to concrete (No. CRREL-SR-98-6). COLD REGIONS RESEARCH AND ENGINEERING LAB HANOVER NH.
- Schulson, E. M., 1998. Ice damage to concrete (No. CRREL-SR-98-6). COLD REGIONS RESEARCH AND ENGINEERING LAB HANOVER NH.
- Sellevoid, E. J. and Bager, D. H., 1980, July. Low temperature calorimetry as a pore structure probe. In 7TH International Congress on the Chemistry of Cement, Paris.
- Setzer, M.J., 1997a. Basis of testing the freeze-thaw resistance: surface and internal deterioration. *Frost Resistance of Concrete*, edited by M.J. Setzer and R. Aubeng. EandFN SPON, 157-173.
- Setzer, M.J., 1997b. Action of frost and deicing chemicals: Basis phenomena and testing. *Freeze thaw Durability of Concrete*, edited by J. Marchand, M. Pigeon and M.J. Setzer. EandFN SPON, 3-22.
- Setzer, M. J., 1999. Micro ice lens formation and frost damage. In Draft Proceeding of the Minneapolis Workshop on Frost Damage in Concrete in USA, 14, 1-15.
- Shakor, P., Sanjayan, J., Nazari, A. and Nejadi, S., 2017. Modified 3D printed powder to cement-based material and mechanical properties of cement scaffold used in 3D printing. *Construction and Building Materials*, 138, 398-409.
- Soltan, D. G. and Li, V. C., 2018. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing. *Cement and Concrete Composites*, 90, 1-13.
- Sonebi, M., Lachemi, M. and Hossain, K. M. A., 2013. Optimisation of rheological parameters and mechanical properties of superplasticised cement grouts containing metakaolin and viscosity modifying admixture. *Construction and Building Materials*, 38, 126-138.
- Stark, J. and Ludwig, H. M., 1997. Freeze-thaw and freeze-deicing salt resistance of concretes containing cement rich in granulated blast furnace slag. *Materials Journal*, 94(1), 47-55.
- Stark, J., and Bollmann, K. 2000. Delayed ettringite formation in concrete. *NORDIC CONCRETE RESEARCH-PUBLICATIONS-*, 23, 4-28.
- Suprenant, B. A., 1985. Freezing concrete as a construction practice. *Cold regions science and technology*, 11(2), 195-197.
- Szwabowski, J. and Łażniewska-Piekarczyk, B., 2008. The increase of air content in scc mixes under the influence of carboxylate superplasticizer. *Cement Wapno Beton*, 13, 205-215.
- Şahin, R., 2003. Normal Portland Çimentolu Betonların Don Direncinin Taguchi Yöntemi İle Optimizasyonu ve Hasar Analizi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Şahin, Y., 2013. Hava Sürükleyici Katkıların Karakterizasyonu ve Deney Koşullarının Betonun Donma-Çözülme Hasarına Etkisi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.

- Tangüler, M., Gürsel, P. and Meral, Ç., 2015. Türkiye’de Uçucu Küllü Betonlar İçin Yaşam Döngüsü Analizi. 9. Ulusal Beton Kongresi, Antalya.
- Tay, Y. W. D., Qian, Y. and Tan, M. J., 2019. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. *Composites Part B: Engineering*, 174, 106968.
- Taylor, H.F.W., 1992. *Cement chemistry*. San Diego : Academic Press.
- Tekin, İ., Bolat, H., Çullu, M. and Subaşı, S., 2011. Çimentolu Sistemlerde Porozite Analizi. *Electronic Journal of Construction Technologies*, 7(2), 31-39.
- Tian, W. and Han, N., 2018. Pore characteristics ( $> 0.1$  mm) of non-air entrained concrete destroyed by freeze-thaw cycles based on CT scanning and 3D printing. *Cold Regions Science and Technology*, 151, 314-322.
- Tregger, N. A., Pakula, M. E. and Shah, S. P., 2010. Influence of clays on the rheology of cement pastes. *Cement and concrete research*, 40(3), 384-391.
- Tola, Y., 2000. Farklı çimentolarla üretilmiş betonlarda donam-çözülme ve sülfat etkisi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Valore, R. C., 1950. Volume changes in small concrete cylinders during freezing and thawing. In *Journal Proceedings*, 46(2), 417-434.
- Van Damme, H., 2018. Concrete material science: past, present, and future innovations. *Cement and Concrete Research*, 112, 5-24
- Van Der Putten, J., De Schutter, G. and Van Tittelboom, K. 2018, September. The effect of print parameters on the (micro) structure of 3D printed cementitious materials. In *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, Springer, Cham.
- Verbeck, G. J. and Klieger, P., 1957. Studies of salt scaling of concrete. *Highway Research Board Bulletin*, (150).
- Verbeck, G. J. and Landgren, R., 1960. Influence of physical characteristics of aggregates on frost resistance of concrete.
- Vuorinen, J. 1969. On the behaviour of hardened concrete during freezing: Experimental studies on the application of the one-cycle freezing test in combination with porosity determinations for the evaluation of the freezing-and-thawing resistance of hardened concrete: Dissertation. VTT Technical Research Centre of Finland.
- Wang, L., Tian, Z., Ma, G. and Zhang, M., 2020. Interlayer bonding improvement of 3D printed concrete with polymer modified mortar: Experiments and molecular dynamics studies. *Cement and Concrete Composites*, 103571.
- Washburn, E. W., 1921. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material. *Proceedings of the National academy of Sciences of the United States of America*, 7(4), 115.
- Weng, Y., Lu, B., Li, M., Liu, Z., Tan, M. J. and Qian, S., 2018. Empirical models to predict rheological properties of fiber reinforced cementitious composites for 3D printing. *Construction and Building Materials*, 189, 676-685.
- Wolfs, R., 2015. 3D printing of concrete structures. Graduation thesis, Eindhoven University of Technology, Department of the Built Environment Master Architecture, Building and Planning Specialization Structural Design, Netherlands.
- Wolfs, R. J., Bos, F. P. and Salet, T. A. M., 2018. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. *Cement and Concrete Research*, 106, 103-116.

- Wolfs, R. J. M., Bos, F. P. and Salet, T. A. M., 2019. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*, 119, 132-140.
- Wong, H. S., Pappas, A. M., Zimmerman, R. W. and Buenfeld, N. R., 2011. Effect of entrained air voids on the microstructure and mass transport properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 41(10), 1067-1077.
- Wu, P., Wang, J. and Wang, X., 2016. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, 68: 21-31.
- Yukselen, Y. (2007). Specific surface area and pore size distribution effect on engineering properties of fine-grained soils (Doctoral dissertation, PhD Thesis, Dokuz Eylül University, Izmir, Turkey).
- Zareiyan, B. and Khoshnevis, B., 2017. Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete. *Automation in Construction*, 83, 212-221.
- Zhang, Y., Zhang, Y., Liu, G., Yang, Y., Wu, M. and Pang, B., 2018. Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink. *Construction and building materials*, 174, 263-271.
- Zhang, G., Yu, H., Li, H. and Yang, Y., 2019. Experimental study of deformation of early age concrete suffering from frost damage. *Construction and Building Materials*, 215, 410-421.
- Zhang, X., Zhang, H., Gao, H., He, Y. and Jiang, M., 2019a. Effect of bubble feature parameters on rheological properties of fresh concrete. *Construction and Building Materials*, 196, 245-255.
- Zhang, Y., Liu, C., Liu, Z., Liu, G. and Yang, L., 2017. Modelling of diffusion behavior of ions in low-density and high-density calcium silicate hydrate. *Construction and Building Materials*, 155, 965-980.
- Zhang, Y., Zhang, Y., She, W., Yang, L., Liu, G. and Yang, Y., 2019b. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. *Construction and Building Materials*, 201, 278-285.
- Zhang, Z. and Ansari, F., 2006. Fracture mechanics of air-entrained concrete subjected to compression. *Engineering fracture mechanics*, 73(13), 1913-1924.
- Zhou, Z. Y. and Mihashi, H., 2008. Micromechanics model to describe strain behavior of concrete in freezing process. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(1), 46-53.
- Zuber, B. and Marchand, J., 2000. Modeling the deterioration of hydrated cement systems exposed to frost action: Part 1: Description of the mathematical model. *Cement and Concrete Research*, 30(12), 1929-1939.

## EKLER

### EK-1. 3D Beton Karışımı Oluşturma Ön Çalışmaları

3D beton tasarımı sürecine ilk önce aşağıdaki çizelgede verilmiş olan karışım hesabının uygulanmasıyla başlanmıştır. Ardından aşama aşama eklenen katkılar ve değiştirilen oranlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

deneme 1: ) 01.09.2019					
Bileşen Adı	Ağırlık	Hacim	Öz.ağ.	Nem (%)	Net ağırlıklar
Çimento	500.00	158.73	3.15		400.00
Su (0.40)	200.00	200.00	1		223.10
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88		100.00
PROPİLEN %0.5	3.34	3.67	0.91		3.34
KİL %2	10.00	5.00	2		10.00
Süperakışkanlaştırıcı (%0.8)	4.00	3.64	1.1		4.00
Priz Hız. Sıvı (%1)	5.00	3.33	1.5		5.00
VMA (%0.18 * 0.1mm altı)	1.00	0.99	1.01		1.00
Hava (%1)	0.00	10.00			
İnce Agregası	500.00	204.92	2.44	-3.66	18.30
İri Agregası	250.00	100.40	2.49	-1.92	4.80
TOPLAM	1573.34	725.40	2.16892		769.54

1. Üretilen bu karışım 0,4 su/çimento oranına rağmen oldukça koyu kıvamlı bir karışım elde edildi. Süperakışkanlaştırıcı ve VMA (viskozite düzenleyici katkı) oranının artırılmasına ve lif oranının azaltılmasına karar verildi. Buna göre oluşturulan yeni karışım hesabı aşağıdaki gibi oldu.

deneme 2: ) 02.09.2019					
Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm3)	Öz.ağ. (g/cm3)	Nem (%)	Net ağırlıklar
Çimento	500.00	158.73	3.15		400.00
Su (0.40)	200.00	200.00	1		223.10
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88		100.00
POLİPROPİLEN LİF %0.3	2.00	2.20	0.91		2.00
KİL %2	10.00	5.00	2		10.00
Süperakışkanlaştırıcı (%1)	5.00	4.55	1.1		5.00
Priz Hız. Sıvı (%1)	5.00	3.33	1.5		5.00
VMA (%0.5 * 0.1mm altı)	2.79	2.76	1.01		2.79
Hava (%1)	0.00	10.00			
İnce Agregası	500.00	204.92	2.44	-3.66	18.30
İri Agregası	250.00	100.40	2.49	-1.92	4.80
TOPLAM	1574.79	726.61	2.167304		770.99

2. Üretilen 2. karışımın da çok akışkan olması nedeniyle VMA oranının azaltılmasına karar verildi. Azaltılan VMA oranını telafi etmesi amacıyla da su/çimento oranının

artırılmasına ve lif oranının azaltılmasına karar verildi. Aşağıdaki yeni karışım hesabı uygulandı.

deneme 3 : ) 03.09.2019							
Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Öz.ağ. (g/cm <sup>3</sup> )	Nem (%)	İlave Su	Net ağırlıklar	Basınç Day.
Çimento	500.00	158.73	3.15			500.00	21 Mpa (5x5x5 lük küp numune)
Su (0.45)	225.00	225.00	1			248.10	
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88			100.00	
POLİPROPİLEN LİF %0.22	1.50	1.65	0.91			1.50	
KİL %2	10.00	5.00	2			10.00	
Süperakışkanlaştırıcı (%1)	5.00	4.55	1.1			5.00	
Priz Hız. Sıvı (%1)	5.00	3.33	1.5			5.00	
VMA (%0.268 * 0.1mm altı)	1.50	1.48	1.01			1.50	
Hava (%1)	0.00	10.00					
İnce Agregata	500.00	204.92	2.44	-3.66	18.30	500.00	
İri Agregata	250.00	100.40	2.49	-1.92	4.80	250.00	
<b>TOPLAM</b>	<b>1597.99</b>	<b>749.78</b>	<b>2.131291</b>			<b>1621.09</b>	

**Karışım Oluşturma:** Karşıma önce tüm kuru ve toz malzemeler ilave edildi (Çimento, YFC, Agregalar, Kil ve Polipropilen lif). Bütün karışım harç mikserine alınarak düşük hızda 1dk karıldı. Ardından suyun yansına akışkanlaştırıcı ilave edilerek karşıma eklendi 1 dk orta hızda karıştırıldı. Suyun kalan yansı VMA ve Priz hızlandırıcıya eklendi. Sırasıyla VMA ve Priz Hız. karşıma eklenerek 1 er dakika yüksek hızda karıştırıldı. 1 dk dinlendirilen karışım tekrar 1 dk yüksek hızda karıştırılarak kalıba hazır hale getirildi.

3. Üretilen yeni karışımın da çok akışkan olması ve 3D beton özelliklerini taşıması nedeniyle su /çimento oranı ve VMA oranının tekrar azaltılmasına karar verildi. Ayrıca yapılan literatür araştırmasına göre kil oranı ve lif oranı değiştirildi. Aşağıdaki karışım denendi.

deneme 4 : ) 05.09.2019							
Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Öz.ağ. (g/cm <sup>3</sup> )	Nem (%)	İlave Su	Net ağırlıklar	
Çimento	500.00	158.73	3.15			1000.00	
Su (0.40)	200.00	200.00	1			446.20	
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88			200.00	
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.31	1.44	0.91			2.62	
KİL %0.3	1.50	0.75	2			3.00	
Süperakışkanlaştırıcı (%1)	5.00	4.55	1.1			10.00	
Priz Hız. Sıvı (%1)	5.00	3.33	1.5			10.00	
VMA (%0.15 * 0.1mm altı)	0.99	0.98	1.01			1.97	
Hava (%1)	0.00	10.00					
İnce Agregata	500.00	204.92	2.44	-3.66	18.30	1000.00	
İri Agregata	250.00	100.40	2.49	-1.92	4.80	500.00	
<b>TOPLAM</b>	<b>1563.80</b>	<b>719.82</b>	<b>2.17249</b>			<b>3127.59</b>	

4. Tabakaların kendini tutmamasından dolayı agregata granülometrisinin değiştirilmesine, lif oranının, su/çim oranının ve VMA oranının artırılmasına karar verildi. Aşağıdaki karışım uygulandı.

deneme 5: ) 05.09.2019						
Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm3)	Öz.ağ. (g/cm3)	Nem (%)	İlave Su	Net ağırlıklar
Çimento	500.00	158.73	3.15			1000.00
Su (0.50)	250.00	250.00	1			555.80
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88			200.00
POLİPROPİLEN LİF %0.3	2.24	2.46	0.91			4.48
KİL %0.3	1.50	0.75	2			3.00
Süperakışkanlaştırıcı (%0.1)	5.02	4.57	1.1			10.04
Priz Hız. Sıvı (%1)	5.00	3.33	1.5			10.00
VMA (%0.3 * 0.1mm altı)	2.06	2.04	1.01			4.12
Hava (%1)	0.00	10.00				
İnce Agregata	500.00	204.92	2.44	-3.66	18.30	1000.00
İri Agregata	500.00	200.80	2.49	-1.92	9.60	1000.00
<b>TOPLAM</b>	<b>1865.82</b>	<b>872.32</b>	<b>2.138912</b>			<b>3731.64</b>

5. Karışım hesabı yeniden gözden geçirildi ve aşağıdaki 1m<sup>3</sup> için tasarlanan yeni karışım uygulandı.

Karışım: 16.09.2019							
Bileşen Adı	Ağırlık	Hacim	Öz.ağ.	Nem (%)	Net ağırlıklar	ilave su	0.09 dm3 için
Çimento	690	219.05	3.15		552.00		0.502
Su (0.40)	276	276	1		299.63		0.273
YFC(%20)	138	61.33	2.25		138.00		0.126
PP lif %0.2	1.82	2.00	0.91		1.82		0.002
Süperakışkanlaştırıcı (%1)	6.9	6.48	1.065		6.90		0.006
Priz Hız. Sıvı (%1)	6.9	4.60	1.5				
Kil %0.3	2.07	1.04	2				
VMA (%0.15 * 0.1mm altı)	1.362	1.35	1.01				
Hava (%1)	0	10					
Agregata için kalan hacim:		418.16					
0.5 mm (%66.5)	678.50	278.07	2.44	-3.66	654.54	23.96	0.596
1 mm (%33.5)	348.81	140.08	2.49	-1.92	342.23	6.57	0.311
<b>TOPLAM</b>	<b>2150.358</b>	<b>1000.00</b>			<b>1995.13</b>	<b>23.63</b>	<b>1.816</b>

6. Uygun kıvam elde edilemedi ve aşağıdaki hesap uygulandı.

kontrol grubu ) 02.10.2019						
Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm3)	Öz.ağ. (g/cm3)	Nem (%)	İlave Su	Net ağırlıklar
Çimento	500.00	158.73	3.15			1000.00
Su (0.40)	200.00	200.00	1			446.20
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88			200.00
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.31	1.44	0.91			2.62
KİL %0.3	1.50	0.75	2			3.00
Süperakışkanlaştırıcı (%1)	5.00	4.55	1.1			10.00
Priz Hız. Sıvı (%1)	5.00	3.33	1.5			10.00
VMA (%0.1 * 0.1mm altı)	0.66	0.65	1.01			1.32
Hava (%1)	0.00	10.00				
İnce Agregası	500.00	204.92	2.44	-3.66	18.30	1000.00
İri Agregası	250.00	100.40	2.49	-1.92	4.80	500.00
<b>TOPLAM</b>	<b>1563.47</b>	<b>719.49</b>	<b>2.173018</b>			<b>3126.93</b>

7. Karışım oldukça erken katılaştığından priz hızlandırıcı kullanılmamasına karar verildi ve aşağıdaki hesap uygulandı

kontrol grubu ) 15.10.2019						
Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm3)	Öz.ağ. (g/cm3)	Nem (%)	İlave Su	Net ağırlıklar
Çimento	500.00	158.73	3.15			1000.00
Su (0.40)	200.00	200.00	1			446.20
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88			200.00
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.35	1.48	0.91			2.70
KİL %0.3	1.80	0.90	2			3.60
Süperakışkanlaştırıcı (%1)	6.00	5.45	1.1			12.00
Priz Hız. Sıvı (%1)	0.00	0.00	1.5			0.00
VMA (%0.15 * 0.1mm altı)	0.66	0.65	1.01			1.32
Hava (%1)	0.00	10.00				
İnce Agregası	500.00	204.92	2.44	-3.66	18.30	1000.00
İri Agregası	250.00	100.40	2.49	-1.92	4.80	500.00
<b>TOPLAM</b>	<b>1559.81</b>	<b>717.26</b>	<b>2.174669</b>			<b>3119.62</b>

8. Uygun 3D baskılanabilir beton elde edilemediğinden akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı türünün değiştirilmesine (akışkanlaştırıcı adı: T803, Priz hızlandırıcı: SA 194) ve karışıma kıvam düzenleyici (Kıvam düzenleyici adı: MS 685) katkı eklenmesine karar verildi ve aşağıdaki karışım uygulandı

T803 akışk + SA194 priz hız ) 1.11.2019						
Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm3)	Öz.ağ. (g/cm3)	Nem (%)	İlave Su	Net ağırlıklar
Çimento	500.00	158.73	3.15			1000.00
Su (0.40)	200.00	200.00	1			446.20
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88			200.00
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.32	1.45	0.91			2.63
KİL %0.3	1.80	0.90	2			3.60
VMA (%0.1 * 0.1mm altı)	0.66	0.65	1.01			1.32
KIVAM AYARLYCI MS685 (%0.5)	3.00	2.65	1.13			6.00
AKIŞKANLAŞTIRICI T803 (%1)	6.00	5.54	1.084			12.00
PRİZ HIZ. SA 194 (%1)	6.00	4.00	1.5			12.00
Hava (%1)	0.00	10.00				0.00
İnce Agregası	500.00	204.92	2.44	-3.66	18.30	1000.00
İri Agregası	250.00	100.40	2.49	-1.92	4.80	500.00
<b>TOPLAM</b>	<b>1568.77</b>	<b>723.96</b>	<b>2.166936</b>			<b>3137.55</b>

9. Priz başlama süresinin etkisini görebilmek için toz priz hızlandırıcı (SA 545) kullanılmasına karar verildi ve aşağıdaki karışım uygulandı.

01.11.2019						
Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm3)	Öz.ağ. (g/cm3)	Nem (%)	İlave Su	Net ağırlıklar
Çimento	500.00	158.73	3.15			1000.00
Su (0.40)	200.00	200.00	1			446.20
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88			200.00
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.32	1.45	0.91			2.64
KİL %0.3	1.80	0.90	2			3.60
VMA (%0.1 * 0.1mm altı)	0.66	0.65	1.01			1.32
KIVAM AYARLYCI MS685 (%0.5)	3.00	2.65	1.13			6.00
AKIŞKANKŞTRCI T803 (%1)	6.00	5.54	1.084			12.00
PRİZ HIZ. SA 545 (%1)	6.00	5.83	1.03			12.00
Hava (%1)	0.00	10.00				0.00
İnce Agregat	500.00	204.92	2.44	-3.66	18.30	1000.00
İri Agregat	250.00	100.40	2.49	-1.92	4.80	500.00
<b>TOPLAM</b>	<b>1568.78</b>	<b>725.79</b>	<b>2.16148</b>			<b>3137.56</b>

10. Priz süresi bir türlü ayarlanamadı ya çok erken katılaşmaya başladı karışım ekstrüde edilemedi ya da geç başladığından tabakalar birbirini taşımadı. Bu nedenle hidrasyon durdurucu katkı (HCA 20) eklenmesine karar verildi ve aşağıdaki hesap denendi.

T803+HCA20+SA545 ) 2.11.2019						
Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm3)	Öz.ağ. (g/cm3)	Nem (%)	İlave Su	Net ağırlıklar
Çimento	500.00	158.73	3.15			1000.00
Su (0.40)	200.00	200.00	1			436.20
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88			200.00
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.32	1.45	0.91			2.65
KİL %0.3	1.80	0.90	2			3.60
VMA (%0.1 * 0.1mm altı)	0.66	0.65	1.01			1.32
KIVAM AYARLYCI MS685 (%0.5)	3.00	2.65	1.13			6.00
AKIŞKANKŞTRCI T803 (%0.5)	3.00	2.77	1.084			6.00
HİDR. KONT HCA20 (%0.3)	1.80	1.64	1.1			3.60
PRİZ HIZ. SA 545 (%1)	6.00	5.83	1.03			12.00
Hava (%1)	0.00	10.00				0.00
İnce Agregat	500.00	204.92	2.44	-2.66	13.30	1000.00
İri Agregat	250.00	100.40	2.49	-1.92	4.80	500.00
<b>TOPLAM</b>	<b>1567.58</b>	<b>724.66</b>	<b>2.163191</b>			<b>3135.16</b>

11. Çok katı kıvam elde edildiğinden katkı oranları yeniden düzenlendi ve aşağıdaki karışım uygulandı.



<b>T803+HCA20 ) 2.11.2019</b>						
Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm3)	Öz.ağ. (g/cm3)	Nem (%)	İlave Su	Net ağırlıklar
Çimento	500.00	158.73	3.15			1000.00
Su (0.40)	200.00	200.00	1			446.20
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88			200.00
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.32	1.45	0.91			2.63
KİL %0.3	1.80	0.90	2			3.60
VMA (%0.1 * 0.1mm altı)	0.66	0.65	1.01			1.32
KIVAM AYARLYCI MS685 (%0.5)	3.00	2.65	1.13			6.00
AKIŞKANKŞTRCI T803 (%1)	6.00	5.54	1.084			12.00
HİDR. KONT HCA20 (%0.6)	3.60	3.27	1.1			7.20
Hava (%1)	0.00	10.00				0.00
İnce Agregata	500.00	204.92	2.44	-3.66	18.30	1000.00
İri Agregata	250.00	100.40	2.49	-1.92	4.80	500.00
<b>TOPLAM</b>	<b>1566.37</b>	<b>723.23</b>	<b>2.165797</b>			<b>3132.75</b>

12. Yine çok sıvı bir karışım elde edildiğinden karışım hesabı yeniden düzenlendi .

<b>T803+HCA20+SA545 ) 3.11.2019</b>						
Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm3)	Öz.ağ. (g/cm3)	Nem (%)	İlave Su	Net ağırlıklar
Çimento	500.00	158.73	3.15			1000.00
Su (0.40)	200.00	200.00	1			446.20
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88			200.00
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.32	1.45	0.91			2.65
KİL %0.3	1.80	0.90	2			3.60
VMA (%0.1 * 0.1mm altı)	0.66	0.65	1.01			1.32
KIVAM AYARLYCI MS685 (%0.5)	3.00	2.65	1.13			6.00
AKIŞKANKŞTRCI T803 (%1)	6.00	5.54	1.084			12.00
HİDR. KONT HCA20 (%0.3)	1.80	1.64	1.1			3.60
PRİZ HİZ. SA 545 (%1)	6.00	5.83	1.03			12.00
Hava (%1)	0.00	10.00				0.00
İnce Agregata	500.00	204.92	2.44	-3.66	18.30	1000.00
İri Agregata	250.00	100.40	2.49	-1.92	4.80	500.00
<b>TOPLAM</b>	<b>1570.58</b>	<b>727.43</b>	<b>2.159085</b>			<b>3141.16</b>

13. İstenilen özellikler sağlanamadı. Akışkan kıvamlı beton olduğundan su/bağlayıcı oranının azaltılmasına karar verildi. Yeni karışım hesabı aşağıdaki gibi oldu.

<b>T803+HCA20+SA545 ) 5.11.2019</b>						
Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm3)	Öz.ağ. (g/cm3)	Nem (%)	İlave Su	Net ağırlıklar
Çimento	500.00	158.73	3.15			1000.00
Su (0.35)	175.00	175.00	1			396.20
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88			200.00
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.32	1.45	0.91			2.65
KİL %0.3	1.80	0.90	2			3.60
VMA (%0.1 * 0.1mm altı)	0.66	0.65	1.01			1.32
KIVAM AYARLYCI MS685 (%0.5)	3.00	2.65	1.13			6.00
AKIŞKANKŞTRCI T803 (%1)	6.00	5.54	1.084			12.00
HİDR. KONT HCA20 (%0.3)	1.80	1.64	1.1			3.60
PRİZ HİZ. SA 545 (%1)	6.00	5.83	1.03			12.00
Hava (%1)	0.00	10.00				0.00
İnce Agregata	500.00	204.92	2.44	-3.66	18.30	1000.00
İri Agregata	250.00	100.40	2.49	-1.92	4.80	500.00
<b>TOPLAM</b>	<b>1545.58</b>	<b>702.43</b>	<b>2.200338</b>			<b>3091.16</b>

14. Oldukça yoğun kıvamlı bir beton elde edildi. Ekstrüde edilemedi. Ayrıca dökümden 20 dakika sonra şekil verilebilirlik özelliğini kaybetti. Su/bağlayıcı oranının

değiştirilmesine ve sıvı priz hızlandırıcı katkı kullanılmasına karar verildi. Yeni karışım hesabı aşağıdaki gibi oldu.

T803+HCA20 + SA 194) 5.11.2019						
Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm3)	Öz.ağ. (g/cm3)	Nem (%)	İlave Su	Net ağırlıklar
Çimento	500.00	158.73	3.15			1000.00
Su (0.35)	210.00	210.00	1			466.20
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88			200.00
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.34	1.47	0.91			2.68
KİL %0.3	1.80	0.90	2			3.60
VMA (%0.1 * 0.1mm altı)	0.66	0.65	1.01			1.32
KIVAM AYARLYCI MS685 (%0.5)	3.00	2.65	1.13			6.00
AKIŞKANLAŞTIRICI T803 (%0.8)	4.80	4.43	1.084			9.60
HİDR. KONT HCA20 (%0.3)	1.80	1.64	1.1			3.60
PRİZ HIZ. SA 194 (%1)	6.00	4.00	1.5			12.00
Hava (%1)	0.00	10.00				0.00
İnce Agregası	500.00	204.92	2.44	-3.66	18.30	1000.00
İri Agregası	250.00	100.40	2.49	-1.92	4.80	500.00
<b>TOPLAM</b>	<b>1579.40</b>	<b>734.51</b>	<b>2.150263</b>			<b>3158.79</b>

15. Kıvamı oldukça ideal bir karışım elde edildi. Fakat dökümden hemen sonra nozuldan akış iyi olmasına rağmen yarım saat sonra sertleşmeye başladı ve nozul ucundan akış sağlanamadı. Akışkanlaştırıcı oranının artırılmasına karar verildi. Yeni karışım hesabı aşağıdaki gibi oldu.

T803+HCA20 + SA 194) 5.11.2019						
Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm3)	Öz.ağ. (g/cm3)	Nem (%)	İlave Su	Net ağırlıklar
Çimento	500.00	158.73	3.15			1000.00
Su (0.30)	180.00	180.00	1			406.20
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88			200.00
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.33	1.47	0.91			2.67
KİL %0.3	1.80	0.90	2			3.60
VMA (%0.1 * 0.1mm altı)	0.65	0.64	1.01			1.30
KIVAM AYARLYCI MS685 (%0.5)	3.00	2.65	1.13			6.00
AKIŞKANLAŞTIRICI T803 (%1)	6.00	5.54	1.084			12.00
HİDR. KONT HCA20 (%0.3)	1.80	1.64	1.1			3.60
PRİZ HIZ. SA 194 (%1)	6.00	4.00	1.5			12.00
Hava (%1)	0.00	10.00				0.00
İnce Agregası	250.00	102.46	2.44	-3.66	18.30	500.00
İri Agregası	500.00	200.80	2.49	-1.92	4.80	1000.00
<b>TOPLAM</b>	<b>1550.58</b>	<b>703.55</b>	<b>2.203945</b>			<b>3101.16</b>

16. Oldukça ideal özelliklere sahip bir 3D betonu elde edildi. Tabakalar üst üste çok rahat döküldü ve tabakalar şeklini koruyarak üstteki tabakaları taşıyabildi. Bir mitar koyu kıvamlı olduğu düşünüldü. Planlanan parametreler hava sürükleyici katkı oranı olduğu için bu hava sürükleyici katkının ve bu katkıyla birlikte kullanılacak olan priz geciktirici katkının da etkilerini görebilmek adına tasarlanan yeni karışım hesabı aşağıdaki gibi oldu

Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm3)	Öz.ağ. (g/cm3)	Nem (%)	İlave Su	Net ağırlıklar
Çimento	500.00	158.73	3.15			1000.00
Su (0.30)	180.00	180.00	1			406.20
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88			200.00
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.28	1.41	0.91			2.57
KİL %0.3	1.80	0.90	2			3.60
VMA (%0.1 * 0.1mm altı)	0.65	0.64	1.01			1.30
KIVAM AYARLYCI MS685 (%0.5)	3.00	2.65	1.13			6.00
AKIŞKANKŞTRCI T803 (%1)	6.00	5.54	1.084			12.00
HİDR. KONT HCA20 (%0.3)	1.80	1.64	1.1			3.60
PRİZ HIZ. SA 194 (%1)	6.00	4.00	1.5			12.00
HAVASÜRÜKLEYİCİ (%0.1)	0.60	0.57	1.05			1.20
PRİZ GEC. SET R2 (%0.3)	1.80	1.54	1.17			3.60
Hava (%1)	0.00	10.00				0.00
İnce Agregata	250.00	102.46	2.44	-3.66	18.30	500.00
İri Agregata	500.00	200.80	2.49	-1.92	4.80	1000.00
<b>TOPLAM</b>	<b>1552.93</b>	<b>705.60</b>	<b>2.200855</b>			<b>3105.87</b>

17. Kıvam bir önceki dökümdeki gibi yoğun oldu. Hava sürükleyici ve priz hızlandırıcı katkının etkisi çok hissedilmedi. Su/bağlayıcı oranının artırılmasına karar verildi. Yeni karışım hesabı aşağıdaki gibi oldu

Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm3)	Öz.ağ. (g/cm3)	Nem (%)	İlave Su	Net ağırlıklar
Çimento	500.00	158.73	3.15			1000.00
Su (0.35)	210.00	210.00	1			466.20
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88			200.00
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.34	1.47	0.91			2.68
KİL %0.3	1.80	0.90	2			3.60
VMA (%0.1 * 0.1mm altı)	0.65	0.64	1.01			1.30
KIVAM AYARLYCI MS685 (%0.5)	3.00	2.65	1.13			6.00
AKIŞKANKŞTRCI T803 (%1)	6.00	5.54	1.084			12.00
HİDR. KONT HCA20 (%0.3)	1.80	1.64	1.1			3.60
PRİZ HIZ. SA 194 (%1)	6.00	4.00	1.5			12.00
HAVASÜRÜKLEYİCİ (%0.1)	0.60	0.57	1.05			1.20
PRİZ GEC. SET R2 (%0.3)	1.80	1.54	1.17			3.60
Hava (%1)	0.00	10.00				0.00
İnce Agregata	250.00	102.46	2.44	-3.66	18.30	500.00
İri Agregata	500.00	200.80	2.49	-1.92	4.80	1000.00
<b>TOPLAM</b>	<b>1582.99</b>	<b>735.66</b>	<b>2.15178</b>			<b>3165.98</b>

18. Uygun kıvamda ve özelliklerde 3D beton karışımı elde edildikten sonra çalışmanın değişken parametresini oluşturan hava sürükleyici katkı ve oranları denenmeye başlandı.

T803+HCA20 + SA 194) 14.11.2019						
Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm3)	Öz.ağ. (g/cm3)	Nem (%)	İlave Su	Net ağırlıklar
Çimento	500.00	158.73	3.15			1000.00
Su (0.35)	210.00	210.00	1			466.20
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88			200.00
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.34	1.47	0.91			2.68
KİL %0.3	1.80	0.90	2			3.60
VMA (%0.1 * 0.1mm altı)	0.65	0.64	1.01			1.30
KIVAM AYARLYCI MS685 (%0.5)	3.00	2.65	1.13			6.00
AKIŞKANKŞTRCI T803 (%1)	6.00	5.54	1.084			12.00
HİDR. KONT HCA20 (%0.3)	1.80	1.64	1.1			3.60
PRİZ HIZ. SA 194 (%1)	6.00	4.00	1.5			12.00
HAVASÜRÜKLEYİCİ (%0.35)	2.10	2.00	1.05			4.20
PRİZ GEC. SET R2 (%0.3)	1.80	1.54	1.17			3.60
Hava (%1)	0.00	10.00				0.00
İnce Agregata	250.00	102.46	2.44	-3.66	18.30	500.00
İri Agregata	500.00	200.80	2.49	-1.92	4.80	1000.00
<b>TOPLAM</b>	<b>1584.49</b>	<b>737.09</b>	<b>2.149644</b>			<b>3168.98</b>

19. Kıvamı en az oranda hava sürükleyici katkı kullanılan gruba göre oldukça akışkan bir beton elde edildi. Üst üste döküm sırasında alttaki tabakalarda ezilmeler meydana geldi. Karıştırılma devam ettikçe kıvıma daha uygun bir hale geldi. Değiştirilen AEA oranına göre yeni karışım aşağıdaki gibi oldu:

T803+HCA20 + SA 194) 14.11.2019						
Bileşen Adı	Ağırlık (g)	Hacim (cm3)	Öz.ağ. (g/cm3)	Nem (%)	İlave Su	Net ağırlıklar
Çimento	500.00	158.73	3.15			1000.00
Su (0.35)	210.00	210.00	1			466.20
YFC(%20)	100.00	34.72	2.88			200.00
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.34	1.47	0.91			2.68
KİL %0.3	1.80	0.90	2			3.60
VMA (%0.1 * 0.1mm altı)	0.65	0.64	1.01			1.30
KIVAM AYARLYCI MS685 (%0.5)	3.00	2.65	1.13			6.00
AKIŞKANKŞTRCI T803 (%1)	6.00	5.54	1.084			12.00
HİDR. KONT HCA20 (%0.3)	1.80	1.64	1.1			3.60
PRİZ HIZ. SA 194 (%1)	6.00	4.00	1.5			12.00
HAVASÜRÜKLEYİCİ (%0.6)	3.60	3.43	1.05			7.20
PRİZ GEC. SET R2 (%0.3)	1.80	1.54	1.17			3.60
Hava (%1)	0.00	10.00				0.00
İnce Agregası	250.00	102.46	2.44	-3.66	18.30	500.00
İri Agregası	500.00	200.80	2.49	-1.92	4.80	1000.00
<b>TOPLAM</b>	<b>1585.99</b>	<b>738.52</b>	<b>2.147517</b>			<b>3171.98</b>

20. Yapılan bir çok denemeden sonra nihayet olarak karar verilen ve hava sürükleyici katkı oranına göre değişen karışım hesapları aşağıdaki gibi oldu.

taze beton deneyleri için:1000 dm3 için karışım (AEA %0)								
Bileşen Adı	Ağırlık	Hacim	Öz.ağ.	Nem (%)	Net ağırlıkla	İlave su	160 dm3 için	0.4dm3
Çimento	680.18	215.93	3.15		680.18		108.829	0.2721
Su (0.35)	285.68	285.68	1		280.74		44.918	0.1123
YFC(%20)	136.04	47.23	2.88		136.04		21.766	0.0544
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.82	2.00	0.91		1.82		0.291	0.0007
KİL %0.3	2.45	1.22	2		2.45		0.392	0.0010
VMA (%0.1 * 0.1mm altı)	0.88	0.89	1.01		0.88		0.141	0.0004
KIVAM AYARLYCI MS685 (%0.5)	4.08	3.61	1.13		4.08		0.653	0.0016
AKIŞKANKŞTRCI T803 (%1)	8.16	7.53	1.084		8.16		1.306	0.0033
HİDR. KONT HCA20 (%0.5)	4.08	3.71	1.1		4.08		0.653	0.0016
PRİZ HIZ. SA 194 (%1)	8.16	4.08	2		8.16		1.306	0.0033
HAVASÜRÜKLEYİCİ (%0.)	0.00	0.00	1.05		0.00		0.000	0.0000
PRİZ GEC. SET R2 (%0.5)	4.08	10.00	1.17		4.08		0.653	0.0016
Hava (%1)	0.00	10.00	0					
Agregası için kalan hacim:		408.11						
0.5 mm (%33.5)	333.59	136.72	2.44	-3.66	321.81	11.78	51.490	0.1287
1 mm (%66.5)	675.77	271.40	2.49	-1.92	663.04	12.73	106.087	0.2652
								0.0000
<b>TOPLAM</b>	<b>2144.97</b>	<b>1000.00</b>			<b>2115.53</b>	<b>-4.94</b>	<b>338.484</b>	<b>0.8462</b>

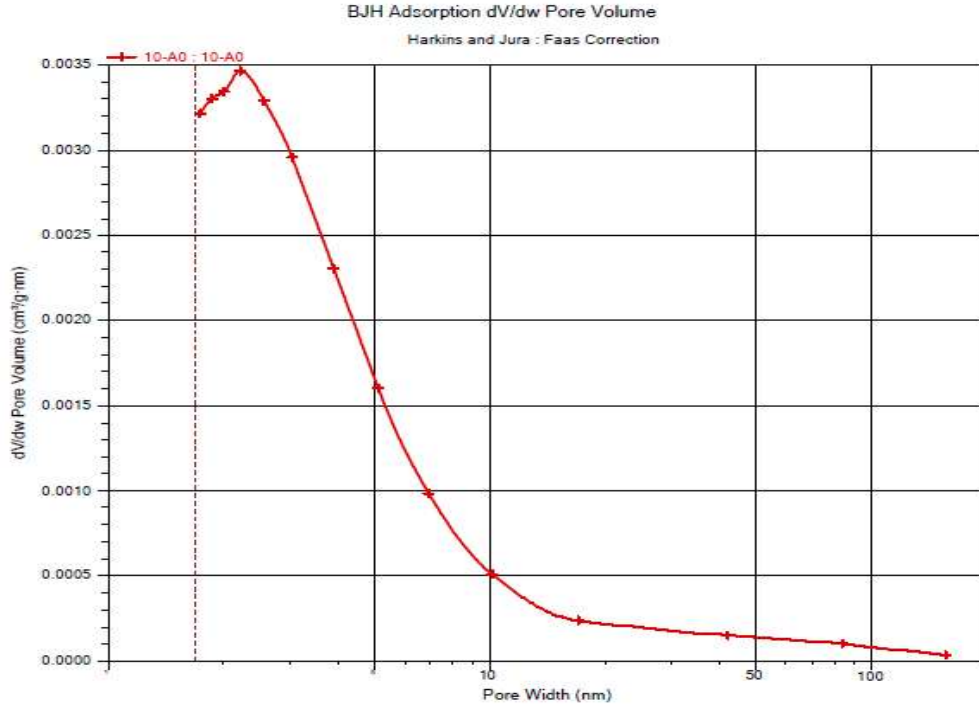
taze beton deneyleri için:1000 dm3 için karışım (AEA %0.1)							
Bileşen Adı	Ağırlık	Hacim	Öz.ağ.	Nem (%)	Net ağırlıkla	İlave su	160 dm3 için
Çimento	680.18	215.93	3.15		680.18		108.829
Su (0.35)	285.68	285.68	1		279.87		44.780
YFC(%20)	136.04	47.23	2.88		136.04		21.766
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.82	2.00	0.91		1.82		0.291
KİL %0.3	2.45	1.22	2		2.45		0.392
VMA (%0.1 * 0.1mm altı)	0.88	0.89	1.01		0.88		0.141
KIVAM AYARLYCI MS685 (%0.5)	4.08	3.61	1.13		4.08		0.653
AKIŞKANKŞTRCI T803 (%1)	8.16	7.53	1.084		8.16		1.306
HİDR. KONT HCA20 (%0.5)	4.08	3.71	1.1		4.08		0.653
PRİZ HIZ. SA 194 (%1)	8.16	4.08	2		8.16		1.306
HAVASÜRÜKLEYİCİ (%0.1)	0.82	0.78	1.05		0.82		0.131
PRİZ GEC. SET R2 (%0.5)	4.08	10.00	1.17		4.08		0.653
Hava (%1)	0.00	10.00	0				
Agrega için kalan hacim:		407.34					
0.5 mm (%33.5)	332.96	136.46	2.44	-3.66	321.20	11.76	51.392
1 mm (%66.5)	674.49	270.88	2.49	-1.92	661.78	12.71	105.885
TOPLAM	2143.87	1000.00			2113.60	-5.80	338.176

taze beton deneyleri için:1000 dm3 için karışım (AEA %0.15)							
Bileşen Adı	Ağırlık	Hacim	Öz.ağ.	Nem (%)	Net ağırlıklar	İlave su	160 dm3 için
Çimento	680.18	215.93	3.15		680.18		108.829
Su (0.35)	285.68	285.68	1		279.44		44.711
YFC(%20)	136.04	47.23	2.88		136.04		21.766
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.82	2.00	0.91		1.82		0.291
KİL %0.3	2.45	1.22	2		2.45		0.392
VMA (%0.1 * 0.1mm altı)	0.88	0.89	1.01		0.88		0.141
KIVAM AYARLYCI MS685 (%0.5)	4.08	3.61	1.13		4.08		0.653
AKIŞKANKŞTRCI T803 (%1)	8.16	7.53	1.084		8.16		1.306
HİDR. KONT HCA20 (%0.5)	4.08	3.71	1.1		4.08		0.653
PRİZ HIZ. SA 194 (%1)	8.16	4.08	2		8.16		1.306
HAVASÜRÜKLEYİCİ (%0.15)	1.22	1.17	1.05		1.22		0.196
PRİZ GEC. SET R2 (%0.5)	4.08	10.00	1.17		4.08		0.653
Hava (%1)	0.00	10.00	0				
Agrega için kalan hacim:		406.95					
0.5 mm (%33.5)	332.64	136.33	2.44	-3.66	320.89	11.74	51.343
1 mm (%66.5)	673.84	270.62	2.49	-1.92	661.15	12.69	105.784
TOPLAM	2143.31	1000.00			2112.64	-6.23	338.023

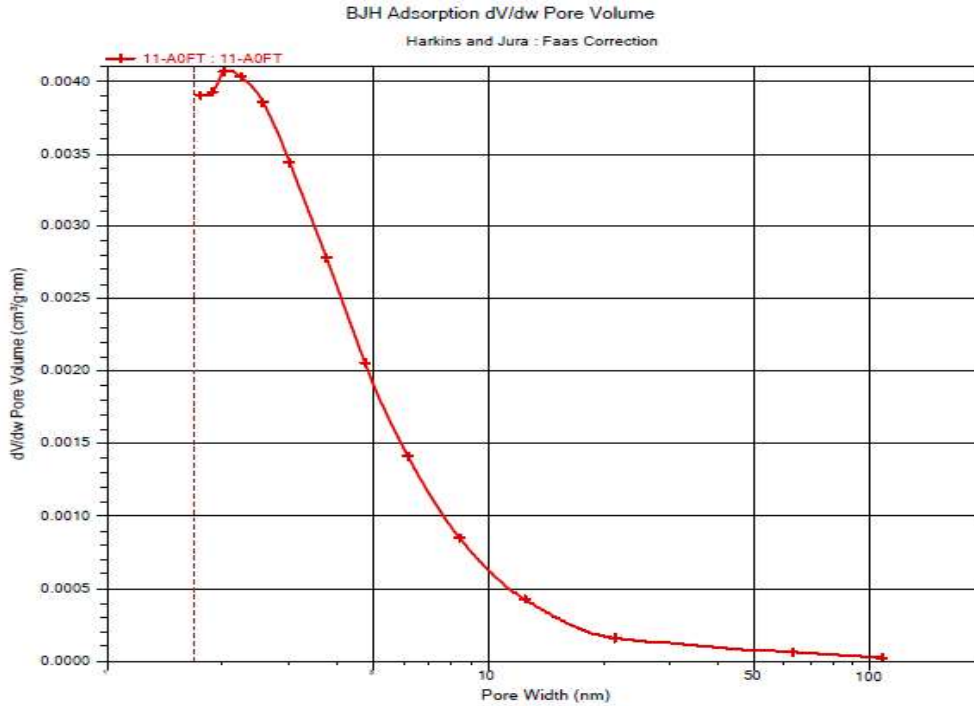
taze beton deneyleri için:1000 dm3 için karışım (AEA %0.2)							
Bileşen Adı	Ağırlık	Hacim	Öz.ağ.	Nem (%)	Net ağırlıklar	İlave su	160 dm3 için
Çimento	680.18	215.93	3.15		680.18		108.829
Su (0.35)	285.68	285.68	1		279.01		44.642
YFC(%20)	136.04	47.23	2.88		136.04		21.766
POLİPROPİLEN LİF %0.2	1.82	2.00	0.91		1.82		0.291
KİL %0.3	2.45	1.22	2		2.45		0.392
VMA (%0.1 * 0.1mm altı)	0.88	0.89	1.01		0.88		0.141
KIVAM AYARLYCI MS685 (%0.5)	4.08	3.61	1.13		4.08		0.653
AKIŞKANKŞTRCI T803 (%1)	8.16	7.53	1.084		8.16		1.306
HİDR. KONT HCA20 (%0.5)	4.08	3.71	1.1		4.08		0.653
PRİZ HIZ. SA 194 (%1)	8.16	4.08	2		8.16		1.306
HAVASÜRÜKLEYİCİ (%0.2)	1.63	1.55	1.05		1.63		0.261
PRİZ GEC. SET R2 (%0.5)	4.08	10.00	1.17		4.08		0.653
Hava (%1)	0.00	10.00	0				
Agrega için kalan hacim:		406.56					
0.5 mm (%33.5)	332.32	136.20	2.44	-3.66	320.59	11.73	51.294
1 mm (%66.5)	673.20	270.36	2.49	-1.92	660.52	12.68	105.683
TOPLAM	2142.76	1000.00			2111.68	-6.66	337.869

## EK-2. BET Analizi Sonuçları

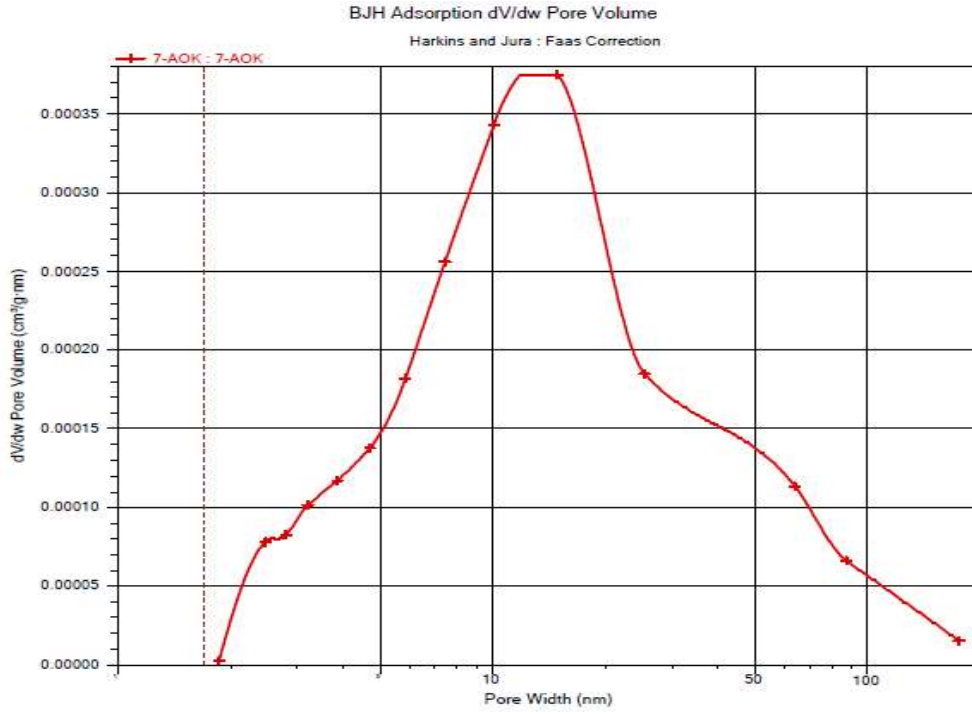
### 1. A0 Numunesi Boşluk-Boyut Dağılımı



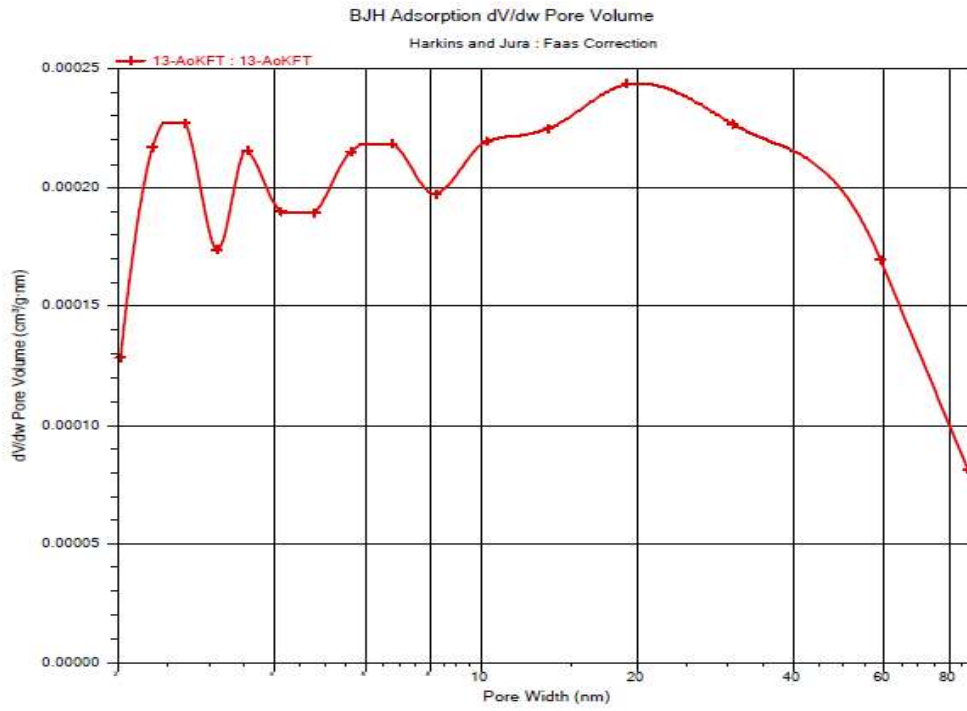
### 2. A0 F-T Numunesi Boşluk-Boyut Dağılımı



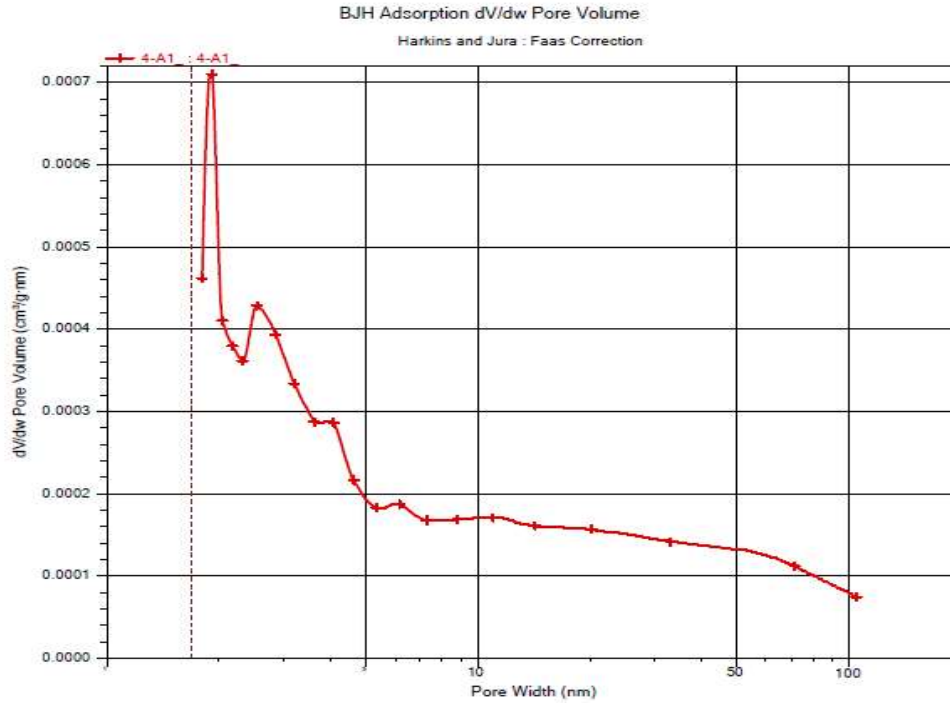
### 3. AOK Numunesi Boşluk-Boyut Dağılımı



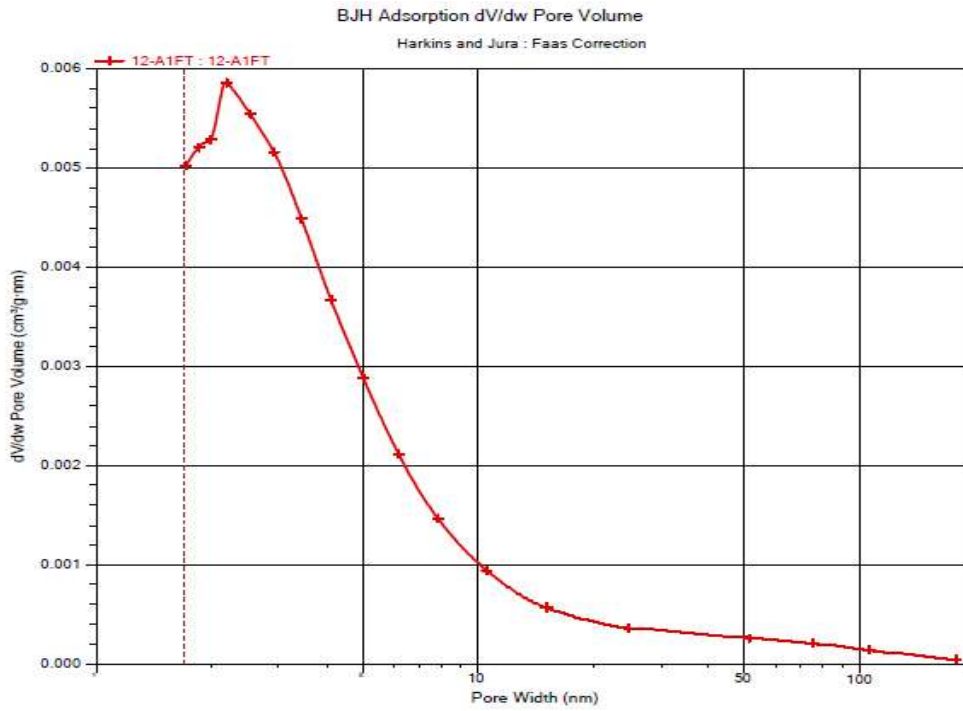
### 4. AOK F-T Numunesi Boşluk-Boyut Dağılımı



## 5. A1 Numunesi Boşluk-Boyut Dağılımı

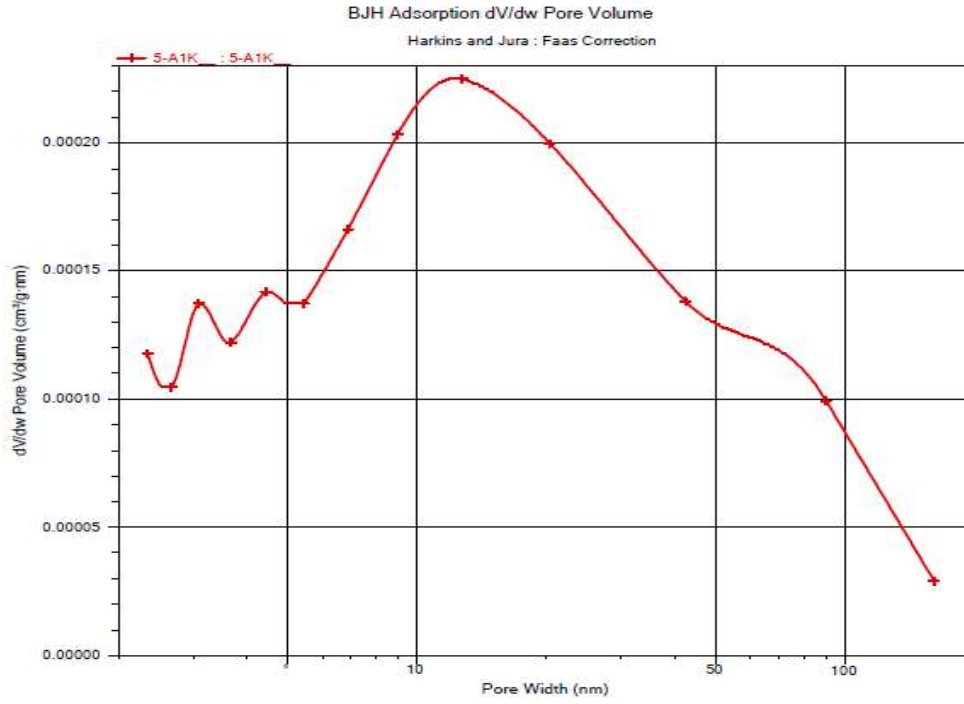


## 6. A1 F-T Numunesi Boşluk-Boyut Dağılımı

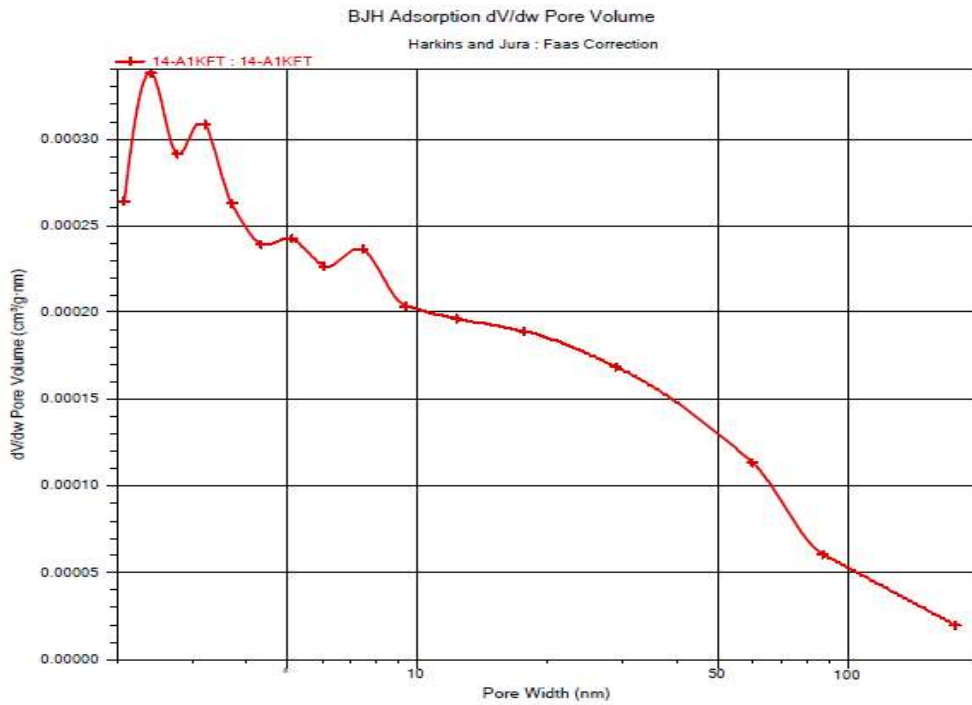




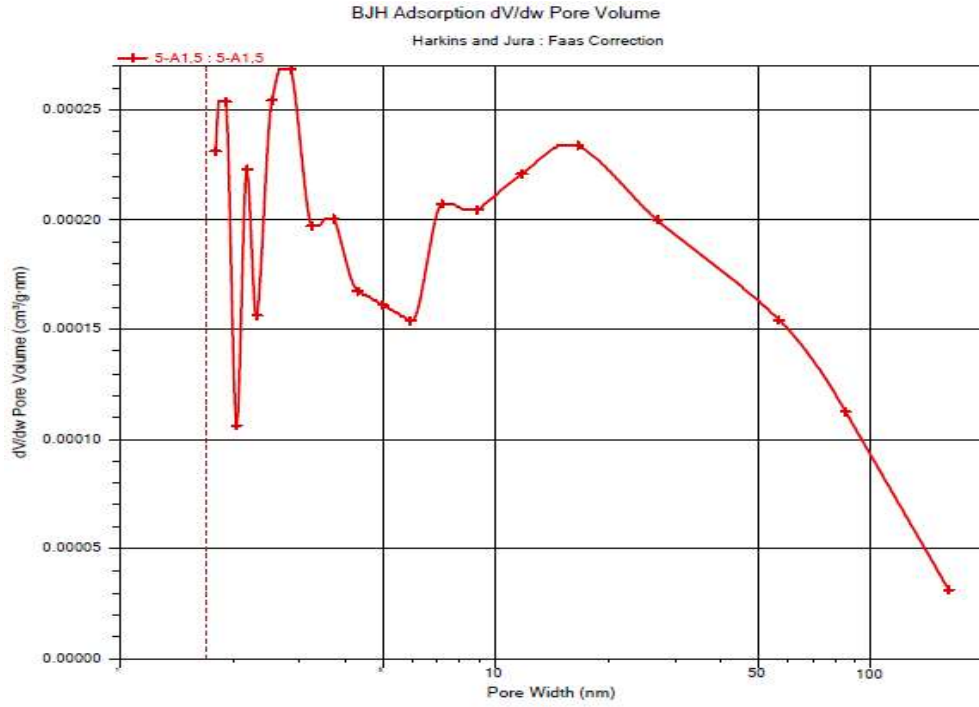
## 7. A1K Numunesi Boşluk-Boyut Dağılımı



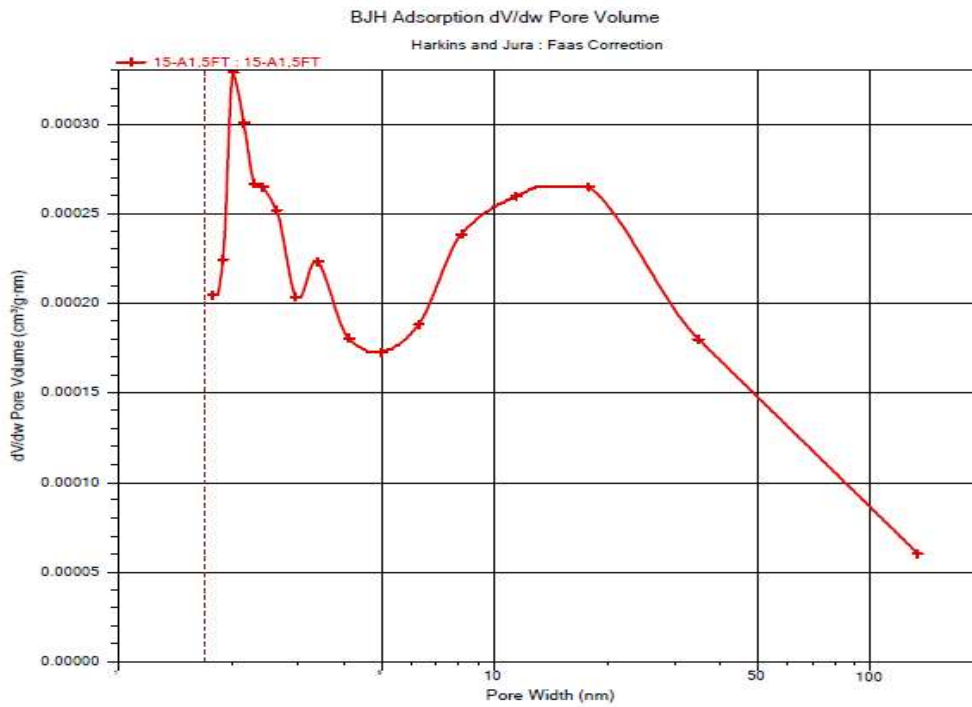
## 8. A1K F-T Numunesi Boşluk-Boyut Dağılımı



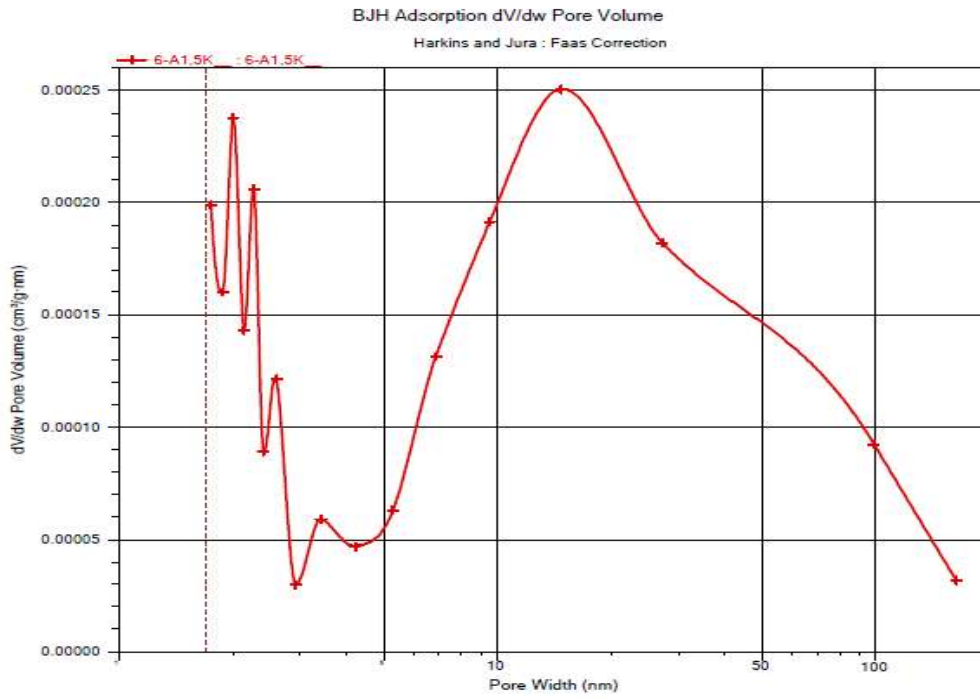
## 9. A1,5 Numunesi Boşluk-Boyut Dağılımı



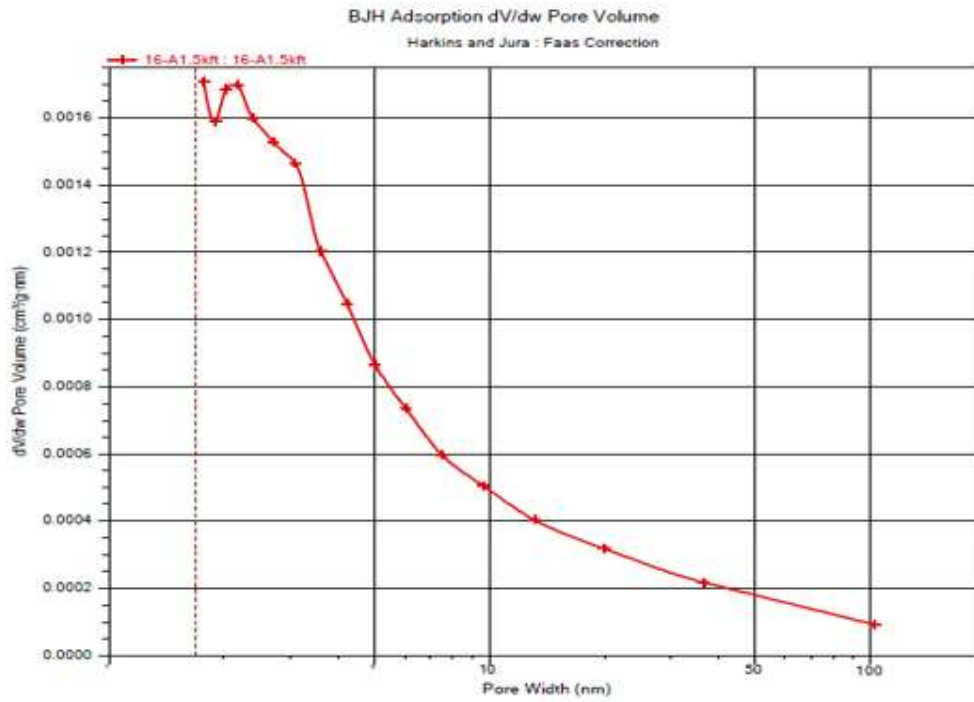
## 10. A1,5 F-T Numunesi Boşluk-Boyut Dağılımı



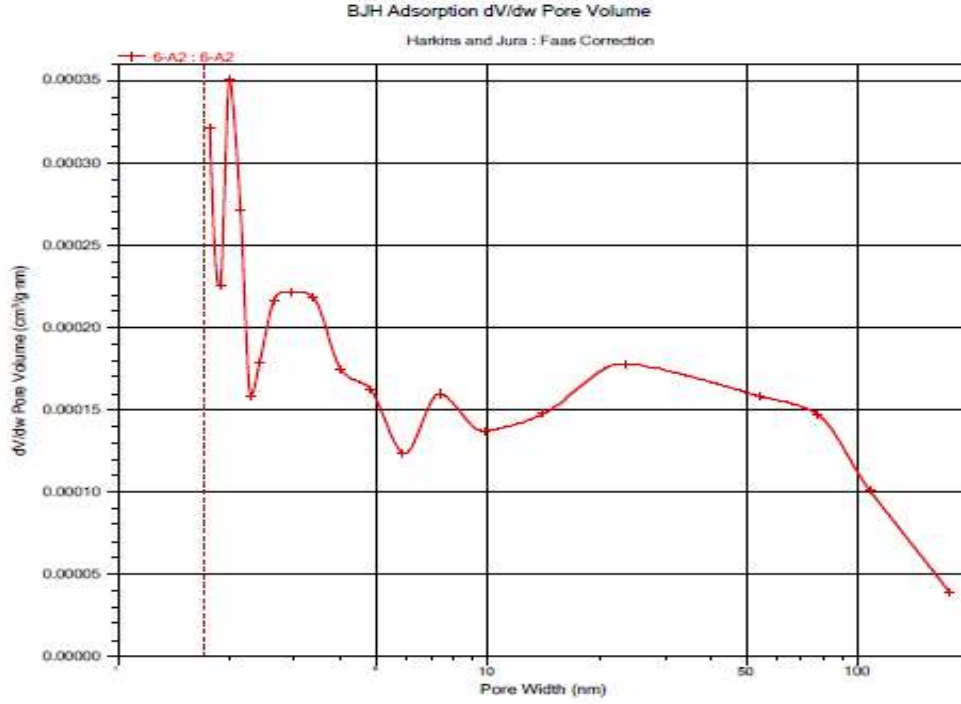
### 11. A1,5K Numunesi Boşluk-Boyut Dağılımı



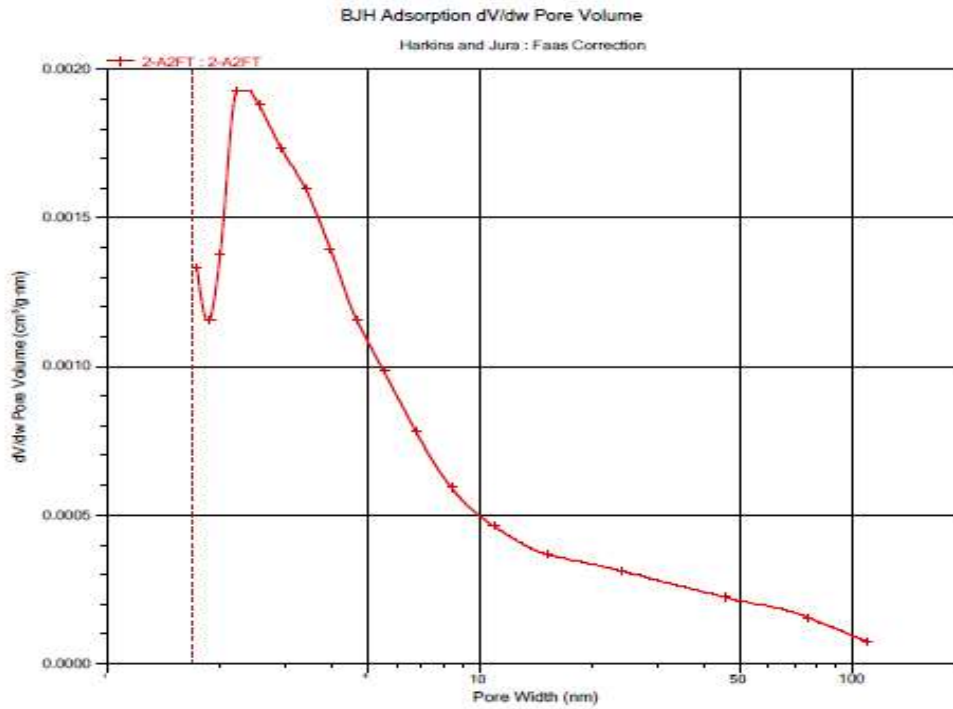
### 12. A1,5K F-T Numunesi Boşluk-Boyut Dağılımı



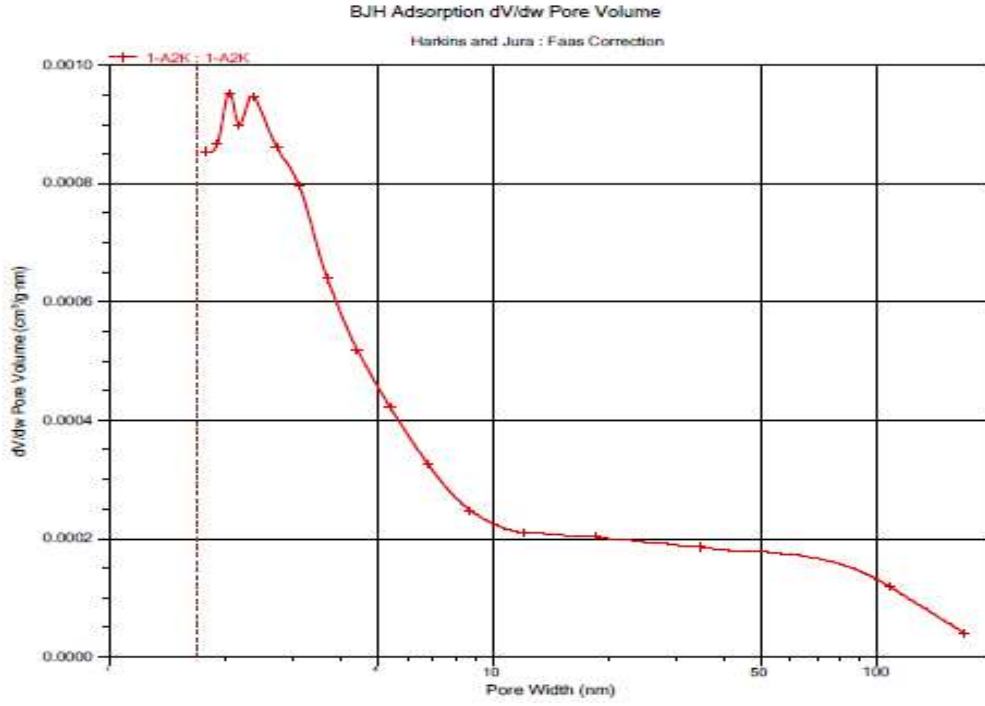
### 13. A2 Numunesi Boşluk-Boyut dağılımı



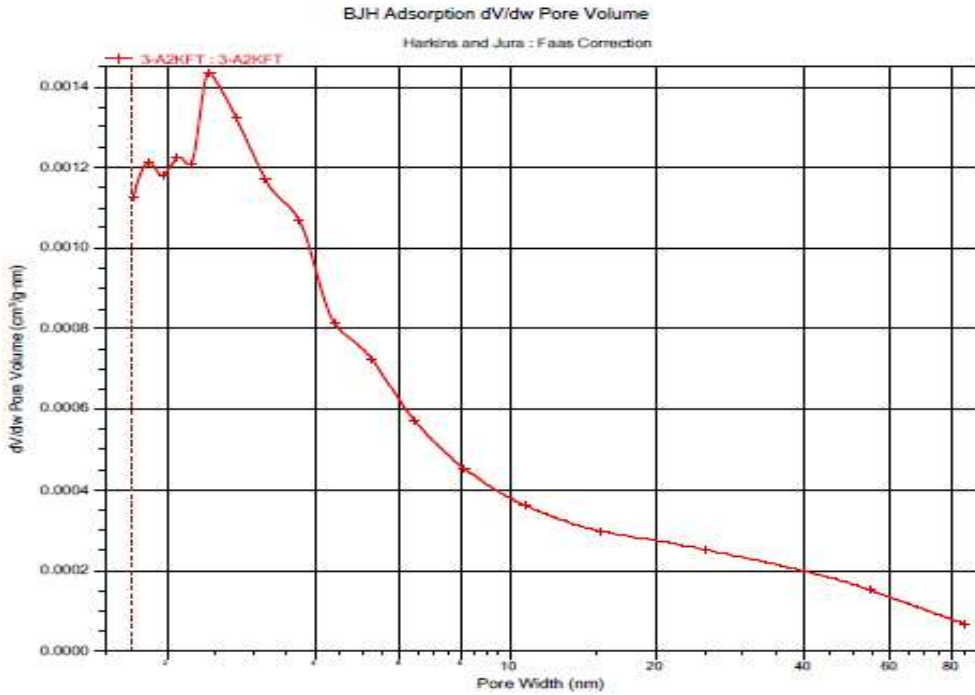
### 14. A2 F-T Numunesi Boşluk-Boyut Dağılımı



### 15. A2K Numunesi Boşluk-Boyut Dağılımı



### 16. A2K F-T Numunesi Boşluk-Boyut Dağılımı



## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
<b>Adı Soyadı:</b>	Yeşim TARHAN
<b>Doğum tarihi:</b>	12 Şubat 1988
<b>Doğum Yeri:</b>	Yakutiye/Erzurum
<b>Uyruğu:</b>	T.C.
<b>Adres:</b>	Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi...
<b>Tel:</b>	05388630139
<b>E-mail:</b>	yesim.tosun@atauni.edu.tr
Eğitim	
<b>Lise:</b>	Nevzat Karabağ Anadolu Öğretmen Lisesi
<b>Lisans:</b>	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
<b>Yüksek lisans:</b>	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı (2014)
<b>Doktora:</b>	Atatürk Üniversitesi
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Intermediate
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
İnşaat Mühendisleri Odası	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
1. Tarhan, Y., & Remzi, S. (2019). Developments of 3D concrete printing process. In <i>International Civil Engineering and Architecture Conference</i> .	