

# 3D BETONLARDA ANİZOTROPİK KARAKTERİN MEKANİK VE MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERE ETKİSİ

## EFFECT OF ANISOTROPIC CHARACTER OF 3D CONCRETE ON MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES

**Yeşim Tarhan\***

Ardahan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ardahan

\*yesimtarhan@ardahan.edu.tr

**Remzi Şahin**

Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum

### Özet

Katmanlı üretimin neden olduğu soğuk derzler, 3D betonun ana kütlelerinde boşluk yapıları birbirinden farklı hatların meydana gelmesine neden olmaktadır. Sertleşmiş betonun çevresel ve mekanik etkiler altındaki davranışını etkileyen bu yapısal farklılığın incelenmesi önemlidir. Bu çalışmada, 60×60×15 cm<sup>3</sup> boyutlarında üretilen 3D beton kütlelerinden döküm yönüne paralel ve dik doğrultuda alınan karotların özellikleri doğrultuya bağlı olarak incelenmiştir. 3D beton üretimi; beyaz çimento, silis kumu (0-1 mm), yüksek fırın cürufu, kalsine kaolin kili ve polipropilen lifinin yanı sıra farklı özelliklere sahip kimyasal katkıları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 3D betonların fiziko-mekanik ve mikroyapısal özellikleri ise basınç dayanımı, UPV, kılcal su emme ve donma-çözülme (D-Ç), MIP, BET, XRD ve SEM deneylerinden elde edilen veriler üzerinden incelenmiştir. Sonuç olarak dikey karotların basınç dayanımı, kılcal su emme katsayısı ve birim hacim ağırlıkları yatay karotlardan yüksek, yatay karotların ise UPV değerleri ve D-Ç dirençleri dikey karotlardan yüksek çıkmıştır. Karot doğrultusuna bağlı olarak mikroyapısal özellikler de değişmiştir. Genel itibarıyla geleneksel betonlar için geliştirilmiş olan deney yöntemlerinin 3D betonlar için kuşkuyla sonuçlar verdiği ve 3D betonlar için özel deney yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** 3D beton, karot, anizotropi, mikroyapısal inceleme.

### Abstract

Cold joints caused by layered production lead to the formation of lines with different pore structures in the main mass of 3D concrete. It is crucial to evaluate this structural difference, which affects the behaviour of hardened concrete under environmental and mechanical effects. In this study, the properties of cores taken from the 3D concrete masses produced in 60×60×15 cm<sup>3</sup> dimensions, parallel to and perpendicular to the casting direction, were investigated depending on the direction. 3D concrete was produced by using white cement, 0-1 mm silica sand, blast furnace slag, calcined kaolin

clay, and polypropylene fibre as well as chemical additives with different properties. The physicomaterial and microstructural properties of 3D concrete were investigated through data obtained from compressive strength, UPV, capillary water absorption, freeze-thaw resistance, MIP, BET, XRD and SEM experiments. As a result, the compressive strength, capillary water absorption coefficient and unit weight of vertical cores were higher than those of horizontal cores. On the other hand, UPV measurements and freeze-thaw resistance of horizontal cores were higher than those of vertical cores. In general, it is concluded that the validity of the test methods developed to determine the properties of conventional concretes is questionable for 3D concretes and it was emphasised that special test methods should be developed for 3D concretes.

**Keywords:** 3D concrete, core, anisotropy, microstructural investigation.

## 1. GİRİŞ

Binalar ve diğer yapıların inşasında 3D baskı teknolojisini kullanılmaya yönelik ilgi giderek artmaktadır. 3D baskı, karmaşık şekillerin ve geometrilerin oluşturulmasına olanak tanır ve inşaat için gereken malzeme miktarını potansiyel olarak azaltabilir [1]. Ayrıca bu baskı yöntemi inşaat süresini ve maliyetini azaltma ve daha sürdürülebilir ve çevre dostu bina uygulamaları yaratma potansiyeline de sahiptir [2,3]. Bu potansiyel faydalara rağmen, inşaat sektörü 3D baskı teknolojisini benimsemenin henüz başlangıç evresindedir. İnşaat sektörü için 3D baskı teknolojisini yeteneklerini ve sınırlamalarını tam olarak anlamak ve uygulama sürecinde ortaya çıkabilecek zorlukları ele almak için daha fazla araştırma ve geliştirmeye ihtiyaç vardır. Bununla birlikte, daha sürdürülebilir ve verimli yapı uygulamalarına duyulan ihtiyaç artmaya devam ettikçe, 3D baskının inşaat sektöründe giderek daha önemli bir rol oynaması muhtemeldir.

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 tabakalı yapıya ve tabakalar arası zayıf arayüzeye 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 [4].

Diğer taraftan, katmanlı üretimi nedeniyle 3D betonu oluşturan tabakalar arasında soğuk derz oluşması, aderans kaybına ve ana kütlede boşluk yapıları birbirinden farklı hatların oluşmasına yol açmaktadır. Bu boşluklu yapı da, başta D-Ç direnci olmak üzere, betonun boşluk yapısı ilişkili olan tüm dayanıklılık özelliklerini etkilemektedir. Bu nedenle 3D betonların boşluk yapılarının incelenmesini amaçlayan çalışmalar ayrı bir önem taşımaktadır.

Çalışmada, 3D betonların anizotropik özelliklerini değerlendirmek için, baskının eksenel yönüne dik ve eksenel yönüyle paralel alınan karot numuneleri üzerinde basınç dayanımı, ultrasonik darbe hızı, kapiler su emme ve D-Ç testleri gerçekleştirilmiştir. MIP ve BET teknikleri ile erişilebilir tüm boşlukların gözenek boyutu dağılımı incelenmiş ve gözenek morfolojisini gözlemlmek için SEM ve X-Işını Kırınımı (XRD) analizleri yapılmıştır.

Çalışma 3D beton üzerinde yapılmış olan kapsamlı araştırmanın sonuçlarını özet halinde vermektedir. Literatürdeki birçok çalışmada [ör. 5,6,7,8,9] 3D betonların özellikleri büyük parçalardan kesilen küçük numuneler üzerinde incelemiş iken bu çalışmada karot örnekler üzerinde çalışılması araştırmanın özgün değerini artırmaktadır.

## **2. MATERYAL VE METOT**

### **2.1. Kullanılan Malzemeler**

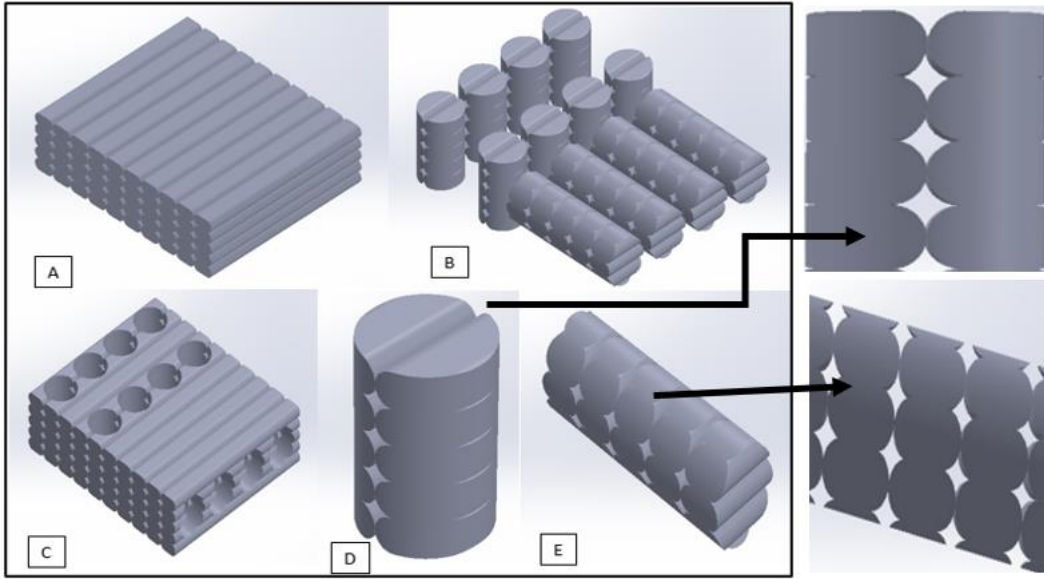
3D beton karışımlarını oluşturmak için hızlı sertleşen Süper Beyaz Çimento (CEM I 52.5 R, 680 kg/m<sup>3</sup> dozajında) ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC, çimentonun %20 oranında ve ilave olarak kullanılmıştır bu durumda bağlayıcı dozajı 828 kg/m<sup>3</sup> olmuştur) bağlayıcı karışımı oluşturmuştur. Karışımlarda 0-0.5 mm ve 0-1 mm boyutlarında ve özgül ağırlıkları, sırasıyla, 2.44 ve 2.49 g/cm<sup>3</sup> olan iki farklı ince agrega sınıfı silis kumu kullanılmıştır. 0-1 mm boyutlu agregalar 0-0.5 mm boyutlu agregaların 2 katı olacak şekilde toplam agrega miktarı bağlayıcı miktarının 1.34 katı olarak alınmıştır. Su tutma özelliğinden dolayı stabiliteyi ve baskı kalitesini artırmak için yüksek saflıkta kalsine kaolin kili (bağlayıcı dozajının % 0.3' ü oranında) kullanılmıştır. Rötire oluşumunu azaltmak için harç matrisi boyunca hızlı ve homojen bir şekilde dağılmak üzere tasarlanmış, yüksek çekme mukavemetine, yüksek elastikiyet modülüne sahip ultra ince bir polipropilen (pp) elyaf olan monofilament sentetik mikro elyaf karışımlara bütün hacmin % 0.2'si oranında eklenmiştir. 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. Kıvam, priz süresi, karışımların reolojik özellikleri, 3D yazıcı nozülünden akıcılık gibi kriterler açısından yapılan değerlendirmeler sonucunda çalışma kapsamında çok sayıda ön deney yapılmış ve elde edilen bulgulara göre, karışımlara birden fazla kimyasal katkı eklenmesine karar verilmiştir. Bu kapsamda; viskozite değiştirici (karışımdaki ince malzeme miktarının (maksimum tane çapı 0.1 mm'den küçük ), % 0.1'i oranında), süperakışkanlaştırıcı (bağlayıcı dozajının % 1'i oranında), hidrasyon durdurucu (bağlayıcı dozajının % 0.3'ü oranında), kıvam değiştirici ve priz hızlandırıcı (bağlayıcı dozajının % 1'i oranlarında) ve priz geciktirici (bağlayıcı dozajının % 0.3'ü oranında) kullanılmıştır. Kullanılan malzemeler ve taze beton özellikleri Tarhan ve Şahin (2021) [10] çalışmasında detaylı olarak verilmiştir.

### **2.2. Metot**

3D beton karışımlarında su/bağlayıcı ve agrega/çimento karışım oranları sırasıyla 0.35 ve 1.5 olarak alınmıştır. 3D baskı beton elemanlar, İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları'nda (İSTON) 3D beton yazıcısı kullanılarak üretilmiştir. 600×600×150 mm plaka şeklindeki numuneler, 50 mm genişlik ve 25 mm kalınlığındaki şeritlerin üst üste ve yan yana basılmasıyla üretilmiştir (Şekil 1a). Plakalardan 28. günün sonunda karotlar alınmış (Şekil 1b) ve deneyler bu numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2’de dökülmesi tasarlanan 3D beton elemanın perspektifi (A), elemandan alınması planlanan dikey ve yatay karotlar (B), karotlar alındıktan sonra numuneden geriye kalan kısım (C), dikey yönde (D) ve yatay yönde (E) alınan karot örneği görülmektedir.

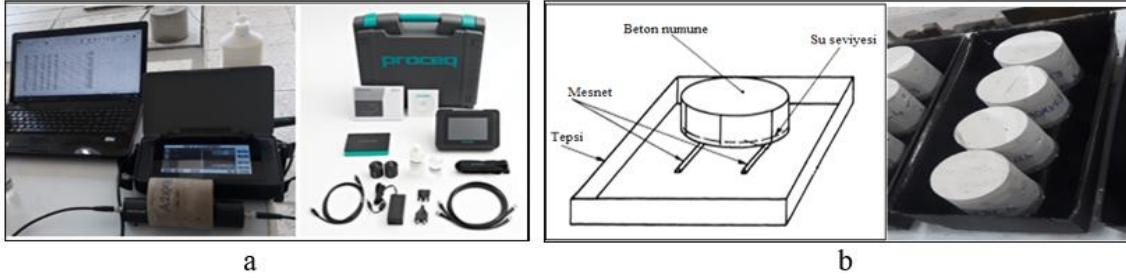


Üretilen 3D beton karışımı 3D baskılanmadan önce geleneksel döküm yöntemi ile  $5 \times 5 \times 5$  cm<sup>3</sup> lük kalıplara dökülmüş ve TS 12390-3 [11] standardına göre basınç deneyi uygulanmıştır. Beton karışımları bir gün süreyle kalıpta bekletildikten sonra 27 gün de laboratuvar ortamında tutulmuş ve 3000 kN kapasiteli press ile 0,4 MPa/s yükleme hızında kırılmıştır. 3D baskı yapıldıktan sonra ise üretildikleri ortamda (yaklaşık  $20 \pm 2$  °C ve %60 nem) 28 gün bekletilen sertleşmiş 3D elemanlardan karot numuneler alınmış ve kesme işlemi yapılarak gerekli düzlükte ve boyutta numuneler elde edilmiştir. Elde edilen  $\text{Ø}10 \times 10$  cm boyutlarındaki silindir numuneler 1 gün süreyle laboratuvar ortamında bekletilerek hava kuruşu durumuna getirilmiştir. Bu işlemden sonra silindir numuneler kükürt ile başlıklanmıştır. Başlıklama işleminden sonra iki saat süreyle sertleşmeye bırakılan karotlar üzerinde yine aynı standart ve yükleme hızında basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Basınç deneylerine ait görüntüler Şekil 3’de verilmiştir.



**Şekil 3.** a) Geleneksel döküm yöntemi ile üretilmiş numunede basınç dayanımı testi sonrası oluşan hasar, b) Karotların kesilerek düzeltilmesi, c) Karotların kükürt ile başlıklanması, d) Karotlara basınç dayanım testi uygulanması.

UPV deneyi Proseq marka Ultrasonik Dalga Hızı Test Cihazı (Şekil 4a) kullanılarak TS EN 12504-4 [12] standardına göre yapılmıştır. Kılcal su emme deneyi ise TS EN 13057'e [13] göre yapılmıştır. Şekil 4b'de düzeneği verilen deneyde numuneler; 12 dk., 30 dk., 1 saat, 2 saat, 4 saat ve 24 saat aralıklarla tartılarak emilen su miktarları belirlenmiştir.



**Şekil 4.** a) UPV cihazı, aparatları ve deney esnasından bir görüntü; b) Kılcal su emme deney düzeneğinin şematik gösterimi ve deneye ait bir görüntü.

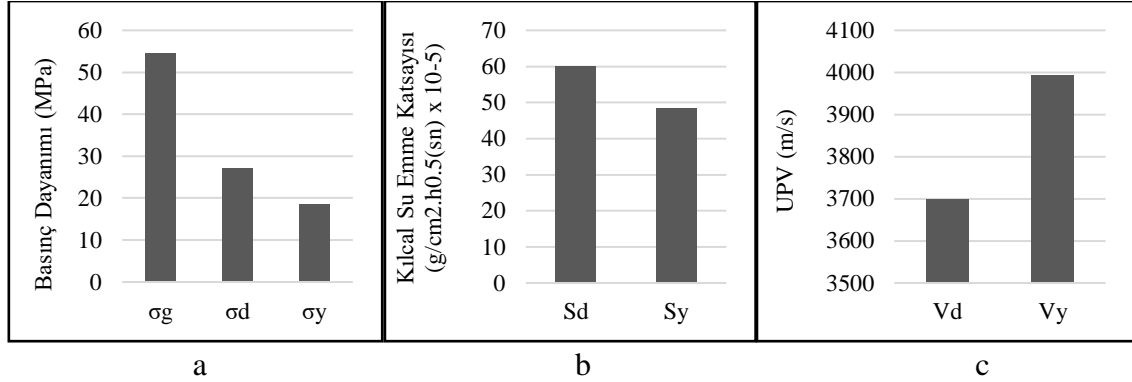
Çalışmada donma-çözülme deneylerinde ASTM C 666 [14] standardında belirtilen B yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem numunelerin havada donma ve su içerisinde çözülmesini esas almaktadır. Numunelerin iç sıcaklık değişim değerleri min.  $-18\pm 2$  °C ve maks.  $4\pm 2$  °C dir. Minimum sıcaklıktan maksimum sıcaklığa ve maksimum sıcaklıktan minimum sıcaklığa geçiş süresi 2 saatten az 5 saatten çok olmayacak şekilde ayarlanmıştır. 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.

Çalışmada MIP analizleri, 55.000 Psi basınçta Cıvalı Porozimetre üzerinde gerçekleştirilmiştir. Cıvanın yüzey gerilimi: 480 dyne/cm; cıva ile gözenek duvarı arasındaki temas açısı  $140^\circ$  alınmıştır. 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. MIP ve BET analizi için 180 günlük numuneler toz haline getirilmiş ve  $105$  °C'de kurutulmuştur. SEM analizi için ise 335 günlük karotlardan alınan örnekler kullanılmıştır. Örneklerin incelenecek yüzeyleri vakum altında çok ince (yaklaşık 3 Å/sn) altın tabaka ile kaplanmıştır. Çalışma kapsamında D-Ç maruz bırakılmış ve bırakılmamış 25 mm çapındaki karotlardan hazırlanan numuneler üzerinde XRD analizleri yapılmıştır. Dalgaboyu 1.54 olan Cu- $\alpha$  ışınması ile X-Ray Difraktometre cihazında yapılan çalışmada tarama aralığı (2 $\theta$ ) 10-900, tarama hızı 4 derece/dak., çalışma voltajı 5 kV, çalışma akımı ise 40 mA alınmıştır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Sertleşmiş Beton Deneyleri Sonuçları

Geleneksel döküm ile elde edilen numunelerin basınç dayanımı ( $\sigma_g$ ) ve 3D betonlardan alınan dikey ( $\sigma_d$ ) ve yatay ( $\sigma_y$ ) karot numunelerinin basınç dayanımı sonuçları Şekil 5a’da verilen grafikte gösterilmiştir. Kılcal su emme katsayısı deneyi yalnızca 3D baskı karot beton numunelere uygulanmıştır. Kılcal su emme deney sonuçları dikey karotlar ( $S_d$ ) ve yatay karotlar ( $S_y$ ) için Şekil 5b’ de gösterilmiştir. UPV testi sonuçları ise dikey karotlar ( $V_d$ ) için ve yatay karotlar ( $V_y$ ) için Şekil 5c’ de gösterilmiştir.



Şekil 5. Sertleşmiş beton deneyleri sonuçları

Şekil 5a’da verilen grafikten geleneksel yöntemle üretilen betonun basınç dayanımı değerinin (54,5 MPa) 3D baskılama ile üretilen numunelerden dikey yönde karot alındıktan %50, yatay yönde karot alındıktan ise %66 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir. 3D baskılama işlemi ile elde edilen betonlar tabakalardan oluştuğu için normal betondan farklı olarak anizotropik davranış gösterir ayrıca tabakalar arasında soğuk derz oluşumu nedeniyle zayıf bağ kuvvetleri ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla 3D işlemi dayanımı düşürmüştür. Ayrıca dikey yönde alınan karotların dayanımlarının yatay karotlara göre daha büyük olduğu görülmektedir. Dikey yönde alınan karotlar döküm yönüne dik olduğundan betonun bu yönü tabakalanmalara (laminasyona) da diktir, dolayısıyla, mukavemet daha yüksek çıkmıştır. Yatay yönde alınan numuneler ise döküm yönüne paralel tabakalardan oluştuğundan bu yöndeki bağlar uygulanan kuvvetler karşısında daha zayıftır ve karotlar kolayca ayrılmıştır. Bu yüzden de karotların dayanımı daha düşük çıkmıştır.

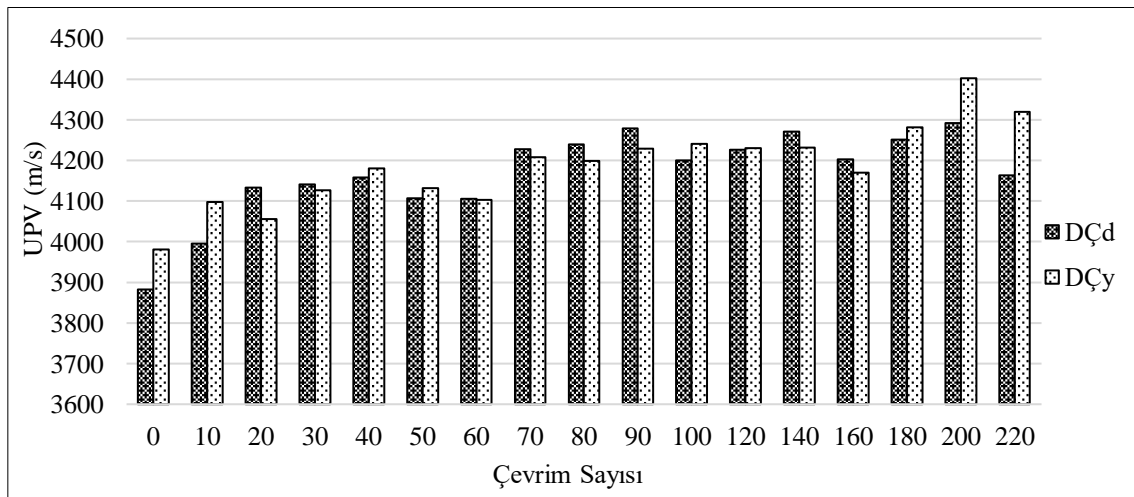
Şekil 5b’den görülebileceği üzere dikey karotların kılcal su emme katsayıları yatay karotlardan %20 oranında daha fazladır. Dikey karotlarda tabakalar arası boşluk yapısı yatay karotlara göre oldukça farklı olup bu durumun suyun numunede yükselmesine de etki ettiği düşünülmektedir. Nitekim Şekil 3c’den görüldüğü gibi dikey karotlar 3 adet tabakalar arası boşluğa sahipken yatay karotlar tam ortadan 1 adet boşluğa sahiptirler. Kılcal yolla suyun ilerlemesi de bu boşluklara göre şekillenmiştir. Tabakalar arası temasın olduğu yerlerde su yükselmiş boşluklara gelince buralardan sızıntı yaptığı için ilerlemesi durmuştur. 24 saatlik sürenin sonunda da hemen hemen bütün numunelerde su ancak yaklaşık 3-4 cm yüksekliğinde çıkabilmiştir. Kılcal su emme deneyi, suyun “kapiler yolla” yükselmesini ölçen bir deney olduğundan malzemenin (harç) geçirimsizliği hakkında bilgi vermektedir. 3D betonlarda, farklı tabakalardan ve aynı zamanda tabakalar arası büyük (kapiler olmayan) boşluklardan oluşan bir strüktür söz konusudur.

Dolayısıyla geleneksel beton numuneler için belirlenen kılcal su emme deneyinin 3D baskı beton numunelerde uygulanabilirliği tartışılmalıdır.

Şekil 5c' de verilen UPV sonuçlarına göre 3D betonun ultrasonik darbe hızının (UPV) yatay yönde alınan karotlarda dikey yönde alınanlara kıyasla %8 oranına daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu fark, kılcal su emme katsayısı değerlerinde olduğu gibi, dikey karotlardaki üç boşluğa kıyasla yatay karotlarda katmanlar arasında bir boşluk bulunmasına bağlanmıştır. 3D betonun, mekanik anizotropiye yol açan katmanlı yapısı nedeniyle ultrasonik ses iletiminde, ses dalgaları bir probdan diğerine katmanlar arası temas bölgeleri aracılığıyla iletilir. Katman sayının artması boşluk miktarını da artıracığından ses dalgalarının iletimini zorlaştırabilir ve geleneksel betona kıyasla daha uzun iletim sürelerine yol açabilir. Basınç dayanım deneyi ile UPV sonuçlarının birbiriyle çelişen sonuçlar vermesi de göz önüne alındığında bu bulguların, 3D betondaki katmanlar arasındaki boşlukların varlığının ultrasonik özelliklerini etkileyebileceğini ve daha fazla araştırmanın bu olguyu daha iyi anlamaya yardımcı olabileceğini göstermektedir.

Çalışma kapsamında üretilen karışımın birim hacim ağırlığı taze halde  $2130 \text{ kg/m}^3$  iken, sertleştikten sonra alınan dikey ve yatay karot örneklerde sırasıyla  $2160$  ve  $1950 \text{ kg/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Birim ağırlık sonuçlarına göre elde edilen betonlar hafif beton kategorisindedir. Oldukça yüksek düzeyde çimento dozajı kullanılmasına rağmen hafif beton elde edilmesinin sebebi olarak 3D betonların karşılaşması gereken reolojik özellikleri sağlamak için eklenen vizkozite düzenleyici, kıvam düzenleyici ve priz geciktirici kimyasal katkıların kullanımından kaynaklandığı düşünülen sürüklenmiş hava boşlukları olduğu düşünülmüştür. VMA'lar betonun iç sürtünmesini azaltarak daha kolay akmasını sağlar ve yerleştirmek ve sağlamlaştırmak için gereken enerjiyi azaltır. Sonuç olarak, beton daha gözenekli olabilir ve VMA içermeyen betona göre daha düşük yoğunluğa sahip olabilir (Assad ve ark. 2003). Kıvam düzenleyici ve priz geciktirici katkıları da hava sürükleyici etki gösterdiklerinden elde edilen karışımlar sürüklenmiş hava boşluklarına sahip olmuşlardır.

D-Ç deneyinde 220. çevrime kadar bozunmadan kalabilen dikey ( $DC_d$ ) ve yatay ( $DC_y$ ) karotlardan elde edilen UPV değerleri Şekil 6'daki grafikte gösterilmiştir.



**Şekil 6.** Dikey ve yatay karotların D-Ç çevrimlerine göre UPV değişimleri

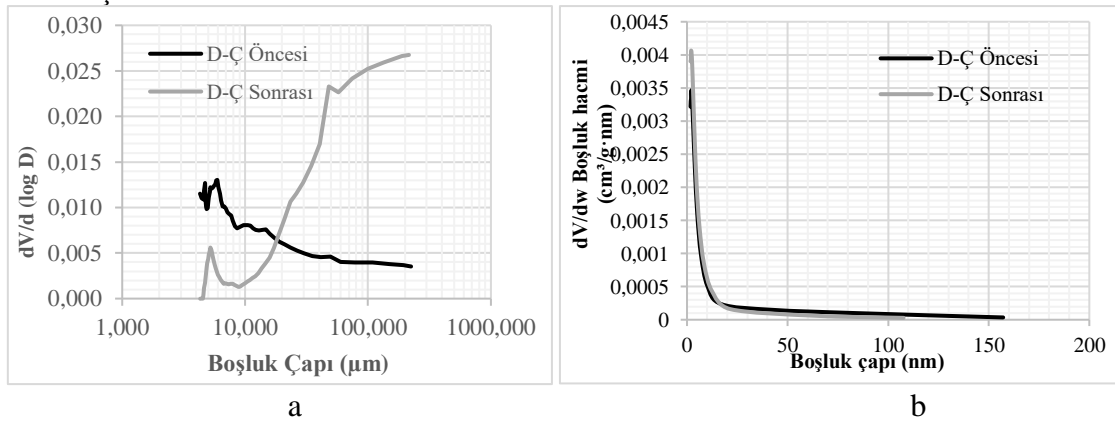
Şekil 6'dan her iki yönden alınan karotların UPV değerlerinin çevrim sayısı ilerledikçe arttığı görülmektedir. Karışımda bulunan yüksek orandaki (%20) ÖYFC'nin puzolanik

etkisi nedeniyle zaman ilerledikçe örneklerdeki dayanım artışına yol açmasının bu sonuca neden olduğu düşünülmektedir. Karotların D-Ç etkisine maruz kalmış olmasına rağmen UPV değerlerinin artması puzolanik etkinin D-Ç çevrimlerin yol açtığı olumsuz etkiden daha baskın olduğunu düşündürmektedir. Bununla birlikte, D-Ç etkisine maruz kalmasına rağmen 3D betonların etkilenmesinin temel nedeni ise karşısında bulunan sürüklenmiş hava miktarıdır. Kullanılan kimyasal katkıların karışımında sürükledikleri hava zerrecikleri nedeniyle betonun içerisinde D-Ç etkisine direnç sağlayabilecek yeterli düzeyde hava miktarının oluştuğu değerlendirilmektedir (bkz. Şekil 9). Örneklerin D-Ç etkisine maruz kaldığı halde UPV değerlerinde ölçülen artışlar, literatürde her ne kadar beton olarak geçse de, 3D karışımların birçoğunun aslında harç olmaları ile de ilişkilidir. Bu çalışmada da agrega olarak kullanılan tanelerin en büyük çapı 1 mm'dir. Bağlayıcı miktarının da oldukça yüksek olduğu göz önünde bulundurulacak olursa kompozit içerisindeki ara yüzey fazının güçlü (betona göre çok daha az boşluklu) olduğu bunun da örneklerin D-Ç direncini artırdığı ileri sürülebilir.

Diğer taraftan, yine Şekil 6'dan dikey karotların UPV değerlerinin genelde yatay karotlarından daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum özellikle ilk on ve son kırk çevrimde net olarak belirlenmiştir. 20 ila 160. çevrim arasında ise sonuçlar birbirine yakın (hatta 60 ve 120. çevrimlerde hemen hemen aynı) ve dalgalı çıkmıştır. Deneyler esnasında her iki numune grubun da tabakalar arası birleşim yerlerinden ayrılarak donma hasarına maruz kaldıkları gözlemlenmiştir. Yatay karot numunelerinin dikey karot numunelerine göre D-Ç çevrimlerinden daha az etkilenmesinin sebebi olarak dikey karot numuneleri 3 adet tabakalar arası boşluğa sahipken yatay karotların ise 1 adet boşluğa sahip olması yani dikey numunelerin yatay numunelere göre daha fazla katmanlar arası boşluk içermesi ile açıklanabilir.

### 3.2. Mikroyapısal Sonuçlar

MIP ve BET deneyleri sonucu elde edilen boyut-boşluk dağılım grafikleri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. a) MIP analizinden elde edilen boşluk-boyut dağılım grafikleri, b) BET analizinden elde edilen boşluk-boyut dağılımı.

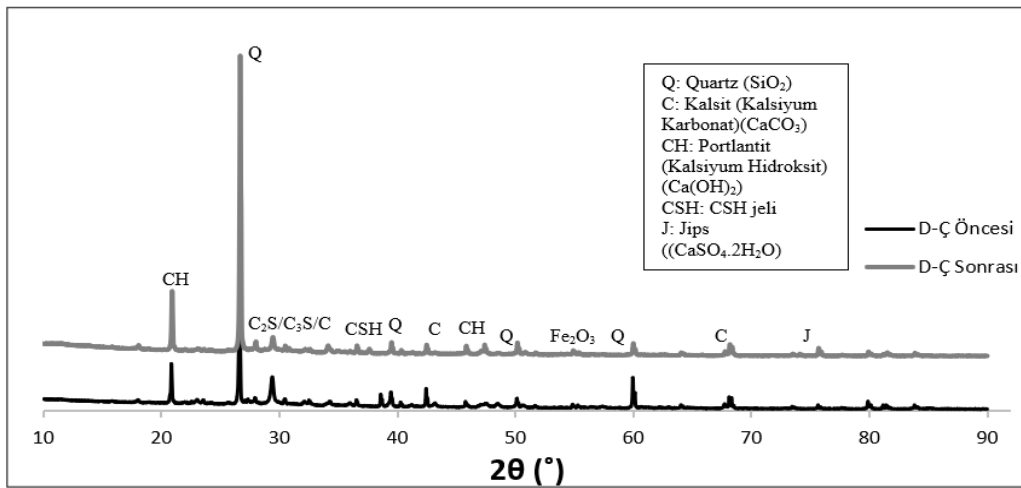
Şekil 7a'da verilen MIP analiz sonuçlarına göre donma-çözülme öncesi ile donma-çözülme sonrası numunelerin boşluk-boyut dağılımları birbirinden çok farklı olduğu söylenebilir. MIP analizinde numunelerinin yaklaşık 5 ila 250 µm arası boşluk boyutlarına sahip olduğu belirlenirken D-Ç uygulanmadan önce büyük çoğunluğu 10 µm'lik boyutlarda olan boşlukların D-Ç sonrası büyük kısmının yaklaşık 100 µm boyutlarına



erişmiş olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, D-Ç işleminin numunelerin boşluk boyutlarının artmasına sebep olduğunu göstermektedir.

Şekil 7b’de verilen BET analizi sonuçlarından numunelerin ortalama 2 ila 150 nm arasında boşluk boyutlarına sahip oldukları söylenebilir. Numunelerin boşluk hacminin çoğunluğu 2-10 nm civarındadır. Numuneler D-Ç öncesi ve sonrasında oldukça benzer boşluk-boyut dağılımına sahiptir. D-Ç öncesi boşluk-boyut dağılımı 2-150 nm civarında iken D-Ç sonrası 2-110 nm civarına düşmüştür. Bu sonuçlar, D-Ç etkisi ile karışımlarda bulunan 150 nm’nin altındaki boşluk yapısında kayda değer bir değişikliğin olmadığını göstermektedir.

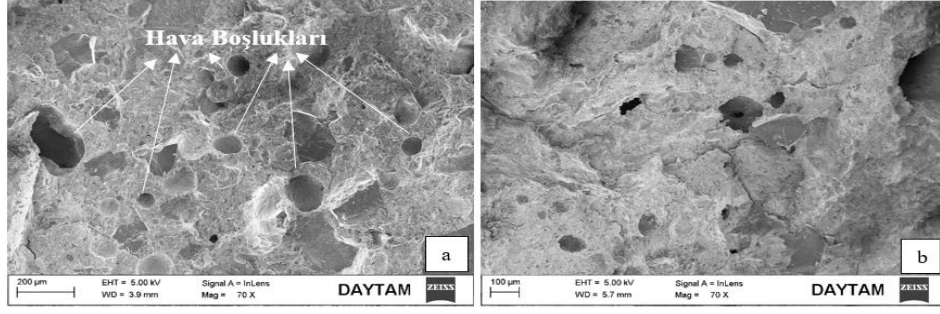
Aynı içeriğe sahip olan örneklerin D-Ç öncesi ve sonrası XRD analizinden elde edilen kristalografik grafikler Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. XRD analiz sonuçları

Numunelerinin XRD analiz sonuçları incelendiğinde genel itibariyle Quartz ( $\text{SiO}_2$ ), Kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ), Portlantit ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), CSH jeli, Jips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) gibi agrega, çimento, cüruf ve kil fazlarından gelen temel bileşiklerin pikleri görülmüştür. Şekil 8’den görüldüğü gibi D-Ç öncesi ve D-Ç sonrası numunelerin XRD’leri birbirine paralel çıkmıştır. Yalnızca piklerin şiddetleri arasında farklılıklar söz konusudur. Çalışmada kantitatif analiz yapılmadığı için bu değişikliklerin nedenine dair bilgiye ulaşılammıştır.

Örnekler üzerinden alınan SEM görüntülerin ikisi Şekil 9’da verilmiştir. Bu görüntülerden çalışma kapsamında üretilen 3D betonların yoğun bir matris yapısına sahip olduğu tespit edilmiştir. Ancak, görüntülerde önemli oranda hava boşlukları gözlemlenmiştir. 3D beton karışımları içerdiği yüksek oranda ve çeşitlilikteki kimyasal katkıları nedeniyle yüksek oranda ve küresel şekilli hava boşluğuna sahiptir. Yukarıda açıklandığı gibi 3D betonların D-Ç çevrimlerine direnebilmesinin nedeni de bu boşluklu yapıdır. Şekil 9b de görüldüğü üzere D-Ç sonrası bazı beton morfolojisinde bozulmalar oluşsa da hava boşlukları küresel olarak mevcudiyetlerini korumuşlardır.



Şekil 9. Numunelerin hava boşluk dağılımının SEM görüntüleri: a) D-Ç öncesi, b) D-Ç sonrası.

#### 4. SONUÇLAR

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 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. Dikey yönde alınan karotların dayanımlarının yatay yönde alınan karotların dayanımından daha büyük olduğu görülmüştür.

UPV sonuçları ile basınç dayanım sonuçlarının geleneksel betonda olduğu gibi birbirini desteklemediği tespit edilmiştir. Bu nedenle geleneksel betonların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla geliştirilen tahribatsız deney yöntemlerinin 3D betonlarda geçerliliğinin kuşku olduğu sonucuna varılmıştır. 3D betonlar için yeni/özel deney yöntemlerini içeren standartların geliştirilmesi tavsiye edilmiştir.

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.

MIP analizlerinde D-Ç çevrimlerinin numunelerdeki boşlukların boyutlarını artırdığını göstermiştir. BET sonuçları ise D-Ç etkisinin örneklerde bulunan 150 nm'in altındaki boşluklar üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu göstermiştir. XRD analizi neticesinde ise beton bileşenlerinden ve karbonatlaşma etkisinden gelen kristal yapılar dışında ilave kristal yapılar gözlenmemiştir.

## **Kaynaklar**

1. Hager, I., Golonka, A., Putanowicz, R., 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction?. *Procedia Engineering*, 151, 292-299, 2016.
2. 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.
3. Wu, P., Wang, J., & Wang, X., A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, 68, 21-31, 2016.
4. De Schutter, G., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Habert, G., Agusti-Juan, I., Vision of 3D printing with concrete—Technical, economic and environmental potentials. *Cement and Concrete Research*, 112, 25-36, 2018.
5. Wolfs, R. J. M., Bos, F. P., Salet, T. A. M., Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*, 119, 132-140, 2019.
6. Zhang, Y., Zhang, Y., She, W., Yang, L., Liu, G., Yang, Y., Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. *Construction and Building Materials*, 201, 278-285, 2019.
7. Kloft, H., Krauss, H. W., Hack, N., Herrmann, E., Neudecker, S., Varady, P. A., Lowke, D., Influence of process parameters on the interlayer bond strength of concrete elements additive manufactured by Shotcrete 3D Printing (SC3DP). *Cement and Concrete Research*, 134, 106078, 2020.
8. Arunothayan AR, Nematollahi B, Ranade R, Khayat KH, Sanjayan J.G., Digital fabrication of eco-friendly ultra-high performance fiber-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 104281, 2021.
9. Xiao J, Chen Z, Ding T, Zou S., Bending behaviour of steel cable reinforced 3D printed concrete in the direction perpendicular to the interfaces. *Cement and Concrete Composites*, 104313, 2021.
10. Tarhan Y., Şahin R., Fresh and Rheological Performances of Air-Entrained 3D Printable Mortars. *Materials*, 14(9), 2409, 2021.
11. TS EN 12390-3, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayin. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2019.
12. TS EN 12504-4, Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2021.
13. TS EN 13057, Beton yapılar - Koruma ve tamir için mamul ve sistemler - Deney metotları - Kılcal su emmeye direncin tayini. Türk Stan. Enstitüsü, Ankara, 2004.
14. ASTM C666/C666M-15. Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2016.