



**Kısa Makale  
(Short Communication)**

## **Çimentolu Sistemlerde Porozite Analizi**

**İlker TEKİN\***, **Hakan BOLAT\*\***, **Mustafa. ÇULLU\*\***, **Serkan SUBAŞI\*\*\***

\* Bayburt Üniversitesi Müh. Fak. İnş. Müh. Böl., Bayburt/TÜRKİYE

\*\* Gümüşhane Üniversitesi Müh. Fak. İnş. Müh. Böl., Gümüşhane/TÜRKİYE

\*\* Gümüşhane Üniversitesi Müh. Fak. İnş. Müh. Böl., Gümüşhane/TÜRKİYE

\*\*\* Düzce Üniversitesi Tekn. Fak. İnş. Müh. Böl., Düzce/TÜRKİYE

[ilkertekin@yahoo.com](mailto:ilkertekin@yahoo.com)

### **Özet**

Betonun dayanımı, dayanıklılığı ve sürekliliği birçok faktöre bağlıdır. Porozite, betonun kalitesini direkt etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Araştırmacılar, çimentolu sistemlerde oluşan boşluklarla ilgili bilgiye ulaşmak için çeşitli yöntemler kullanmaktadırlar. Bu yöntemlerden en çok kullanılanı cıva püskürtmeli porozimetredir (MIP). Son 10 yılda bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler sebebiyle görüntü analiz tekniklerinin kullanımı hızla artmaktadır. Görüntü analiz yöntemleri ile malzeme içindeki boşlukların geometrik yapısı, miktarı, boyutları ve dağılımı incelenebilmektedir. Bu incelemeyi sağlayan tahribatsız yöntemlerden birisi de Bilgisayarlı Tomografi (BT) tekniğidir. BT ile çimentolu sistemlerde içyapı analizleri yapılabilmekte ve mikron boyuttaki boşluklar görülebilmektedir. Bu çalışmada, BT yönteminin porozite analizinde nasıl kullanıldığı ve beton bilimindeki yeri açıklanmıştır. Bununla birlikte, MIP ve taramalı elektron mikroskop yöntemleriyle çeşitli karşılaştırmalar yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Beton, Harç, Porozite, Bilgisayarlı Tomografi ve MIP.

## **Analysis of Porosity in Cementitious Systems**

### **Abstract**

Strength, durability and sustainability of concrete depend on many factors. Porosity is the one of the most important factor which is affect concrete quality directly. Researchers have been using various methods to reach information relating to the porosity of cementitious systems. The most used of these methods is Mercury Intrusion Porosimetry (MIP). The last decade using of image analysis techniques have been increasing rapidly due to develop the computer technology. Pore structure, amount of void, void dimensions and porosity distribution in material can be investigated by image analysis methods. One of these techniques owing to investigate is "Computer Tomography" (CT) technique. Internal structure analysis of the cementitious systems can be performed, and voids of micron dimensions can be appeared by CT. In this study, how use the CT method to analysis of the porosity and place of CT at concrete science was explained. However, various comparisons were done between MIP and Scanning Electron Microscope to CT.

**Keywords :** Mortar, Concrete, Porosity, Computerized Tomography and MIP.

## **1. GİRİŞ**

Çimentolu sistemler olarak bilinen harç ve beton, hidrate olmuş Portland çimentosu ile çeşitli granülometriye sahip agregalardan oluşmuş çimento esaslı kompozit malzemelerdir. Hidrate çimento hamuru, birbirine bağlantılı nanometreden mikrometreye kadar geniş aralıkta çok boşluklu bir yapıya sahiptir. Çimento hamurundaki boşluklar, C-S-H tabakaları arasında olup, karışım suyunun yapıdan uzaklaşması sonucunda oluşan, düzensiz şekle sahip ve birbirine bağlı boşluklardır. Bu boşluklar kapiler kanalları oluşturur ve zamanla hidrate ürünlerle kapanma eğilimine girer. Kapiler kanalların kapanması sonucunda çimento esaslı malzemelerin geçirimsizliği azalır [1, 2]. Porozitenin miktarı ve boşluklar

*Bu makaleye atıf yapmak için*

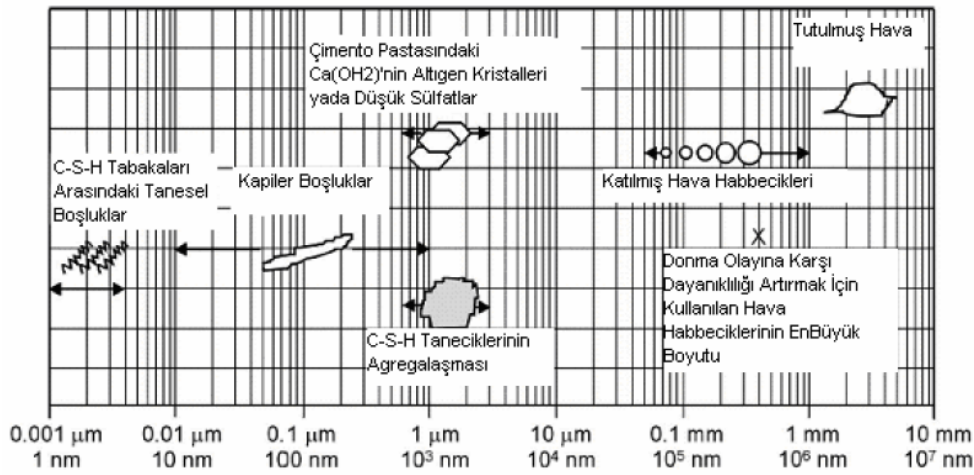
*Tekin İ., Bolat H., Çullu M., Subaşı S.. " Çimentolu Sistemlerde Porozite Analizi" Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi 2011, 7(2) 1-14*

*How to cite this article*

*Tekin İ., Bolat H., Çullu M., Subaşı S.. "Analysis of Porosity in Cementitious Systems" Electronic Journal of Construction Technologies, 2011, 7 (2) 1-14*

arasındaki bağlantı, malzeme özelliklerini güçlü bir şekilde etkiler. Porozitedeki artış çimentolu sistemlerdeki geçirimsizliğin artmasına sebep olur. Böylece zararlı iyonların yapıya penetrasyonu artar ve sonunda malzemenin zamana bağlı fiziksel direnci azalır. Betonarme elemanda boşluk suyuyla taşınan klor iyonlarının yapıya difüzyonu arttıkça, betonarme demirleri üzerinde oluşan korozyon da artarak direk olarak malzemenin dayanım ve dayanıklılığının azalmasına sebep olur. Bu durum özellikle köprülerde ve deniz yapılarında yüksek oranda görülmektedir. Ayrıca yapı elemanlarında meydana gelen geçirimsizliğin etkisiyle boşluklarda donma-çözülme etkisiyle içsel gerilmeler oluşur. Bu içsel gerilmeler sonucunda çimentolu sistemlerin dayanım ve dayanıklılığı azalır. Özellikle dış etkilere maruz beton yollarda, kaplamalarda ve köprü elemanlarında yoğun bir şekilde görülen donma-çözülme etkileri uzun vadede donatıda korozyonun da etkisiyle yapı elemanının yenilenmesini bile gerektirebilmektedir [2-4].

Çimentolu sistemlerde porozite ya da boşluk yapısı genel olarak, 1) Jel boşlukları 2) Kapiler boşluklar ve 3) Tutulmuş veya katılmış hava boşlukları olmak üzere üç kısımda incelenmektedir [5]. Ancak betondaki boşlukların karmaşık yapısından dolayı literatürde daha geniş bir sınıflandırma da yapılmıştır. Bu sınıflandırmada nanometre boyutundan milimetre boyutuna kadar geniş bir aralık dikkate alınmıştır [2]. Çimentolu sistemlerde oluşan bu geniş aralıktaki boşluk yapısı ve sınıflandırması Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Çimentolu sistemlerde oluşan gözeneklerin ölçü aralıkları [2]

Çimentolu sistemlerin boşluk yapılarındaki karmaşıklıktan dolayı, toplam porozite ve gözenek boyut dağılımının ölçümü oldukça zordur. Porozite ölçümlerinde; Cıva Püskürtmeli Porozimetre (MIP), Gaz Adsorpsiyonu, Solvent Yer Değişimi Tekniği, Helyum İç Akış Tekniği, Alternatif Akım Empedans Spektroskopisi (ACIS), Nükleer Manyetik Rezonans [6], Gravimetrik Metot [7], Optik Mikroskop Yöntemi [8] ve X-Işını Bilgisayarlı Tomografi (BT) [9-16] gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu tekniklerden uygulaması en kolay ve en çok kullanılan yöntem gravimetrik metottur. Bu yöntem standartlarca çerçevesi çizilmiş olması sebebiyle basit kütle tartımlarından ibaret olan özgül ağırlık ve su emme deneyi ile kapiler su emme deneylerinden ibarettir ve araştırmalarda en çok kullanılan yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [7]. Bu yöntem tüm yapı malzemelerinde ve doğal taşlarda genel görünür boşluk oranı hakkında bize fikir vermektedir. Ancak hassas bir yöntem olmayışı ve boşluk yapısı hakkında sınırlı bilgi üretmesi sebebiyle porozite ile ilgili araştırmaların eksik kalmasına sebep olmaktadır. Böylece ilgili konuda yorum yapılabilmesi güçleşmektedir.

Son 10 yılda kullanımı yaygınlaşan hassas ölçüm yöntemlerinden biri olan MIP yöntemi ile çimentolu sistemlerde boşluk yapısı ve dağılımını belirlemek mümkün olabilmektedir. Bu sistem son yıllarda boşluk yapısı ile ilgili çalışmalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Teknolojinin hızla gelişmesi sonucunda özellikle son 5 yıl içinde kullanımı hızla artan X-ışını BT ve X-ışını µBT sistemleri çimentolu sistemlerin porozite ölçümlerinde tahribatsız bir deney yöntemi olarak geniş uygulama alanı bulmaktadır. Bu araştırmada MIP ve X-ışını Bilgisayarlı Tomografi yöntemleri çimentolu sistemlerde oluşan porozitenin

ölçümü üzerinde karşılaştırmalı bir inceleme yapılmıştır.

## 2. POROZİTE ÖLÇÜM TEKNİKLERİ

### 2.1. Cıva Püskürtmeli Porozimetre (MIP)

Cıva püskürtmeli porozimetre yöntemi, ıslak halde olmayan akışkan bir maddenin yalnızca kapiler kanallardan malzeme içine basınçla emdirilme esasına dayanan bir yöntemdir. Basınç ve kapiler çap arasındaki ilişki Washburn [17] tarafından tanımlanmış olup Formül 1 ile hesaplanmaktadır.

$$P = (-4\gamma\cos\theta)/d \quad (1)$$

P = Basınç;  $\gamma$  = Akışkanın yüzey gerilimi;  $\theta$  = Akışkanın temas açısı; d = Kapilerin çapı

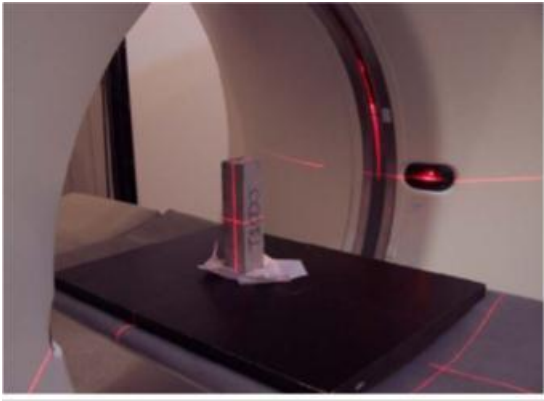
Deneyde cıva beton veya harç malzemenin boşlukları içine basınçla zerk edilir. Boşlukların boyutsal dağılımı, her bir basınç artışında emdirilen cıvanın hacmi cinsinden belirlenir. Toplam porozite, emdirilen cıvanın toplam hacim miktarı cinsinden bulunur [5]. MIP yöntemi kolay uygulanabilir bir teknik olduğu için kullanım alanı geniştir. Ancak ölçülebilen boşluk boyutları 2nm ile 200µm arasında kalan boyutlarla sınırlıdır [18]. Bu teknikle, cıva çimento esaslı malzemelerde çok dar boşluklardan geçerek büyük boşluklara ulaşabilir. Böylece boşluklarla ilgili yüzeysel ve genel bilgiye ulaşılabilir. Bu yaklaşım mürekkep şişesi (ink bottle) etkisi olarak bilinir. Boşluk çaplarındaki devamlılık ise cıvanın malzemedan sızması ile belirlenir. Bu çap, efektif ya da eşik çapı olarak belirtilmiştir.

MIP tekniğinin bir diğer limiti mürekkep şişesi etkisi olarak tanımlanan, çimento esaslı malzemeler ile cıva birleşme açısı üzerinde etkisidir. MIP yöntemi kullanılacak numunenin kuru olmasını gerektirir. Bu durum ölçümlerde boşluk yapısını değiştirir. Çimento hamurunun etüv kuruğu ya da hava kuruğu olması arasındaki bağ açısı değişimi 13° iken basınçta %30'luk değişimle boşluk çapı düşük ölçülür [19]. Bağlanma açısı malzemenin yüzey pürüzlülüğüne bağlı bir değişkendir [20]. Cıvanın malzeme içine basınçla emdirilmesi sırasında çimento mikro yapısının bozulacağı düşünülür. Tipik gözenek boyut aralığının dışında düşük basınçlama işleminde kırılma olasılığını düşürmek için cıva, bir miktar sodyum solüsyonu ile düzenlenir ve bu şekilde numune içine emdirilir. [21]. Yöntemin bir diğer handikabı kullanılan deney numunesinin boyutuyla ilgilidir. Yöntemde cıva emdirilecek olan numunenin 1 – 2,5 cm çaplı esas numuneden alınmış bir karot olması gerekmektedir. Karot işlemi numunenin bir miktar örselenmesine sebep olmaktadır. Örselenen numuneden elde edilen veriler gerçeğe uzak olmakta, böylece elde edilen sonuçlarda hata oranı artmaktadır.

MIP yöntemi, çimento esaslı malzemelerin boşluk şekilleri ve boyut dağılımı hususunda gerçek veriler sunmaz. Ancak, çimento esaslı malzemelerde boşlukların boyut dağılımlarını benzer sistemlerle karşılaştırmak için faydalı bir yöntemdir [22]. MIP yöntemiyle yapılan çeşitli çalışmalarda geçirimsizlik-basınç dayanımı, klor difüzyonu-porozite, porozite-basınç dayanımı gibi ilişkiler ile sertleşmiş betonda boşluk boyut dağılımı ve toplam porozite miktarları araştırılmıştır [23-30].

### 2.2. Bilgisayarlı Tomografi Yöntemi

Bilgisayarlı Tomografi (BT), farklı enerjilere sahip X-ışını demetinin malzemedan geçtikten sonra dedektörlere ulaşan azalmış X-ışınlarının bir bilgisayar sistemi tarafından analiz edilerek sayısal ölçüğe çevrilmesine dayalı bir görüntüleme yöntemidir. Yöntem 1963 yılında Cormack tarafından teorize edilmiş ancak 1967 yılında G. Hounsfield tarafından uygulanmıştır [31,32]. Son 10 yıl içinde bilgisayar sistemlerindeki gelişmelerle birlikte BT iki ayrı sistem olarak araştırmalarda kullanılmaktadır. Literatürde X-ışını BT ve X-ışını µBT olmak üzere iki yöntem bulunmaktadır [33-36]. Her iki yöntemde de kullanılan sistem üç ana kısımdan oluşmaktadır: 1) X-ışını tüpü, 2) Dedektörlerin bulunduğu tarayıcı ünitesi ve 3) Bilgisayar görüntüleme birimi (Şekil 1 ve 2) [37].

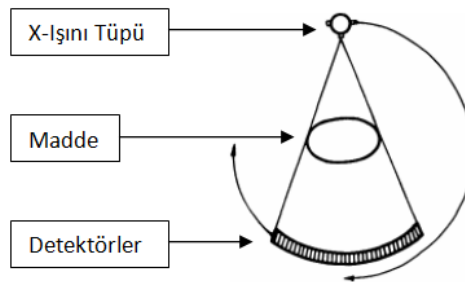


Şekil 2. Numunenin BT içindeki yerleşimi



Şekil 3. BT ve Bilgisayarda görüntüleme ünitesi

BT'ler üzerinde çeşitli teknolojik geliştirmeler yapılarak tarama süresi ve görüntüleme kapasitesi artırılmış ve günümüze kadar toplam 5 nesil BT üretilmiştir. Günümüzde kullanılan BT'ler 3, 4 ve 5 nesil sistemlerdir. Bunlardan en yaygın kullanılanları 3 ve 4. nesil olarak üretilen 512x512 matriks görüntüleme yapabilen, 200 keV 40-800 mA enerji düzeyi üretebilen ve helikal ile axial tarama yapabilen sistemlerdir. Tıp biliminde kullanılan medikal BT'lerin X-ışını tüpü 80 - 200 keV arasında farklı enerji seviyelerinde (polikromatik) ışınlar üretir. BT'de görüntülenecek malzeme için 80-200 keV arasında bir enerji düzeyi seçilir. Seçilen enerji düzeyindeki ışınlar maddeden geçerken bir kısmı madde tarafından tutulur, bir kısmı ise maddeden geçer. (X-ışını tutma kapasitesi maddenin atom numarası, hacim ve yoğunluğu ile ışının dalga boyuna bağlıdır.) Maddeden azalarak geçen X-ışınları detektörler tarafından algılanır ve bilgisayar sistemine iletilir. Bilgisayara iletilen veriler görüntüye dönüştürülür [38]. Şekil 3'te 3. Nesil bir BT'nin çalışma prensibi gösterilmiştir.

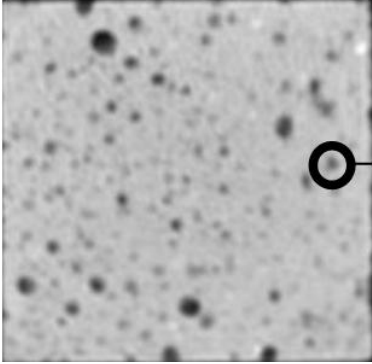


Şekil 4. BT'nin çalışma sistemi

### 2.2.1. BT'de görüntü oluşumu

BT görüntüleri dicom (Digital Imaging and Communications in Medicine) uzantılı resim dosyalarından oluşur. Dicom uzantılı resim dosyaları Şekil 4'te gösterildiği gibi piksel adı verilen resim elemanlarının oluşturduğu bir matriksten ibarettir. Matriks boyutu BT cihazlarının teknolojik gelişimine paralel olarak 256x256, 512x512 veya 1024x1024 olabilir. Pikseller seçilen kesit kalınlığına bağlı olarak voksel adı verilen bir hacme sahiptir. Voksel malzemeden geçen X-ışınınmı gösteren sayısal bir değer taşır. Bu değer "Hounsfield Units (HU)" olarak adlandırılır. Bu değerler suya göre "0" değerinde normalize edilmiştir. Uluslararası standartlarca su için "0" değeri, hava için "-1000" değeri kabul edilmiştir ve bu sayıların oluşturduğu ölçeğe HU ölçeği denmiştir [38]. Wong ve Chau yaptıkları bir araştırmada beton için 900-1800 arasında HU değeri elde etmişlerdir [10]. Chotard ve diğerleri çalışmalarında hidrate çimento hamurunun sertleşme sonucundaki değerinin 1550 olduğunu [39], Aruntaş, Tekin ve Birgül araştırmalarında sertleşmiş çimento hamurunun 1575-1887, çimento tozunun 896-1180 ve doğun su içeriğine sahip kumun 1071-1467 HU arasında olduğu belirlemişlerdir [40]. Bu sayıların oluşturduğu görüntü çimentolu sistemlerde bir topoçizelge harita gibidir. Bu harita sayesinde resim tüpünde oluşan görüntüde istenilen alanın yoğunluğu ölçülebilir. Şekil 5'te ve Şekil 4'te görülen çimento harcından elde edilmiş bir tomografi resmi Matlab programı ile işlenmiş ve HU haritası görüntülenmiştir. Şekil 4'te daire

içine alınan alan harç içinde bir makro boşluğu tanımlamaktadır. Tanımlanan bu boşluk Şekil 5'te koyu gri renkte ve beyaz sayılarla belirlenmiştir.



Şekil 5. Dicom uzantılı BT

1427	1147	832	543	430	487	758	1080	1405
1385	1101	706	342	165	222	513	889	1255
1352	1071	654	281	50	108	400	794	1160
1314	1053	694	347	133	192	464	835	1157
1275	1090	826	526	397	441	679	991	1257
1292	1169	994	787	752	791	994	1209	1404

Şekil 6. Resimdeki bölgenin HU değerleri (pikseller)

BT'de oluşturulan görüntülerde matriks sayısına bağlı olarak farklı piksel boyutları oluşur. BT sistemlerinde görüntü alanı (Field of view) sabit olduğu için 512x512 matriks için piksel boyutu en az 187,5  $\mu\text{m}$  olabilir. Bu sebeple ancak 187,5  $\mu\text{m}$  hassasiyette görüntü elde edilebilir. Ancak bu hassasiyet asıl olarak detektörün hassasiyetine ve boyutuna bağlıdır. BT görüntülerinde üst nesillerde yaklaşık olarak 350  $\mu\text{m}$  görüntü algılayabilecek detektörler kullanılmaktadır. Ancak görüntü oluşturma sırasında bu hassasiyet matematik algoritmalarla  $\sim 90$   $\mu\text{m}$ 'ye kadar azalabilmektedir. Görüntülerde elde edilen bir piksel karşılık gelen yoğunluk değeri matematik algoritmalarla elde edildiği için yanıltıcı bir faktördür [37].

$\mu\text{BT}$  cihazlarda sistem biraz farklıdır.  $\mu\text{BT}$ 'nin çalışma prensibi aynı BT cihazlarda olduğu gibidir. Ancak BT cihazından tek farkı detektörlerde CCD optik kamera bulunmasıdır. Bu sebeple görüntü belirli oranda büyütülerek oluşturulmaktadır. Optik görüntüler gerçek büyütme sağladığı için çok küçük ayrıntılarda dahi net görüntülere ulaşılabilmektedir. 1024x1024 matriks yapıda 1  $\mu\text{m}$ 'den daha küçük detaylara kadar görüntü oluşturabilmektedir [41].

BT'de oluşturulan görüntülerin porozite analizlerinin yapılabilmesi için bir dicom formatını işleyici bilgisayar programına ihtiyaç vardır. Günümüzde kullanılan programlardan en yaygınları: 3D Doctor, Image Pro, Tomovision ve Sun Microsystems yazılımlarıdır. Bu programlar çeşitli görüntü analiz metotlarını uygulayabilmektedirler. Porozite verisine ulaşmak için en çok uygulanan yöntem, görüntü üzerinde piksel değerleri okunarak alansal veriye dönüştürülmesine dayalı yöntemdir. Ancak literatürde çalışmaların bir kısmı, araştırmacıların "Matlab" programını yazılım oluşturmada kullanarak kendi yazmış oldukları programlarca yapılmaktadır [42]. BT yöntemleri ASTM standartlarına dönüştürülmüştür [43-45]. Bu standartlarda elde edilen görüntünün işlenmesi ve cihaz konfigürasyonları ile cihazın görüntüleme ve donanımsal hataları tanımlanmış ve açıklanmıştır. Ancak sistem medikal ağırlıklı olması sebebiyle malzeme araştırmaları konusunda eksiklik bulunmaktadır.

BT ile ilgili çalışmaların birçoğu 1980 yılından bu güne kaya mekaniği ve petrol mühendisliği alanlarında yapılmıştır. Ancak son 10 yılda yapı malzemeleri üzerine çalışmalar hızla artmakta ve BT kullanımı agrega dağılımı [42], boşluk yapısı, gelişimi ve dağılımı [9, 10, 16], asfalt betonu ve kırılma mekaniği [11], sülfat etkileri [33, 34, 46] gibi alanlarda birçok makaleye konu olmuştur.

### 3. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

MIP yöntemi porozite belirlemede BT yöntemine göre çok kaba bir yöntem olarak görülmektedir. MIP

yöntemi, heterojen ve karmaşık malzemelerde boşlukların düzensizliği, boşluk boyutlarındaki farklılıklar ve boşluklar arasındaki bağların varlığı dikkate alındığında yapılan ölçümlerde hata payının yüksek olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca MIP yönteminin sınırlılıklarından biri belirli boyutlarda kapiler kanalların ölçülebilme yeterliliğidir. MIP yöntemi ile 5 – 10 µm arasındaki kapiler boşluklar ölçülebilmektedir [22]. MIP yönteminin bir diğer olumsuz yönü, uygulanan numunenin boyutları ve kuruluk derecesine bağlı oluşudur. MIP yöntemi için önerilen numune boyutu 10 mm çapındadır. Bu numune boyutu esas örnekten karot alma ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Bununla birlikte karot alınırken numunenin iç yapısında oluşabilecek her türlü hasar elde edilecek verilerin hata oranını artırmaktadır. Her iki faktör numunenin boşluk yapısının çok yüksek gerçeklikte sunulmasını engellemektedir. Ayrıca bu yöntem tahribatlı bir deney yöntemidir, böylece aynı numune üzerinde tekrarlı ölçümler yapmak mümkün değildir. Ancak uygulama kolaylığı ve ekonomik oluşu bu yöntemin kullanım oranını artırmaktadır.

BT kullanımı ve uygulaması zor bir teknik olmakla beraber, detaylı veri elde edilebilmesi, matematiksel yaklaşımla gerçekliğe daha yakın olması sebebiyle tercih edilmektedir. BT yönteminin yalnızca porozite analizi için ekonomik bir yöntem olmadığı kesindir. Ancak BT'nin gelişmiş yöntemler içinde tahribatsız bir deney metodu olması ve aynı örnek üzerinde defalarca görüntü alınabilmesi sebebiyle uygulama alanı çok geniştir. BT ile alınan görüntüler üzerinde toplam boşluk miktarı, boşluk sınıflandırması, boşluk boyut dağılımı ve boşluk yapısı gibi bilgilere ulaşılabilir. Bunların yanı sıra µBT sistemler ile agrega ve çimento hamuru ilişkileri de gözlemlenebilmektedir [42]. Piksel boyutları ne kadar küçülürse o kadar hassas bir çalışma yapılabilir. Bu sebeple teknoloji ilerledikçe BT ile daha hassas çalışmalar yapılabilir. Günümüz teknolojisine sahip BT'ler ile çimentolu sistemlerdeki jel boşluklarının görüntülenmesi mümkün değildir. Ancak hem BT ve hem de µBT ile tutulmuş ve katılmış hava boşluklarının analizleri rahat bir şekilde yapılabilir.

Sonuç olarak BT yöntemi MIP yöntemine göre çok daha derin ve detaylı bilgi verebilen, aynı zamanda yüksek doğrulukta sonuçların alınabildiği bir yöntemdir. MIP yöntemine göre en büyük dezavantajı her iki BT sisteminin ekonomik bir sistem olmayışıdır. BT teorize edildiği günden bugüne çok daha küçülmüş ve daha ergonomik bir yapıya büründürülmüştür. Teknolojinin gelişmesi ile gelecekte bu cihazların tüm araştırmalarda kullanılacağı düşünülmektedir. Ancak radyasyonun malzemedeki etkileri düşünüldüğünde malzemelerde oluşabilecek dayanım ve dayanıklılık kayıplarının da araştırılması gerekmektedir. MIP yöntemi ile mikro BT sistemleri karşılaştırılmalı, aralarında korelasyonlar ileriki çalışmalarda konu olarak ele alınmalıdır. Böylece MIP yönteminden elde edilen veriler çeşitli düzeltme katsayılarıyla daha kullanışlı hale gelebilir. Bunun yanı sıra MIP yönteminde kullanılan deney numuneleri hazırlanırken, özellikle karşılaştırma yapılan çalışmalarda, karot alımı işlemlerinde yüksek hassasiyette çalışılmalı ve numunenin örselenmemesine dikkat edilmelidir. Hata oranını en aza indirmek için fazla numune ile çalışılmalıdır.

Çalışmalarda porozite genel anlamda çalışılacak bir konu olarak ele alındığında medikal BT ile yalnız makro boşluklar üzerinde araştırma yapılacağı düşünülürse, ilgili çalışmanın MIP ile desteklenmesi gerekmektedir. Medikal BT sistemler kapiler kanalların belirlenmesi hususunda uygun bir yöntem değildir. Bu sebeple mikro BT yada MIP yöntemi destek olarak kullanılabilir. Ancak bu iki yöntemin de tahribatlı olduğu unutulmamalıdır. Medikal BT'lerin diğer yöntemlere göre bir diğer handikapı çimentolu sistemler üzerinde oluşturduğu radyasyon etkileridir. X-ışını radyasyonunun iyonizan etkileri çimentolu sistemlerin dayanım gelişiminde ve hidrasyon reaksiyonlarında olumsuz etkileri olduğu ilgili çalışmalarda görülmüştür. Bu sebeple görüntüleme sırasında olabildiğince az enerji seviyeleri seçilmeli ve numune uzun süreler radyasyon etkisinde bırakılmamalıdır.

## 6. KAYNAKLAR

1. Powers, T. C., 1958, The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete, Portland Cement Association, Skokie.
2. Mehta P.K., 2006, Monteiro P.J.M., Concrete Microstructure, Properties and Materials, McGraw-Hill, New York.
3. Mindess S, Young J.F, Darwin D., 2003, Concrete, Prentice Hall, USA.
4. Erdoğan T.Y., 2003, Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara.
5. Jennings H.M., Thomas J.J., Rothstein D, Chen J.J., 2001, Cements As Porous Material, Northwestern Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Ders Notları, USA.
6. Ramachandran V.S. ve Beaudoin J.J., 2001, Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology, William Andrew Publishing, USA.
7. PCA, 1980, Principles of Quality Concrete, Portland Cement Association, Wiley, USA.
8. Hover K.C., 1994, "Air Content and Unit Weight of Hardened Concrete", Editorler: Klieger P. ve Lamond J.F., Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, ASTM, STP169C.
9. Tekin İ., Birgül R., Aruntaş H.Y., 2010, "Determination of Void Development in Cement Mortar by Computerized Tomography", Cement and Concrete World, 84, 67-76.
10. Wong R.C.K., Chau K.T., 2005, "Estimation of Air Void and Aggregate Spatial Distribution in Concrete Under Uniaxial Compression Using Computer Tomography Scanning", Cement and Concrete Research, 35, 1566-1576.
11. Wang L.B., Frost J.D., Voyiadjis G.Z., Harman T.P., 2003, "Quantification of Damage Parameters Using X-Ray Tomography Images", Mechanics of Materials, 35, 777-790.
12. Argandoda V.G.R., Rey A.R., Celorio C., Rio L.M.S., Calleja L., Llavona J., 1999, "Characterization by Computed X-Ray Tomography of the Evolution of the Pore Structure of Dolomite Rock During Freeze-Thaw Cyclic Tests", Physics and Chemical Earth (A), 24 - 7, 633-637.
13. Martz H. E., Robersona G. P., Skeatea M. F., Schneberka D. J., Azevedo S. G., 1991, "Computerized tomography studies of concrete samples", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 58 - 2, 216-226.
14. Morgan I. L., Ellinger H., Klinksiek R., Thompson J. N., 1980, "Examination of Concrete by Computerized Tomography", ACI Journal Proceedings, 77- 1, 23-27.
15. Chotard T.J., Bonceur-Martel M.P, Smith A., Dupuy J.P., Gault C., 2003, "Application of X-Ray Computed Tomography to Characterize The Early Hydration of Calcium Aluminate Cement", Cement and Concrete Composites, 25, 145-152.
16. Landis E.N., Corr D.J., 2006, "Three Dimensional Analysis of Air Void Systems in Concrete", Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties, 6, 517-524.
17. E.W. Washburn, 1921, "Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material" Proceedings of the National Academy of Sciences, 7, 115-116.



18. Hearn Et. Al., 1994 “Pore structure and permeability”, Editorler: Klieger P. ve Lamond J.F., Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, ASTM.
19. D.N. Winslow, S. Diamond, 1970 “A mercury porosimetry study of the evolution of porosity in hardened cement pastes”, ASTM Journal of Materials, 5, 564-585.
20. J.D. Eick, R.J. Good, A.W. Neumann, 1975, “Thermodynamics of Contact Angles. II. Rough Solid Surfaces,” Journal of Colloid Interface Science, 53, 235–248.
21. R.F. Feldman, 1984, “Pore Structure Damage In Blended Cements Caused By Mercury Intrusion”, Journal of the American Ceramic Society, 67 - 1, 30-33.
22. Abell A.B., Willis K.L., Lange D.A., 1999, "Mercury Intrusion Porosimetry and Image Analysis of Cement-Based Materials", Journal of Colloid and Interface Science, 211, 39-44.
23. Khatib J.M., Mangat P.S, 2003, “Porosity Of Cement Paste Cured At 45°C As A Function Of Location Relative To Casting Position” Cement and Concrete Research, 25, 97-108.
24. Jiang L., Guan Y., 1999, “Pore Structure and Its Effect on Strength of High-Volume Fly Ash Paste” Cement and Concrete Research, 29, 631-633.
25. Chan Y.N., Luo X., Sun W., 2000, “800°C’ye Kadar Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakıldıktan Sonra Yüksek Performanslı Betonun Basınç Dayanımı ve Por Yapısı”, Cement and Concrete Research, 30, 247-251.
26. Cui L., Cahyadi J.H., 2001, “Permeability and Pore Structure of OPC paste”, Cement and Concrete Research, 31, 277-282.
27. Okpala D.C., 1989, “Pore Structure of Hardened Cement Paste and Mortar”, Cement and Concrete Composites, 11-4, 245-254.
28. Tanaka K., Kurumisawa K., 2002, “Development of technique for observing pores in hardened cement paste” Cement and Concrete Research, 32, 1435-1441.
29. Knöfel D., Wang J.F., 1995, “Hızlı sertleşen çimentoların por yapısı” Çimento Dünyasından Tercümeleler,71, 21-3.
30. Caré S., 2008, “Effect of temperature on porosity and on chloride diffusion in cement pastes”, Construction and Building Materials, 22 - 7, 1560-1573.
31. Oyar O., 1998, Radyolojide Temel Fizik Kavramlar, Nobel Tıp Kitabevleri, İstanbul.
32. Bushong S.C., 1984, Radiologic Science for Technologist, Physics, Biology, and Protection, The C.V.Mosby Company, Toronto.
33. Stock S.R., Naik N.K., Wilkinson A.P., Kurtis K.E., 2002, “X-ray microtomography (microCT) of the progression of sulfate attack of cement paste”, Cement and Concrete Research, 32, 1673–1675.
34. Naik N.N., Jupe A.C., Stock S.R., Wilkinson A.P., Leed P.L., Kurtis K.E., 2006, “Sulfate attack monitored by microCT and EDXRD: Influence of cement type, water-to-cement ratio, and aggregate”, Cement and Concrete Research, 36 - 1, 144-159.



35. Martz H. E., Robersona G. P., Skeatea M. F., Schneberka D. J., Azevedo S. G., 1991, “Computerized tomography studies of concrete samples”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 58 - 2, 216-226.
36. Saleh Habeeb H., 2004, “The Use of X-Ray Computed Tomography (CT) Techniques to Study the Internal Structures of Concrete”, 2<sup>nd</sup> MENDT Proceedings, 9, 6, USA.
37. Tekin İ., 2005, “Çimento Harçlarının Porozitesinin Bilgisayarlı Tomografi ile Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
38. Tuncel E., 2002, Klinik Radyoloji, Nobel & Güneş, İstanbul.
39. Chotard T.J., Smith A., Boncoeur M.P., Fargeot D., Gault C., 2003, “Characterisation of early stage calcium aluminate cement hydration by combination of non-destructive techniques: acoustic emission and X-ray tomography”, Journal of the European Ceramic Society, 23, 2211–2223.
40. Aruntaş H.Y., Tekin İ., Birgül R., 2010, “Determining Hounsfield Unit values of mortar constituents by computerized tomography”, Measurement, 43, 410-414
41. Skyscan  $\mu$ Tomografi sistemi, <http://www.skyscan.be/products/1172.htm>.
42. Erdogan S.T., Quiroga P.N., Fowler D.W., Saleh H.A., Livingston R.A., Garboczi E.J., Ketcham P.M., Hagedorn J.G., Satterfield S.G., 2006, “Three-dimensional shape analysis of coarse aggregates: New techniques for and preliminary results on several different coarse aggregates and reference rocks”, Cement and Concrete Research, 36, 1619–1627.
43. ASTM E1935 – 97, 2008, Standard Test Method for Calibrating and Measuring CT Density, USA.
44. ASTM E1441 - 11, 2008, Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging, USA.
45. ASTM E1570 - 11, 2008, Standard Practice for Computed Tomographic (CT) Examination, USA.
46. Tekin İ., 2010, “Sülfat etkisine maruz farklı çimento harçlarındaki makro boşluk gelişiminin Bilgisayarlı Tomografi yöntemi ile incelenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara .