

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSTATİSTİK VE BİLGİSAYAR BİLİMLERİ ANABİLİM DALI

SAYISAL GÖRÜNTÜLERDE İKİ BOYUTLU NESNE ANALİZİ İLE BETON
BOŞLUK ORANININ KESTİRİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eda ÖZKUL

ARALIK 2014
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSTATİSTİK VE BİLGİSAYAR BİLİMLERİ ANABİLİM DALI

**SAYISAL GÖRÜNTÜLERDE İKİ BOYUTLU NESNE ANALİZİ İLE BETON
BOŞLUK ORANININ KESTİRİMİ**

Eda ÖZKUL

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"YÜKSEK LİSANS (İSTATİSTİK)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05.12.2014
Tezin Savunma Tarihi : 26.12.2014

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Orhan KESEMEN

Trabzon 2014

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalında
Eda ÖZKUL tarafından hazırlanan

SAYISAL GÖRÜNTÜLERDE İKİ BOYUTLU NESNE ANALİZİ İLE BETON
BOŞLUK ORANININ KESTİRİMİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 09 / 12 / 2014 gün ve 1580 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Orhan KESEMEN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Uğur ŞEVİK

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

“Sayısal Görüntülerde İki Boyutlu Nesne Analizi İle Beton Boşluk Oranının Kestirimi” isimli bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Başta tez çalışma süresince değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Orhan KESEMEN’e, bugünlere gelmemde emeği geçen bütün öğretmenlerime ve lisans eğitimimden bu yana bilgilerinden faydalanmamı sağlayan bütün bölüm hocalarıma, numunelerin teminindeki yardımları ve beton konusunda verdiği bilgilerden dolayı DSİ İnşaat Mühendisi Ergin TUNÇ’a, tez süresince hiçbir yardımdan kaçınmayan başta Özge TEZEL, Merve KESİM, Yeşim YEGİNOĞLU ve Serkan AKBAŞ olmak üzere emeği geçen bütün arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak tüm hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her adımında arkamda duran ve bugünlerimin mimarı olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Eda ÖZKUL

Trabzon 2014

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Sayısal Görüntülerde İki Boyutlu Nesne Analizi İle Beton Boşluk Oranının Kestirimi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Orhan KESEMEN’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 05/12/2014

Eda ÖZKUL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Beton.....	2
1.3. Donma-Çözülme Olayı.....	4
1.4. Hava Boşluğu.....	4
1.5. Sertleşmiş Betonda Hava Boşluk Analizi.....	7
1.5.1. Hava Boşluk Yapısı Parametrelerinin Belirlenmesi	7
1.5.1.1. Toplam Hava İçeriği	7
1.5.1.2. Mikro Hava İçeriği	8
1.5.1.3. Özgül Yüzey	8
1.5.1.4. Boşluk Faktörü	8
1.6. Görüntü İşleme	9
1.7. Sayısal Görüntü	9
1.7.1. Sayısal Görüntü Çeşitleri.....	11
1.7.1.1. İkili (Binary) Görüntüler.....	11
1.7.1.2. Gri seviyeli görüntüler.....	12
1.7.1.3. Gerçek Renk Görüntüleri (Renkli Görüntü).....	13
1.7.1.4. Özel Görüntüler	14
1.7.2. Görüntü Histogramı	15

1.7.3.	Eşikleme	16
1.7.4.	Morfolojik İşlemler.....	19
1.7.4.1.	Genişleme (Dilation)	20
1.7.4.2.	Aşınma (Erosion).....	21
1.7.4.3.	Açma (Opening) ve Kapama (Closing)	23
1.7.5.	Bağlantılı Bileşen Etiketleme (Connected Component Labeling).....	24
1.7.5.1.	Yayılarak Doldurma Yöntemi ile Nesnelerin Etiketlemesi	24
1.7.5.2.	Sıralı Etiketleme ile Nesnelerin Etiketlenmesi	25
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	31
2.1.	Giriş	31
2.2.	Yapay Beton Benzetimi	31
2.2.1.	Model Parametrelerinin Belirlenmesi	32
2.2.2.	Gerçek Numunelerden Boşluk Dağılımının Belirlenmesi	38
2.2.3.	Gerçek Numunelerden Boşluk Dağılım Parametrelerinin Tahmini	44
2.2.4.	Gerçek Numune Parçalarının Karşılaştırılması	47
2.2.5.	Gerçek Numunelerden Boşluk Oranının Belirlenmesi	53
2.2.6.	Yapay Beton Numune Modelinin Oluşturulması	56
2.3.	Yapay Model Analizi.....	71
2.3.1.	Ölçüm Doğrusu Yöntemine Göre Analiz	72
2.3.2.	Önerilen Yönteme Göre Analiz	75
2.3.2.1.	Sayısallaştırma Hatasının Düzeltilmesi	78
2.3.2.2.	Dağılımsal Örnekleme Hatasının Düzeltilmesi	79
2.3.3.	Student-t Testi ile Değerlendirme.....	81
2.3.4.	Doğrulama Yüzdesinin Hesaplanması.....	84
2.4.	Gerçek Numune Çalışması	87
2.4.1.	Numune Üzerinde Yapılan İşlemler	87
3.	BULGULAR VE SONUÇLAR.....	97
3.1.	Gerçek Model Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	97
3.2.	Yapay Model Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	100
4.	ÖNERİLER.....	102
5.	KAYNAKLAR	103

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans

ÖZET

SAYISAL GÖRÜNTÜLERDE İKİ BOYUTLU NESNE ANALİZİ İLE BETON
BOŞLUK ORANININ KESTİRİMİ

Eda ÖZKUL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Orhan KESEMEN
2014, 105 Sayfa

Sertleşmiş betonda hava boşluk analizi ASTM C-457 ve EN 480-11 standartlarına göre yapılmaktadır. Bu standartlarda belirtilen yöntemlerle numune analizi teknik bir uzman tarafından yapılmaktadır. Bir numunenin bir uzman tarafından analiz edilmesi ortalama 2 gün gibi uzun bir sürede gerçekleşmektedir. Numune analiz edilirken insan kaynaklı ölçüm hataları sıklıkla yapılmakta ve bu istenmeyen sonuçlar çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada daha hızlı ve daha doğru bir yöntemin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yüksek çözünürlüklü bir tarayıcı yardımıyla taranan beton numuneleri bilgisayar ortamına aktarılır ve gerekli görüntü işleme teknikleri uygulandıktan sonra boşluk analizi yapılabilmektedir. Literatürde yapılan benzer çalışmalarda standart yöntemlere göre yapılan analizin mikroskop yerine tarayıcıyla yapılması önerilmektedir. Bu çalışmada standartlarda tanımlanan çizgisel analiz yerine görüntü işleme teknikleri kullanılarak alansal bir analiz yapılmıştır. Yapılan analizin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla, yarıçapı log-normal dağılıma sahip yapay hava baloncukları 3 boyutlu bir dikdörtgen prizma içerisine yerleştirilmiştir. Bu prizmanın orta kısmından bir kesit alınarak 2 boyutlu bir kesit yüzey elde edilmiştir. Bu çalışmada, kesit yüzeydeki hava boşlukları hem standartlarda belirtilen ölçüm doğrusu yöntemine hem de önerilen yöntemlere göre analiz edilmiştir ve elde edilen sonuçlar prizma içerisindeki gerçek hava boşluk oranlarıyla karşılaştırılarak yöntemlerin başarımları ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Beton, Sertleşmiş Betonda Hava Boşluk Analizi, Görüntü İşleme.

Master Thesis

SUMMARY

ESTIMATION OF AIR VOID RATIO ON HARDENED CONCRETE WITH 2-DIMENSIONAL OBJECT ANALYSIS ON DIGITAL IMAGES

Eda ÖZKUL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Statistical and Computer Science Graduate Program
Supervisor: Assist. Prof. Orhan KESEMEN
2014, 105 Pages

Air void analysis on hardened concrete is determined according to ASTM C-457 and EN 480-11. According to methods defined in these standards, specimen analysis is carried out by a technical expert. Analyzing a specimen by an expert is performed in a long time such as average 2 days. When analyzing specimen, human-induced measurement errors is often made and this leads to undesirable results. Therefore, it is aimed to improve a faster and more accurate method in this study. Scanned concrete specimens by using a high resolution is transferred to computer, and air void analysis can be made after required image processing techniques are applied. In similar studies in the literature, it is proposed that analyses performed according to standard methods can be made by a scanner instead of a microscope. In this study, it is made areal analysis by using image analysis techniques instead of linear analysis in the standards. In order to prove the accuracy of the analysis, artificial air bubbles whose radius has log-normal distribution is placed in a 3-dimensional rectangular prism. 2-dimensional section surface is obtained by cutting from the center of this prism. In this study, air voids in the section surface is analyzed according to both linear traverse method defined in the standards and proposed method, and performance of the methods is measured by comparing obtained results with real air void ratio in the prism.

Key Words: Concrete, Air Void Analysis on Hardened Concrete, Image Processing

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Sürüklenmiş hava boşluğu, sıkıştırılmış hava boşluğu ve agrega	5
Şekil 2.	Sayısal görüntü koordinatları.....	10
Şekil 3.	Sayısal görüntü ve gözetik değerleri.....	10
Şekil 4.	Bit derinlikli görüntüler, (a)Renkli görüntü; (b) İkili görüntü.....	11
Şekil 5.	Gri seviyeli görüntü	12
Şekil 6.	Gri seviyeli görüntü ve gözetik değerleri.....	13
Şekil 7.	Görüntü histogramı, (a) Gri seviyeli görüntü; (b) Gri seviyeli görüntü histogramı	16
Şekil 8.	Görüntü eşikleme, (a) Gri seviyeli görüntü; (b) Eşikleme işlemi sonucu oluşan ikili görüntü	18
Şekil 9.	Farklı yapısal eleman örnekleri, (a) 1×3 boyutunda çizgi şekilli yapısal eleman; (b) 3×3 boyutunda kare şekilli yapısal eleman; (c) Haç şekilli yapısal eleman; (d) Periyodik hat şekilli yapısal eleman	19
Şekil 10.	Genişleme işleminde yapısal elemanın kullanımı	20
Şekil 11.	Genişleme işlemi (a) Sayısal görüntü; (b) Genişleme işlemi uygulanmış görüntü.....	21
Şekil 12.	Aşınma işleminde yapısal elemanın kullanımı	22
Şekil 13.	Aşınma işlemi, (a) Sayısal görüntü; (b) Aşınma işlemi uygulanmış görüntü.....	22
Şekil 14.	Açma işlemi, (a) Gerçek görüntü; (b) Açma işlemi uygulanmış görüntü	23
Şekil 15.	Kapama işlemi, (a) Gerçek görüntü; (b) Kapama işlemi uygulanmış görüntü.....	24
Şekil 16.	Komşuluk gösterimi, (a) 4-komşuluk; (b) 8-komşuluk.....	26
Şekil 17.	Ön etiketleme işleminin adımları.....	27

Şekil 18.	Etiket çakışmalarının gösterimi, (a) 1. adım sonundaki etiket değerleri; (b) Etiket çakışmaları.....	28
Şekil 19.	Etiketleme işlemi uygulanmış görüntü	28
Şekil 20.	Rosenfeld ve Pflatz BBE filtreleri, (a) İleriye doğru satır tarama filtresi; (b) geriye doğru satır tarama filtresi	29
Şekil 21.	Kesilmiş numune kesiti.....	33
Şekil 22.	Çinko pastası yedirilmiş ve mavi boyanmış numune kesiti.....	33
Şekil 23.	Düşey yönde gösterilmiş numune kesiti görüntüsü	34
Şekil 24.	Numune görüntüsünün parçalara bölünmesi	35
Şekil 25.	Parçalanmış numune görüntülerinin iki düzeyli eşiklenmesi	36
Şekil 26.	Eşiklenmiş görüntülerin etiketlenmesi	37
Şekil 27.	Tüm parçalardaki nesnelere yarıçaplarının histogramları	39
Şekil 28.	Her numune parçasındaki nesnelere yarıçaplarının dağılımı	43
Şekil 29.	Bütün numunedeki hava boşluğu yarıçaplarının dağılımının gösterilmesi	47
Şekil 30.	Numune kesitindeki agregaların belirlenmesi	54
Şekil 31.	Numune kesitindeki hava boşluklarının belirlenmesi.....	55
Şekil 32.	Üç boyutlu yapay hava boşlukları modelinin grafiksel örnek gösterimi	59
Şekil 33.	Birinci aşamada hava boşluklarının yerleştirilmesi	63
Şekil 34.	İkinci aşamada hava boşluklarının yerleştirilmesi, önceki adımda seçilen kısımın doldurulması	64
Şekil 35.	Üçüncü aşamada hava boşluklarının yerleştirilmesi, önceki adımda seçilen kısımın doldurulması	65
Şekil 36.	Dördüncü aşamada hava boşluklarının yerleştirilmesi, önceki adımda seçilen kısımın doldurulması	66
Şekil 37.	Yapay agregaların modellerinin oluşturulması	67
Şekil 38.	Hava boşlukları modelinin kesitinin kırılma sınırları	68
Şekil 39.	Modele agregaların yerleştirilmesi	69

Şekil 40.	Agregalı modelin kenarlarından kırılması	70
Şekil 41.	Modele ölçüm doğrularının eklenmesi	74
Şekil 42.	Modeldeki boşluk dağılımı	76
Şekil 43.	İkil görüntüdeki nesnelerin etiketlenmesi ve renklendirilmesi.....	77
Şekil 44.	Gözek tabanlı bir görüntüde gerçek daire ile işaretlenen gözeklerin alanları arasındaki farklılıkların gösterimi.....	78
Şekil 45.	Sürekli dairenin yarıçapları ile ayırık dairenin yarıçapları arasındaki farkın eğri uydurması.....	79
Şekil 46.	100 model için mikro hava içeriği grafiksel karşılaştırılması.....	83
Şekil 47.	100 model için toplam hava içeriği grafiksel karşılaştırılması	83
Şekil 48.	Numune 1, (a) Taranmış gerçek beton numune kesiti; (b) Eşikleme işlemi uygulanmış gerçek beton numune kesiti.....	89
Şekil 49.	Numune 2, (a) Taranmış gerçek beton numune kesiti; (b) Eşikleme işlemi uygulanmış gerçek beton numune kesiti.....	91
Şekil 50.	Numune 3, (a) Taranmış gerçek beton numune kesiti; (b) Eşikleme işlemi uygulanmış gerçek beton numune kesiti.....	93
Şekil 51.	Numune 4, (a) Taranmış gerçek beton numune kesiti; (b) Eşikleme işlemi uygulanmış gerçek beton numune kesiti.....	95
Şekil 52.	Numune 1 için ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yöntemden elde edilen birikimli boşluk oranlarının grafiksel karşılaştırılması.....	98
Şekil 53.	Numune 2 için ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yöntemden elde edilen birikimli boşluk oranlarının grafiksel karşılaştırılması.....	98
Şekil 54.	Numune 3 için ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yöntemden elde edilen birikimli boşluk oranlarının grafiksel karşılaştırılması.....	99
Şekil 55.	Numune 4 için ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yöntemden elde edilen birikimli boşluk oranlarının grafiksel karşılaştırılması.....	100

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Gri seviyeli görüntülere ait bit derinlikleri ve kullanım alanları	14
Tablo 2. Renkli görüntülere ait bit derinlikleri ve kullanım alanları	14
Tablo 3. Özel görüntülere ait bit derinlikleri ve kullanım alanları	15
Tablo 4. Normal dağılıma göre tüm parçaların Logaritmik Olabilirliği (*: en büyük olabilirlik)	40
Tablo 5. Log-normal dağılıma göre tüm parçaların Logaritmik Olabilirliği (*: en büyük olabilirlik)	41
Tablo 6. Weibull dağılımına göre tüm parçaların Logaritmik Olabilirliği (*: en büyük olabilirlik)	41
Tablo 7. Üstel dağılıma göre tüm parçaların Logaritmik Olabilirliği (*: en büyük olabilirlik)	41
Tablo 8. Gamma dağılımına göre tüm parçaların Logaritmik Olabilirliği (*: en büyük olabilirlik)	42
Tablo 9. Bütün numunelerin seçilen dağılımlara göre Logaritmik Olabilirliği (*: en büyük olabilirlik)	42
Tablo 10. Her parçanın Log-normal dağılıma uyumunun Kolmogorov-Smirnov testine göre p değerleri (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar).....	44
Tablo 11. Parça modellerdeki hava boşluklarının yarıçaplarının ortalamaları	45
Tablo 12. Parça modellerdeki hava boşluklarının yarıçaplarının varyansları.....	45
Tablo 13. Parça modellerdeki hava boşluk dağılımlarının μ parametreleri.....	46
Tablo 14. Parça modellerdeki hava boşluk dağılımlarının σ parametreleri.....	46
Tablo 15. $P11$ parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar).....	47
Tablo 16. $P12$ parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar).....	48

Tablo 17.	<i>P13</i> parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar).....	48
Tablo 18.	<i>P14</i> parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar).....	48
Tablo 19.	<i>P21</i> parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar).....	49
Tablo 20.	<i>P22</i> parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar).....	49
Tablo 21.	<i>P23</i> parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar).....	49
Tablo 22.	<i>P24</i> parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar).....	50
Tablo 23.	<i>P31</i> parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar).....	50
Tablo 24.	<i>P32</i> parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar).....	50
Tablo 25.	<i>P33</i> parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar).....	51
Tablo 26.	<i>P34</i> parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar).....	51
Tablo 27.	<i>P41</i> parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar).....	51
Tablo 28.	<i>P42</i> parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar).....	52
Tablo 29.	<i>P43</i> parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar).....	52
Tablo 30.	<i>P44</i> parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar).....	52
Tablo 31.	Üç boyutlu 100 yapay model ortalama boşluk oranları ve bu oranların birikimli değerleri	71
Tablo 32.	Üç boyutlu 100 yapay modelin <i>y</i> eksenine göre ortadan kesit görüntüsünden elde edilen ölçüm doğrusu boyunca kesilen kırıtlara göre ortalama boşluk oranları ve bu oranların birikimli değerleri.....	73

Tablo 33.	Sayısallaştırma ve dağılımsal örnekleme hatalarının düzeltilmesi sonucu elde edilen boşluk oranları ve birikimli boşluk oranları.....	81
Tablo 34.	Hesaplanan boşluk oranlarının student-t ile karşılaştırılması.....	82
Tablo 35.	Mikro hava içeriği açısından ölçüm doğrusu yöntemi ile elde edilen sonuçların doğrulama yüzdeleri.....	85
Tablo 36.	Mikro hava içeriği açısından önerilen yöntem ile elde edilen sonuçların doğrulama yüzdeleri	85
Tablo 37.	Toplam hava içeriği açısından ölçüm doğrusu yöntemine göre elde edilen sonuçların doğrulama yüzdeleri.....	86
Tablo 38.	Toplam hava içeriği açısından ölçüm doğrusu yöntemine göre elde edilen sonuçların doğrulama yüzdeleri.....	86
Tablo 39.	Ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yöntemine göre elde edilen sonuçların mikro hava içeriği ve toplam hava içeriği açısından doğrulama yüzdelerinin ortalamaları, standart sapmaları ve doğrulama yüzdesi %95'i geçen modellerin sayısı	87
Tablo 40.	Numune 1 için ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yöntemine göre elde edilen birikimli boşluk oranları	90
Tablo 41.	Numune 2 için ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yöntemine göre elde edilen birikimli boşluk oranları	92
Tablo 42.	Numune 3 için ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yöntemine göre elde edilen birikimli boşluk oranları	94
Tablo 43.	Numune 4 için ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yöntemine göre elde edilen birikimli boşluk oranları	96

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Toplam hava içeriği
T_a	: Boşluklu kısımlardaki kiriş uzunluğu
T_t	: Toplam kiriş uzunluğu
a	: Özgül yüzey
\bar{L}	: Boşluk faktörü
P	: Beton içerisindeki çimento hamurunun yüzdesi
T_p	: Toplam hamur içeriği
$f(x, y)$: Sayısal görüntünün (x, y) konumundaki gözek değerleri
f_i	: Olasılık değerleri
C_0	: Sıklık göstergesi üzerindeki birinci sınıf
C_1	: Sıklık göstergesi üzerindeki ikinci sınıf
w_0	: Birinci sınıfa ait toplam olasılık
w_1	: İkinci sınıfa ait toplam olasılık
μ_0	: Birinci sınıf ortalaması
μ_1	: İkinci sınıf ortalaması
μ_T	: Bütün gözleklerin ortalama değeri
σ_B^2	: Sınıflar arası varyans
σ_T^2	: Toplam varyans
k	: Optimal eşik değeri
$E \oplus F$: E 'nin F ile genişleme işlemi
$E \ominus F$: E 'nin F ile aşınma işlemi
$E \circ F$: E 'nin F ile açma işlemi
$E \cdot F$: E 'nin F ile kapama işlemi
BBE	: Bağlantılı bileşen etiketleme
dpi	: İnç başına düşen nokta sayısı
h_{ij}	: Etiket matrisi
L_{ij}	: Her parçadaki toplam nesne (hava boşluğu) sayısı
T_{ijk}	: Etiketlenen nesnelere (hava boşlukları)
A_{ijk}	: Gözekselleştirilmiş alan

r_{ijk}	: Nesnelerin yarıçapları
p	: p değeri
μ	: Normal dağılımın beklenen değeri
σ	: Normal dağılımın standart sapması
m	: Yarıçapların ortalaması
v	: Yarıçapların varyansı
P_{ij}	: Her bir numune parçası
N_a	: Agregalara ait beyaz gözeklerin sayısı
N_b	: $2mm$ 'den küçük boşlukların gözek cinsinden sayısı
ρ	: Hava boşluğunun çimento hamuruna oranı
$N(\mu, \sigma)$: μ ve σ parametrelili normal dağılım
v_0	: Modelin gözeysel hacmi
$U(0,1)$: $[0,1]$ aralığında düzgün dağılım
V_a	: Toplam boşluk hacmi
V_t	: Numunenin toplam hacmi
A_c	: Nesnelerin toplam alanı
A_s	: Kesitin toplam alanı
r_s	: Sürekli dairenin yarıçapı
r_a	: Ayrık dairenin yarıçapı
Q	: Birikimli boşluk oranı
\bar{Q}	: Ortalama birikimli boşluk oranı
$LogNormalCDF(x, \mu, \sigma)$: μ ve σ parametrelili birikimli log-normal dağılım
Doğrultulu Oran	: Ölçüm doğrusu yöntemine göre elde edilen oran
Hacimsel Oran	: Yapay modelin hacimsel dağılımından elde edilen oran
Alansal Oran	: Önerilen yöntemine göre elde edilen oran
Ap_k	: Doğrulama yüzdesi
$\hat{\Delta}_k$: Göreceli hata
Δ_k	: Mutlak hata

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak elektronik veri işleme konusunda son yıllarda önemli gelişmeler olmaktadır. Bilgisayarların boyutlarının küçülmesi, veri işleme hızlarının ve bellek kapasitelerinin artması görüntü işleme teknolojilerinin gelişmesini sağlamıştır.

Görüntü işleme görüntü algılama, gruplama ve analiz etme konusunda en karmaşık sistem olan insan görme sisteminin yaptığı işlemlerin bilgisayar ortamında yapılması çalışmalarını kapsamaktadır. Bu nedenle, insan görme sisteminin temel mekanizmalarının bilinmesi görüntü işleminin daha iyi bir şekilde anlaşılabilmesini sağlar. Göz bir fotoğraf makinesi gibi düşünüldüğünde, beynin görme bölümleri de karmaşık bir sayısal görüntü işleme sistemi olarak düşünülebilir (Jähne, 2004). İnsanlar ve hayvanlar gözleri ile analog temele dayanan görüntü işleme yapmaktadır. Dolayısıyla yaşam var olduğu sürece görüntü işleme de var olacaktır.

Görüntü işleme teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, insanların yaptığı birçok iş bilgisayar ortamında yapılabilmektedir. Bu durum hem insan kaynaklı hataların en aza indirilmesini hem de zaman açısından önemli derecede tasarruf edilmesini sağlamaktadır.

Görüntü işleme yöntemleri görüntünün elde edilmesi, sayısallaştırılması, bölütlenmesi, iyileştirilmesi, sınıflandırılması, kaydedilmesi ve yeniden çağırılması gibi birçok işlemi kapsamaktadır. Görüntü işleme tıp ve biyolojide biyomedikal görüntülerin, uzay ve havacılık alanında radar ve uydu görüntülerinin, fizik ve mühendislikte elektron mikroskopu ve spektrometre görüntülerinin işlenmesi ve değerlendirilmesinde, savunma sanayisi ve güvenlik sektöründe parmak izi, göz tarama, gece görüşü, endüstrinin birçok alanında süreç ve ürün denetimi, sınıflandırma ve kontrolde kullanılmaktadır. Bu uygulama alanlarına ek olarak, jeoloji, arkeoloji, astronomi ve inşaat gibi birçok alan sayılabilir. Özellikle son yıllarda inşaat sektöründeki gelişmeler, görüntü işleme tekniklerinin inşaat teknolojisinde özellikle beton teknolojisinde kullanımını yaygınlaştırmıştır. Yapılan çalışmalarda, mikroskobik olarak analiz edilen sertleşmiş beton içerisindeki hava boşluklarının boyut dağılımının ve hacimsel oranının otomatik olarak belirlenmesi ele alınmıştır (Peterson, 2001).

Sertleşmiş betonda hava boşluk analizi ASTM C-457 ve EN 480-11 standartlarında belirtilen yöntemlere göre yapılmaktadır. ASTM C-457 standardında boşluk analizi ölçüm doğrusu ve uyarlanmış nokta-sayım yöntemi ile yapılırken, EN 480-11 standardında ise ölçüm doğrusu yöntemine göre yapılmaktadır (Elsen, 2001). Standartlarda belirtilen yöntemler, sertleşmiş betonun teknik bir uzman tarafından mikroskobik ortamda incelenmesini ele almaktadır. Mikroskobik yöntemlerde özellikle insan kaynaklı hataların olması ve ölçüm zamanının artması nedeniyle boşluk analizinin otomatik olarak yapılması fikirleri ortaya atılmıştır (Peterson, 2001). Otomatik sistem tabanlı çalışmalardaki ana fikir, beton numunelerinin yüksek çözünürlüklü bir tarayıcı yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılıp ölçüm doğrusu yönteminde manuel olarak ölçülen kiriş uzunluklarını görüntü işleme teknikleriyle otomatik olarak ölçülmesidir (Elsen, 2001; Peterson, 2001). Ayrıca 1990'ların başlarında, otomatik hava boşluk analizi yapmak için RapidAir sistem adı verilen bir makine geliştirilmiştir ve günümüzde bu makine özel şirketlerde ve üniversitelerde kullanılmaktadır. Bu sistemde hem ASTM C-457 hem de EN 480-11 standartlarına göre ölçümler yapılmaktadır (Jakobsen, et al., 2006). Ancak bu sistemin fiyatının yüksek olması tercih edilememesine neden olmaktadır.

Bu çalışmada görüntü işleme teknikleri kullanılarak boşluk analizi hem ölçüm doğrusu yöntemiyle hem de önerilen yöntemle yapılmıştır ve iki yöntemin başarımları karşılaştırılmıştır.

1.2. Beton

Beton dünyada en çok kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Uzun yıllar boyunca güncelliğini koruyan beton irili ufaklı birçok yapının oluşmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu yapılar arasında binalar, barajlar, yollar, köprüler, tüneller, parklar, havaalanları ve limanlar sayılabilir. Betonu en çok tercih edilen yapı malzemesi yapan nedenler; şekil verilebilme kolaylığı, ekonomik oluşu, fiziksel ve dış etkenlere dayanıklılığı, kullanım ve üretimdeki pratikliğidir (Şimşek, 2009).

Beton; çimento, su, agrega (kum, çakıl, kırmataş) ve gerekirse katkı maddelerinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla oluşan kompozit bir malzemedir (Erdoğan, 2003).

Beton içeriğindeki agregalar minerallerden oluşmaktadır ve agrega türlerinden kum, çakıl ve kırmataş beton yapımında en çok tercih edilen agregalardır. Agregalar, akarsu

yataklarından, alüvyon deltalarından, doğal taş ocaklarından kayaların kırılması ve elenmesi ile elde edilir (Erdoğan, 2003).

Betonun iskeletini oluşturan agregalar, beton içerisinde %60 – 80 oranında önemli bir yer tutmaktadır ve aynı zamanda betona bazı teknik özellikler sağlamaktadır. Bu özelliklerden bazıları aşağıdaki gibi verilebilir (Erdoğan, 2003):

- Betonda oluşabilecek hacim değişikliğini azaltır.
- Betonun aşınmaya karşı dayanımını artırır.
- Çevresel etkilere karşı betonun dayanıklılığını artırır.
- Betonun taşımakta olduğu yüklerle karşı dayanımı sağlar.

Çimento ise bağlayıcı özelliğe sahip bir madde olup, su ile karıştırılıp hamur haline getirildiğinde zaman içinde sertleşerek taş haline dönüşür. Betonun oluşturulmasında büyük önem taşıyan çimento hamuru, agrega yüzeylerini kaplama, agregalar arasındaki boşlukları doldurma ve agregaları bir arada tutma işlevlerini sağlar (Erdoğan, 2003).

Beton yapımında kullanılan karışım suyu, kuru halde çimento ve agregayı ıslatarak plastik hale getirir ve çimento ile kimyasal reaksiyon gerçekleştirerek plastik kütlelerin sertleşmesini sağlar. İçilebilir nitelikte olan tüm sular beton karışımında kullanılabilir. İçilebilir nitelikte olmayanlar ise deney yapıldıktan sonra karışımında kullanılabilir. Karışımında kullanılan su mümkün olduğu kadar temiz olmalı ve içerisinde kimyasal atıklar bulunmamalıdır. Karışımındaki su miktarının yetersizliği çimento hidrasyonunu tam olarak yapılmamasına ve agrega ile çimento arasındaki bağlılığın zayıf olmasına neden olur. Bunun sonucu olarak yeterli işlenebilirlik sağlanamaz. Karışıma fazladan su katılması durumunda ise çimento ile reaksiyona giremeyen fazla suyun bıraktığı boşluklar beton dayanımının düşmesine neden olur (Ünsal & Şen, 2008)

Beton ömrü boyunca fiziksel veya kimyasal iç ve dış etkilere maruz kalmaktadır. Betonun bu etkilere karşı yeterli direnci göstermesi yani yeterince dayanıklı olması çok önemlidir. İyi beton çevresel etkilere karşı, fiziksel ve kimyasal bütünlüğünü koruyabilen, dayanımı yüksek, geçirimsiz betondur. Betonun dayanım ve dayanıklılığı, kullanılan malzeme (agrega, çimento, su, kimyasal ve mineral katkıları), üretim teknolojisi, bakım(kür), uygun tasarım, yerleştirme, sıkıştırma, su/çimento oranı gibi birçok parametrenin etkisi altında şekillenmektedir (Şimşek, 2009).

1.3. Donma-Çözülme Olayı

Soğuk iklim koşullarında betonun dayanıklılığını etkileyen en önemli faktörlerden biri donma-çözülme olayıdır. Donma-çözülme etkisine maruz kalan betonda, su donup henüz plastik kıvamda olduğunda donma etkisi sonucu oluşan buz, hacmin artmasıyla birlikte boşluklara doğru hareket eder. Tekrarlanan donma-çözülme olayları buz kütesinin büyümesine neden olur (Baradan, 1996).

Donma etkisinde kalan sertleşmiş betonda ise kılcal boşluklardaki su donar ve genleşir. Genleşme sonucu beton içerisinde bir gerilme meydana gelir ve bu gerilme betonun çekme dayanımını aştığında betonda kabuk atma, ufalanma ve çatlama gibi bozukluklar görülür (Baradan, 1996).

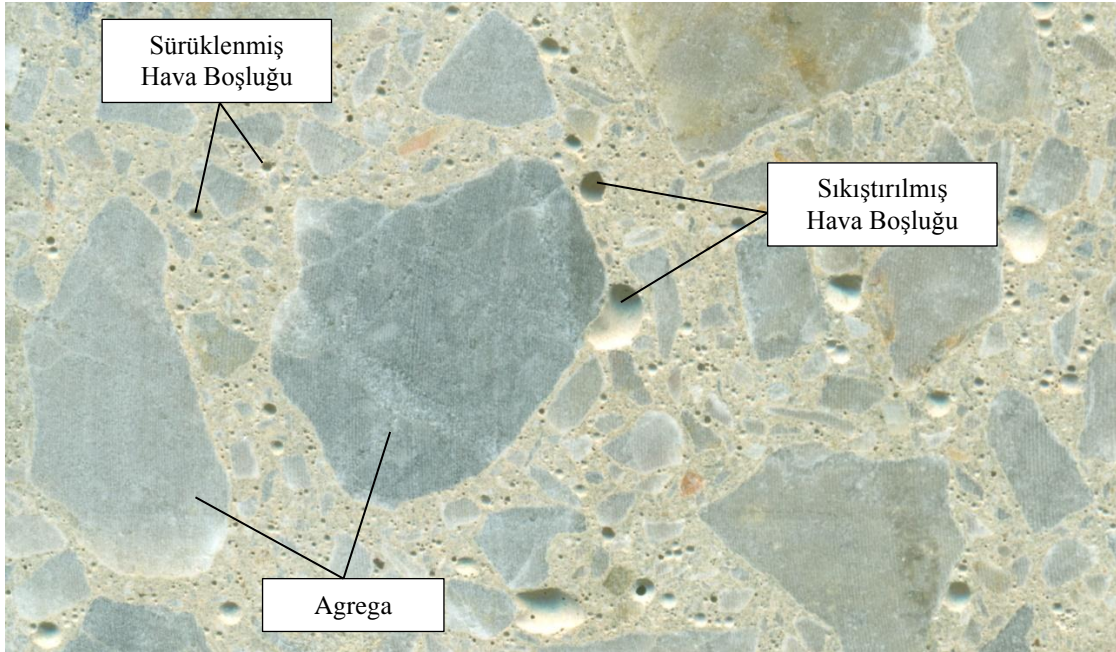
1.4. Hava Boşluğu

Taze betonun karıştırılması ve işlenmesi sırasında hava boşlukları oluşmaktadır. Bu nedenle sertleşmiş betonda her zaman bazı gözenekler mevcuttur. Kütleme ve karıştırma sürecindeki farklılıklara bağlı olarak beton boşluk yapısı değişiklik gösterebilir (Powers, 1978). Beton içerisindeki hava boşluklarının betonu koruduğu kabul edilmektedir (Peterson, 2001). Araştırmalar direnç, dayanıklılık ve geçirgenlik dahil olmak üzere betonun teknik özelliklerinin sertleşmiş betondaki hava boşluğunun yapısından yüksek derecede etkilenebileceğini göstermiştir (Verbeck, 1978). Bu nedenle, hava boşluk sisteminin yapısını anlamak son derece önemlidir.

ASTM standardına göre, hava boşlukları çimento hamuru tarafından çevrelenen boşluklar olarak tanımlanır ve çimento hamuru oluşturulmadan önce hava veya başka gazlarla doldurulur (Ng, 2010). Betondaki hava boşluklarının yapısı hava boşluğu hacmi, boşluk boyutu ve şekli, boşluk faktörü ve özgül yüzey ile temsil edilebilir. Sıcaklık, karıştırma, taşıma, sıkılaştırma ve kütleme gibi farklı nedenlerden dolayı hava boşluk sistemi değişebilir veya hava içeriği etkilenebilir. Ayrıca boşluk özellikleri değişebilir ve bu nedenle betonun direnci ve dayanıklılığı azalabilir (Powers, 1968).

Hava boşlukları şekil ve boyutları göz önüne alınarak, kılcal boşluklar, sürüklenmiş hava boşluğu ve sıkıştırılmış hava boşluğu olmak üzere üç kategoriye ayrılabilir:

1. Başlangıçta su karıştırılarak doldurulmuş düzensiz şekilli olan kılcal boşluklar en küçük çaplı boşluklardır. Çapları $5\mu m$ daha küçüktür ve çimento hamurunun hidrasyonunun ardından hava boşluğu olarak kalır. Küçük boyutları nedeniyle bu boşlukları gözlemlemek kolay değildir. Bu nedenle kılcal boşluklar, hava boşluk sisteminin bir parçası olarak kabul edilemez (Mehta & Monteiro, 2005).
2. Kılcal boşluklardan daha büyük olan sürüklenmiş hava boşlukları $1mm$ 'den küçük çapa sahiptir ve şekil olarak küresel bir yapıdadır. Bu hava boşlukları, hava baloncuklarını stabilize etmek için kullanılan hava sürükleyici katkı maddelerinin eklenmesi sonucu oluşurlar (Mehta & Monteiro, 2005).
3. En büyük çaplı sıkıştırılmış hava boşlukları ise $1mm$ den daha büyük çapa sahiptir. Yan ürünlerin karıştırılması ve yerleştirilmesi sürecinde meydana gelen bu boşluklar şekil olarak düzensiz veya küresel olabilir (Mehta & Monteiro, 2005).



Şekil 1. Sürüklenmiş hava boşluğu, sıkıştırılmış hava boşluğu ve agrega

Sürüklenmiş hava boşluğu ve sıkıştırılmış hava boşluğu arasındaki şekil ve boyut farkı Şekil 1'den ayırt edilebilir. Sürüklenmiş hava boşlukları düzenli dağıldığından betonun daha iyi donma-çözülme direnci sağlamasında önemli bir rol oynar. Sıkıştırılmış hava boşlukları ise daha büyük olduğundan ve düzenli dağılmadığından, sürüklenmiş hava boşluklarına göre daha az donma-çözülme direnci sağlamaktadır (Song, 2014).

Hava boşlukları, agregalar arasındaki sürtünmeyi azaltmak için hava yastığı işlevi görür ve taze beton karışımının daha kolay yerleşmesini sağlar. İşlenebilirliğin artmasıyla, ayrışma ve sızmanın azalması ile sonuçlanan su içeriği muhtemelen azalabilir (Stiltner, 2001). Ayrışma genellikle kaba agreganın artması, su içeriğinin çok düşük ya da çok yüksek olması ve çimento içeriğinin azalması ile ortaya çıkmaktadır. Sızma ise katı taneciklerin çökmesinden dolayı suyun yüzeye taşınmasıdır. Hem ayrışma hem de sızma betonun gerekli direnci kazanamamasına neden olabileceğinden betonun dayanımı için zararlı olabilir (Tattersall, 2003).

Beton karışımının işlenebilirliğinin artırmasının yanı sıra, sürüklenmiş hava boşlukları betonun donma-çözülme direncinin ve dayanıklılığının artmasında da çok önemli bir rol oynamaktadır. Sertleşmiş beton her zaman boşluklu olduğundan, çevredeki nem kolayca betona nüfuz edebilir ve betonun içerisindeki boşluklara yerleşebilir. Ayrıca donma-çözülme döngüsünde çözülme süresi boyunca, daha fazla nem betona nüfuz etmektedir (Baradan, 1996). Donma-çözülme döngüsünde, su donup buz olduğunda hacmi artar ve hacmin artması betonun düşük çekme kapasitesini aşan beton yapısı içindeki çekme gerilmeleriyle sonuçlanır. Çekme gerilmelerine önlem alınmazsa betonda çatlamlar meydana gelebilir (Mehta & Monteiro, 2005). Bu sorunu azaltmak, betonun ömrünü arttırmak ve hava boşluklarını dengelemek için hava sürükleyici katkı maddeleri çok önemlidir. %91.7'nin altında su ile doyurulmuş betonda, sürüklenmiş hava boşluklarında, su donup buz halini aldıkça, boşluklarda genişlemek için yeterli alanı sahip olabilir (Powers, 1954). Daha önce yapılan çalışmalara göre, su-çimento oranı aynı olan betonda, sürüklenmiş hava olmayan beton, donma-çözülme döngüsünde sürüklenmiş hava olan betonun yaklaşık beşte biri kadar dayanıklılık gösterir (Kosmatka, Kerkhoff, & Panarese, 2002).

Betonun işlenebilirlik ve homojenlik derecesini korunması için, beton içerisindeki toplam hava boşluğunun kontrol edilmesi çok önemlidir (Verbeck, 1978). Bununla birlikte, karıştırma işlemi sırasında küçük çaplı hava boşlukları bir araya gelerek daha büyük boyutta boşlukların oluşmasını sağlar (Powers, 1978). Beton karışımında hava boşluklarının verimli işlev görmesi için, hava sürükleyici katkı maddeleri kullanılır. Hava sürükleyici katkı maddeleri beton içerisinde hava boşluğu dengesini sağlar (Kosmatka, Kerkhoff, & Panarese, 2002). Boyutu büyük olan sıkıştırılmış hava boşlukları kaldırma kuvvetlerinden dolayı karışımdan kaybolabilir ve bu nedenle sürüklenmiş hava boşlukları betonun performansının kontrolünü üstlenir. Betonda sürüklenmiş hava boşluklarının

dengelenmesiyle, istenilen hava içeriği korunabilir. Küçük boyutlu sürüklenmiş hava boşlukları sayesinde, istenilen boşluk faktörü ve özgül yüzey korunabilir (Verbeck, 1978).

1.5. Sertleşmiş Betonda Hava Boşluk Analizi

Sertleşmiş betonda hava boşluk analizi, ASTM C-457 ve EN 480-11 standartlarında belirtilen mikroskop tabanlı ölçüm yöntemlerine göre yapılmaktadır. ASTM C-457 standardında uyarlanmış nokta sayım ve ölçüm doğrusu yöntemi olmak üzere iki yöntemle boşluk analizi yapılmaktadır. EN 480-11 standardında ise ölçüm doğrusu yöntemine göre analiz yapılmaktadır (Elsen, 2001). Ölçüm doğrusu yönteminde, beton numune cilalanarak yüzeyi temizlenir. Ardından cilalanan numune yüzeyinin üst, orta ve alt kısmına 6 mm aralıklarla geçirilen toplam 12 tane ölçüm doğruları boyunca incelenir. Teknik bir uzman tarafından ölçüm doğruları üzerindeki hava boşluklarına karşılık gelen kiriş uzunlukları ölçülür ve kaydedilir. Bu ölçümler yardımıyla, betonun içyapısı ile ilişkili fiziksel parametrelerin çoğu hesaplanabilir (Scott, 1997). Ayrıca, sertleşmiş betonda hava boşlukları tam olarak küresel olmamasına rağmen yapılan işlemlerde hava boşluklarının küresel olduğu kabul edilmektedir (Song, 2014).

1.5.1. Hava Boşluk Yapısı Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu standartlara göre hava boşluğu yapısı genel olarak, toplam hava içeriği, mikro hava içeriği, aralık faktörü, hava boşluğu sistemi özgül yüzeyi ve hava boşluğu boyut parametreleri ile tanımlanır (Elsen, 2001).

1.5.1.1. Toplam Hava İçeriği

Toplam hava içeriği (A) boşluklu kısımlardaki kiriş uzunluğunun (T_a) toplam kiriş uzunluğuna (T_t) oranı olarak ifade edilir (Scott, 1997; Elsen, 2001).

$$A = \frac{T_a \cdot 100}{T_t} \quad (1)$$

1.5.1.2. Mikro Hava İçeriği

Mikro hava içeriği, $0.3mm$ çapına eşit veya daha küçük hava boşlukları olarak tanımlanmaktadır (Elsen, 2001).

1.5.1.3. Özgül Yüzey

Hava boşluklarının toplam yüzeyinin toplam hava boşluğu hacmine bölünmesiyle hesaplanır ve birimi mm^{-1} dir (Elsen, 2001). Toplam ölçüm doğrusu uzunluğu N olduğunda özgül yüzey aşağıdaki gibi hesaplanır,

$$\alpha = \frac{4 \cdot N}{T_a} \quad (2)$$

1.5.1.4. Boşluk Faktörü

Powers tarafından tanımlanan boşluk faktörü (\bar{L}), çimento hamuru içindeki herhangi bir noktanın hava boşluğu çevresi arasındaki maksimum mesafe olarak tanımlanır ve birimi mm^{-1} dir (Elsen, 2001).

Eğer $P/A \leq 4.342$ ise boşluk faktörü,

$$\bar{L} = \frac{P}{A \cdot a} \quad (3)$$

olarak hesaplanır. Eğer $P/A > 4.342$ ise boşluk faktörü,

$$\bar{L} = \frac{3}{a} \left[1.4 \left(\frac{P}{A} + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad (4)$$

olarak hesaplanır (Elsen, 2001). T_p toplam hamur içeriği ve T_t toplam kiriş uzunluğu olmak üzere yukarıdaki denklemlerde belirtilen P (beton içerisindeki çimento hamurunun yüzdesi),

$$P = \frac{T_P \cdot 100}{T_t} \quad (5)$$

ile bulunur (Scott, 1997).

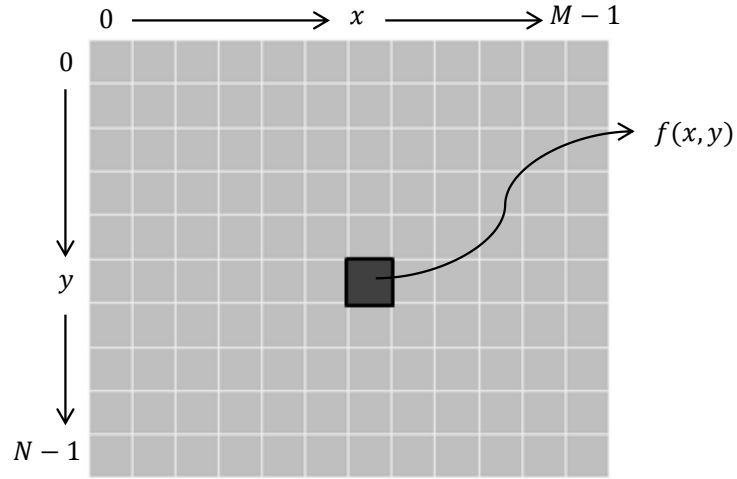
1.6. Görüntü İşleme

Görüntü işleme, gerçek yaşamdan elde edilen görüntülerin sayısal görüntü haline dönüştürülüp işlenerek bu görüntüye ait özelliklerin elde edilmesi ve bu özelliklerin veya görüntünün görünüşünün değiştirilmesiyle yeni bir görüntü oluşturma işlemidir. Kaydedilmiş mevcut görüntüleri işlemek için kullanılan görüntü işleme, son yılların en önemli araştırma alanlarından biridir. Savunma, güvenlik, sağlık, biyoloji, jeoloji, inşaat, arkeoloji, astronomi ve endüstri gibi birçok alanda çözümler sunmaktadır (Gonzalez & Woods, 2002).

1.7. Sayısal Görüntü

Bir görüntünün işlenebilmesi için öncelikle sayısallaştırılması yani bilgisayar ortamına aktarılması gerekir. Görüntüler sayısal ortamlarda en az iki boyutlu veri matrisleri şeklinde temsil edilir (Gonzalez & Woods, 2002). Görüntü üzerindeki bir noktanın hangi görüntü elemanına karşılık geldiğini bilmek için noktaların koordinat sistemine oturtulması gerekir (Burger & Burge, 2009).

N satır ve M sütundan oluşan iki boyutlu olarak temsil edilen bir görüntü $f(x, y)$ fonksiyonu olarak tanımlasın. Herhangi bir (x, y) noktası f fonksiyonunun o noktadaki görüntü değerleri ile ilgili bilgi verir. Burada x ve y konum koordinatlarını, f ise görüntünün o noktadaki yoğunluğunu gösteren genlik değeridir. Bu (x, y) ve f fonksiyonunun değerleri sonlu birer tamsayı ise bu görüntü sayısal görüntü olarak adlandırılır. Sonlu sayıda elemandan oluşan her sayısal görüntüde satır ve sütunların kesiştiği bölgelere gözek (piksel) adı verilir. N satır ve M sütundan oluşan bir sayısal görüntüde $N \times M$ tane gözek vardır (Gonzalez & Woods, 2002). Şekil 2’de sayısal bir görüntünün koordinat sisteminde gösterimi, Şekil 3’te ise sayısal bir görüntü ve bu görüntüye ait bazı gözek değerleri verilmiştir.

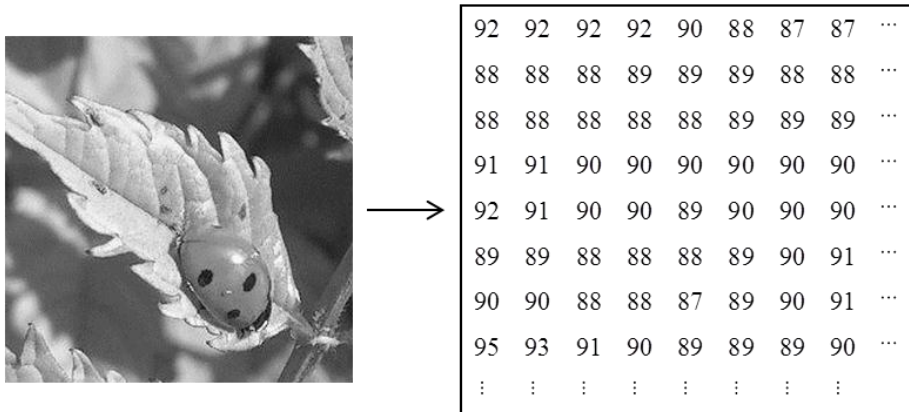


Şekil 2. Sayısal görüntü koordinatları

Matematikteki koordinat sistemi gösteriminin aksine, görüntü işlemede koordinat sistemi, koordinat düzleminin yatay eksen etrafında döndürülmesiyle orjinin sol üst köşede konumlanan ve y ekseninin yukarıdan aşağıya doğru arttığı bir sistemdir (Burger & Burge, 2009). Bu nedenle, sayısal görüntülerde en büyük satır numarası $N - 1$, en büyük sütun numarası ise $M - 1$ olur.

$N \times M$ gözekten oluşan bir sayısal görüntünün matris gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0, M-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1, M-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & \dots & f(N-1, M-1) \end{bmatrix}$$



Şekil 3. Sayısal görüntü ve gözük değerleri

1.7.1. Sayısal Görüntü Çeşitleri

Bir görüntü ile ilgili bilgi o görüntünün temsil ettiği veri türüne bağlıdır. Gözet değerleri uygulamada her zaman k uzunluğunda ikil kelimelerden oluşmaktadır. Bu yüzden, bir gözet 2^k farklı değerden herhangi biri ile temsil edilebilir. Burada k değeri görüntünün bit derinliği ya da sadece derinliği olarak adlandırılır. Belirli bir gözetin bit seviyesi düzeni o görüntünün türüne bağlıdır (Burger & Burge, 2009). Görüntü türleri ise ikil, gri seviyeli ve renkli görüntü olmak üzere temelde üçe ayrılır.

1.7.1.1. İkili (Binary) Görüntüler

Sadece iki farklı renk içeren görüntülere ikili görüntüler (Şekil 4(b)) denir. Genellikle her gözet siyah veya beyazı temsilen sırasıyla 0 ve 1 değerleriyle kodlanmaktadır. İkili görüntüler aynı özelliklere sahip bölgeleri temsil eden gözet ve gözet gruplarını temsil etmek için kullanılmaktadır (Russ, 2007). İkili görüntüler nesne ve arka plan olmak üzere iki unsurdan oluşmaktadır. Arka plan 0 yani siyah olarak ifade edilirken, nesnelere 1 yani beyaz olarak ifade edilir.



(a)

(b)

Şekil 4. Bit derinlikli görüntüler, (a)Renkli görüntü; (b) İkili görüntü

Gri seviyeli ya da renkli görüntülere eşikleme veya bölütleme gibi görüntü işleme teknikleri uygulanarak ikili görüntüler elde edilebilir.

İkil görüntüler genellikle, tarayıcı yardımıyla elde edilen grafik çizimleri, arşivlenmiş dökümanlar, el yazısı görüntüleri ve barkod görüntüleri kodlanmış faks gönderileri gibi örneklerde kullanılır (Burger & Burge, 2009).

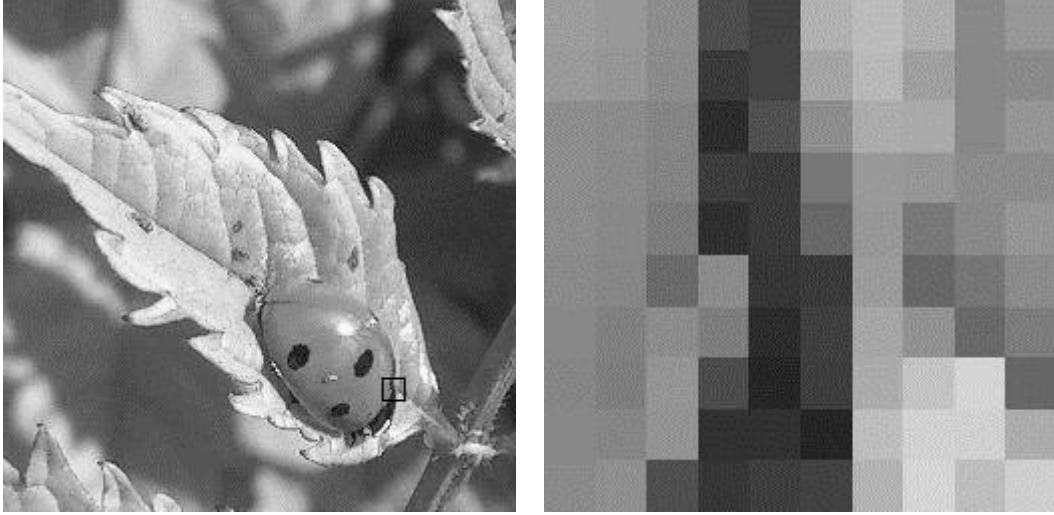
1.7.1.2. Gri seviyeli görüntüler

Gri seviyeli bir görüntüde görüntü verileri, görüntünün yoğunluğunu veya parlaklığını temsil eden tek bir kanaldan oluşur. k bitlik görüntüler için mümkün yoğunluk değerlerinin aralığı $[0, \dots, 2^k - 1)$ arasındadır. Örneğin, 8 bitlik gri seviyeli bir görüntünün yoğunluk değerleri $[0 - 255]$ arasında değişmektedir. Burada, minimum parlaklık 0 (siyah), maksimum parlaklık ise 255 (beyaz) değerini alır (Burger & Burge, 2009). Genellikle, gri seviyeli görüntüler her gözek için 8 bitlik bilgi içermektedir. Bu nedenle, bu görüntüler 256 farklı gri renk seviyesine sahiptir. Şekil 5'te gri seviyeli bir görüntü verilmiştir.



Şekil 5. Gri seviyeli görüntü

Şekil 6'da gri seviyeli bir görüntünün seçili bölgesi ve bu bölgeye ait gözek değerleri verilmektedir.



158	153	142	78	67	178	189	175	137	152
155	150	140	59	68	165	185	160	136	139
142	140	133	45	81	142	173	171	136	150
142	139	132	62	58	119	154	150	141	141
141	137	125	48	58	105	152	121	138	150
139	135	107	140	55	59	156	104	118	140
136	129	141	126	45	64	166	146	106	125
134	127	149	76	39	62	172	196	213	103
136	134	148	50	50	38	190	210	209	173
139	144	80	55	63	67	179	214	190	207

Şekil 6. Gri seviyeli görüntü ve gözetik değerleri

1.7.1.3. Gerçek Renk Görüntüleri (Renkli Görüntü)

Renkli görüntüler, kırmızı, yeşil ve mavi ana renklerinin bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu üç ana rengin oluşturduğu renk uzayı RGB olarak adlandırılır ve bu görüntüleri ifade etmek için en az üç tane iki boyutlu matris kullanılır. RGB uzayında her renk bileşeni için gözetik derinliği 8 bittir. Bu nedenle RGB renkli görüntülerde gözetik derinliği 24 (3×8) bit olmaktadır (Burger & Burge, 2009). Dolayısıyla, 24 bitlik RGB görüntülerinde toplam $(2^8)^3 = 16,777,216$ renk sayısı vardır (Gonzalez & Woods, 2002).

1.7.1.4. Özel Görüntüler

Gri seviyeli, ikil ve renkli görüntülerin yanı sıra bazı özel görüntüler de vardır. Tablo 1 ve Tablo 2’de verilen standart biçimlerin görüntü değerleri temsil etmek için yeterli olmadığı zamanlarda özel görüntülerin kullanılması gerekir. Özel görüntülerin negatif değerli görüntüler ve ondalıklı değerli görüntüler olmak üzere iki yaygın örneği vardır. Negatif değerli görüntüler, kenar algılama filtresi gibi görüntü işleme tekniklerinin kullanımında ortaya çıkmakta, ondalıklı değerli görüntüler ise tıbbi, biyolojik, veya astronomik uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu özel biçimlere genellikle uzmanlık uygulamalarında ihtiyaç duyulduğundan, bu görüntülerin standart görüntü işleme araçlarıyla kullanımı zor olabilir (Burger & Burge, 2009). Özel görüntülere ait bit derinlikleri ve kullanım alanları Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 1. Gri seviyeli görüntülere ait bit derinlikleri ve kullanım alanları

Gri Seviyeli Görüntüler (Yoğunluk Görüntüleri)			
Kanal	Bit/Gözetek	Değer Aralığı	Kullanım Alanı
1	1	0 ... 1	İkil Görüntü: Belge, grafik resimleme, faks
1	8	0 ... 255	Genel: Fotoğraf, tarama, yazdırma
1	12	0 ... 4095	Yüksek Kalite: Fotoğraf, tarama, yazdırma
1	14	0 ... 16383	Profesyonel: Fotoğraf, tarama, yazdırma
1	16	0 ... 65535	En Yüksek Kalite: Tıp, astronomi

Tablo 2. Renkli görüntülere ait bit derinlikleri ve kullanım alanları

Renkli Görüntüler			
Kanal	Bit/Gözetek	Değer Aralığı	Kullanım Alanı
3	24	[0 ... 255] ³	Genel: Fotoğraf, tarama, yazdırma
3	36	[0 ... 4095] ³	Yüksek Kalite: Fotoğraf, tarama, yazdırma
3	42	[0 ... 16383] ³	Profesyonel: Fotoğraf, tarama, yazdırma
4	32	[0 ... 255] ³	CMYK, dijital baskı öncesi

Tablo 3. Özel görüntülere ait bit derinlikleri ve kullanım alanları

Özel Görüntüler			
Kanal	Bit/Gözetek	Değer Aralığı	Kullanım Alanı
1	16	-32768 ... 32767	Pozitif/negatif tam sayı değerleri
1	32	$\pm 3.4 \cdot 10^{38}$	Ondalıklı değerler: Tıp, Astronomi
1	64	$\pm 1.8 \cdot 10^{308}$	Ondalıklı değerler: Profesyonel ses verileri analizi

1.7.2. Görüntü Histogramı

İstatistikte histogram, bir veri setindeki değerlerin hangi sıklıkta tekrar ettiğini gösteren grafikdir. Dolayısıyla bir sayısal görüntünün histogramı, görüntüdeki gözeteklerin parlaklık değerlerinin sıklıklarını gösterir.

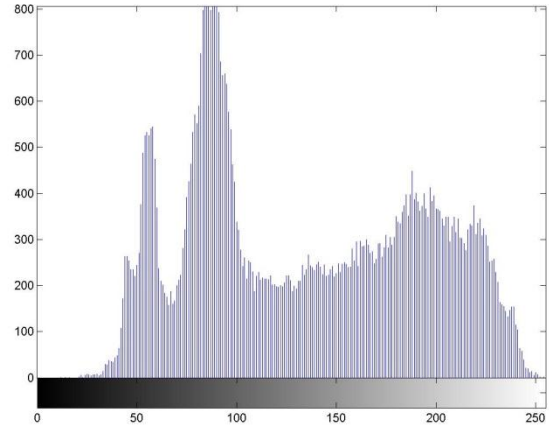
Histogramlar yardımıyla, görüntü içerisindeki nesnelere arka plandan ayırt edilebilir veya hangi parlaklık değerine sahip gözeteklerin görüntüde daha yoğun olduğu hakkında bilgi sahibi olunabilir (Sonka, Hlavac, & Boyle, 2007).

8 bitlik bir görüntüde gözeteklerin parlaklık seviyesi 0 (siyah) ile 255 (beyaz) arasında değişmektedir. Örneğin, bir görüntünün histogramında renk değerleri 0 değerine yakın bir bölgede yoğunlaşıyorsa o görüntüde siyah rengin yoğun olduğu, eğer renk değerleri 255 değerine yakın bir bölgede yoğunlaşıyorsa o görüntüde beyaz rengin yoğun olduğu çıkarımı yapılabilir (Nixon & Aguado, 2008).

Şekil 7(b)'de gri seviyeli bir görüntünün histogramı verilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 7. Görüntü histogramı, (a) Gri seviyeli görüntü; (b) Gri seviyeli görüntü histogramı

Histogramlar birkaç görüntüye karşılık gelebilir. Örneğin, sabit bir arka planda bir nesnenin konumu değiştiğinde bu durum histogramı etkilemez (Sonka, Hlavac, & Boyle, 2007).

1.7.3. Eşikleme

Görüntü işlemede en temel tekniklerden biri olan eşikleme, bir görüntüdeki farklı yoğunluktaki veya renkteki ön ve arka plan bölgelerini ayırmada kullanılan en temel yöntemdir. Eşikleme yardımıyla gri seviye bir görüntüden siyah ve beyaz renklerden oluşan ikili görüntü elde edilebilir. Eşikleme işleminde verilen eşik değerinden daha büyük değere sahip gözetler nesne, eşik değerine eşit veya daha küçük değere sahip gözetler arka plan olarak sınıflandırılır. Nesne olarak sınıflandırılan gözetlere 1, arka plan olarak sınıflandırılan gözetlere 0 değeri atanarak ikili bir görüntü elde edilir. Şekil 8(b)'de eşikleme işlemi uygulanmış bir görüntü verilmektedir.

Eşikleme işleminin en önemli aşaması eşik değerinin belirlenmesidir. Genellikle görüntünün yoğunluk histogramı incelenerek belirlenen eşik değeri elle veya otomatik olarak da seçilebilir. Görüntünün histogramı yardımıyla eşik değeri bulunurken histogramdaki tepe ve çukurlar belirlenip, gözetlerin en çok dağılım gösterdiği gözet sınır değerleri eşik değeri olarak seçilebilir.

Görüntü eşikleme konusunda ilk çalışmalardan biri Otsu tarafından yapılmıştır. Otsu yöntemi orijinal görüntüden elde edilen en uygun eşik değeri yardımıyla gri seviyeli görüntüleri ikil görüntüye çevirmek için kullanılır. Bu yöntemde görüntünün histogramı çıkartılıp, histogtam üzerinden varyans hesaplanarak eşik değeri belirlenir (Otsu, 1979).

Gri seviyeli bir görüntünün i . seviyeli gözeklerinin sayısı n_i , toplam gözek sayısı N ve gri seviyeler $[1, 2, \dots, L]$ şeklinde gösterilsin. Öncelikle gri seviyeli histogram normalize edilerek yani sınıflandırılarak her sınıfa ait olasılık değerleri bulunur. Her sınıfa ait olasılık değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır (Otsu, 1979).

$$f_i = \frac{n_i}{N}, \quad f_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^L f_i = 1 \quad (6)$$

Gözekler k eşik değeri ile C_0 ve C_1 gibi iki sınıfa ayrıldığında C_0 $[1, \dots, k]$ seviyelerindeki gözekleri, C_1 $[k + 1, \dots, L]$ seviyelerindeki gözekleri temsil eder. Daha sonra, bu sınıfların toplam olasılıkları ve sınıf ortalamaları hesaplanır. Bu değerler sırasıyla aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir (Otsu, 1979).

$$w_0 = \sum_{i=1}^k f_i \quad (7)$$

$$w_1 = \sum_{i=k+1}^L f_i \quad (8)$$

ve

$$\mu_0 = \frac{1}{w_0} \sum_{i=1}^k i f_i \quad (9)$$

$$\mu_1 = \frac{1}{w_1} \sum_{i=k+1}^L i f_i \quad (10)$$

Bütün gözeklerin ortalama değeri ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\mu_T = \sum_{i=1}^L if_i \quad (11)$$

Otsu algoritmasında, eşik değerinin doğruluğu aşağıdaki eşitlik ile ölçülür ve bu değeri maksimum yapan k değeri optimal eşik değeri olarak kabul edilir (Otsu, 1979).

$$\eta = \left(\frac{\sigma_B^2}{\sigma_T^2} \right) \quad (12)$$

Burada σ_B^2 sınıflar arası varyans, σ_T^2 ise toplam varyans olmak üzere aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\sigma_B^2 = w_0 w_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 \quad (13)$$

$$\sigma_T^2 = \sum_{i=1}^L (i - \mu_T)^2 f_i \quad (14)$$



(a)



(b)

Şekil 8. Görüntü eşikleme, (a) Gri seviyeli görüntü; (b) Eşikleme işlemi sonucu oluşan ikil görüntü

1.7.4. Morfolojik İşlemler

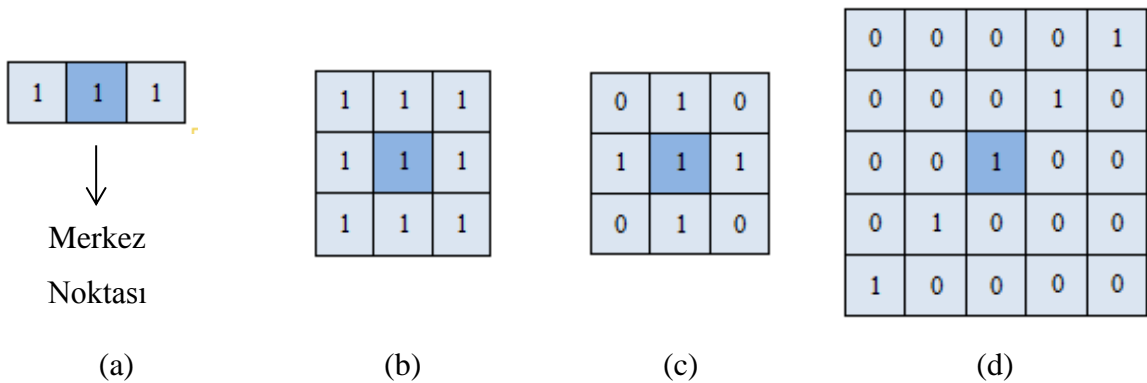
Morfolojik işlemler, görüntü işleme uygulamalarında sık kullanılan ve temel küme işlemlerine dayanan yöntemleri içermektedir. Genellikle ikil görüntüler üzerinde uygulanan bu işlemler görüntülerin analizinde ve özellikle bölütleme gibi uygulamalarda kullanılır (Gonzalez, Woods, & Eddins, 2004).

Morfolojik işlemler genel olarak,

- Görüntülerdeki gürültüleri gidermek amacıyla,
- Görüntü içerisindeki nesnelere iyileştirmek için,
- Nesnelere arka plandan bölütlemek için,
- Nesnelere sayısal tanımlaması için

kullanılır (Sonka, Hlavac, & Boyle, 2007).

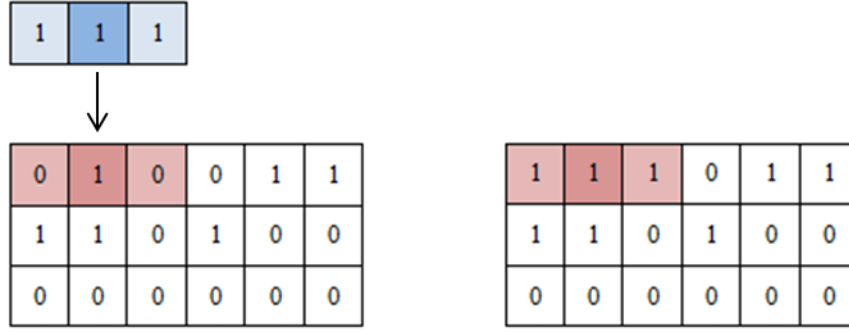
Morfolojik görüntü işlemede temel olarak genişleme ve aşınma olmak üzere kullanılan iki işlem vardır. Bu işlemler kullanılarak farklı morfolojik işlemler de yapılmaktadır. Morfolojik işlemler, yapısal bir eleman ile kontrol edilmektedir. Yapısal eleman herhangi bir şekil ve büyüklükte olan 0 ve 1'lerden oluşan bir matris olarak tanımlanabildiği gibi sadece 1'lerden oluşan bir matrisle de tanımlanabilir (Şekil 9). Ayrıca yapısal elemanın merkez noktasının net bir şekilde tanımlanması gerekir (Gonzalez, Woods, & Eddins, 2004).



Şekil 9. Farklı yapısal eleman örnekleri, (a) 1×3 boyutunda çizgi şekilli yapısal eleman; (b) 3×3 boyutunda kare şekilli yapısal eleman; (c) Haç şekilli yapısal eleman; (d) Periyodik hat şekilli yapısal eleman

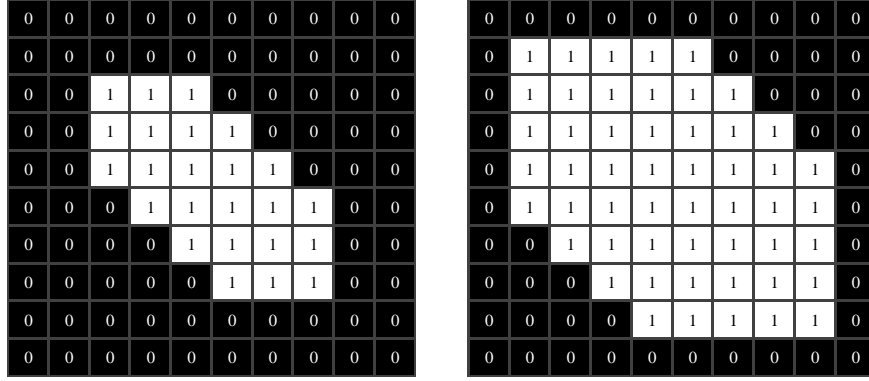
1.7.4.1. Genişleme (Dilation)

Genişleme, ikil bir görüntüdeki nesnelere kalınlıktırmaya ya da genişletmeye yarayan morfolojik bir işlemdir. Sayısal bir görüntüye genişleme işlemi uygulandığında görüntü yapısal elemanla kesiştiği bölümler kadar büyütülür. Bunun için sayısal görüntünün her bir gözeği yapısal elemanın merkez noktasına oturtulur ve görüntü üzerinde gözek gözek dolaştırılır. Eğer yapısal elemanın merkez noktası görüntü üzerinde 1 değerli bir gözek ile karşılaşılırsa yapısal elemanın altında kalan gözek değerleri 1 yapılır (Şekil 10). Böylece görüntü üzerindeki nesnelere büyür ve nesne içindeki boşluk varsa kapanır (Gonzalez, Woods, & Eddins, 2004).



Şekil 10. Genişleme işleminde yapısal elemanın kullanımı

Şekil 11'de ikil bir görüntünün gerçek hali ve Şekil 9(b)'de verilen yapısal eleman kullanılarak yapılan genişleme işlemi sonucunda elde edilen görüntü verilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 11. Genişleme işlemi (a) Sayısal görüntü; (b) Genişleme işlemi uygulanmış görüntü

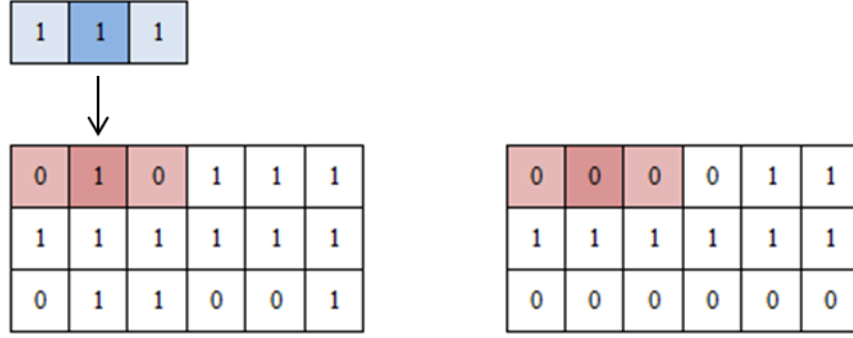
$E \oplus F$ şeklinde gösterilen E 'nin F ile genişleme işlemi matematiksel olarak,

$$E \oplus F = \{z | (\hat{F})_z \cap E \neq \emptyset\} \quad (15)$$

şeklinde tanımlanır. Burada E ve F sırasıyla, işlenecek görüntü matrisini ve uygun biçimde belirlenmiş yapısal elemanı ifade etmektedir (Gonzalez, Woods, & Eddins, 2004).

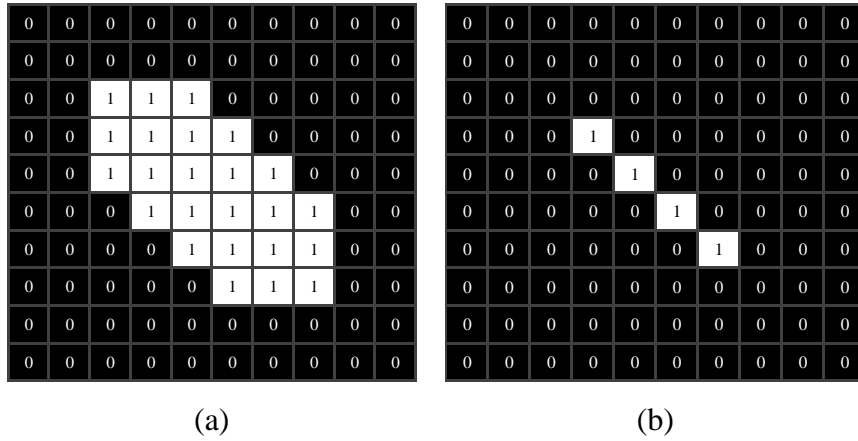
1.7.4.2. Aşınma (Erosion)

Aşınma, ikil bir görüntüdeki nesnelere küçültmeye ya da inceltmeye yarayan morfolojik bir işlemdir. Bu yöntemde de yapısal eleman sayısal görüntü üzerinde gözet gözet dolaştırılır. Eğer yapısal elemanın merkez noktası 1 değerli gözet ile karşılaşırsa yapısal elemanın diğer gözetleri incelenir. Eğer yapısal elemanın 1 değerli gözetlerinin kapsadığı gözetlerde herhangi bir 0 değerli gözet varsa, yapısal elemanını kapsadığı gözetler 0 değerini alır (Şekil 12). Böylece görüntü içerisindeki nesnelere küçülür ve nesne içerisinde boşluklar varsa genişler (Gonzalez, Woods, & Eddins, 2004).



Şekil 12. Aşınma işleminde yapısal elemanın kullanımı

Şekil 13'te ikil bir görüntünün gerçek hali ve Şekil 9(b)'de verilen yapısal eleman kullanılarak yapılan genişleme işlemi sonucunda elde edilen görüntü verilmiştir.



Şekil 13. Aşınma işlemi, (a) Sayısal görüntü; (b) Aşınma işlemi uygulanmış görüntü

$E \ominus F$ şeklinde gösterilen E 'nin F ile aşınma işlemi matematiksel olarak,

$$E \ominus F = \{z | (F)_z \cap F^c \neq \emptyset\} \quad (16)$$

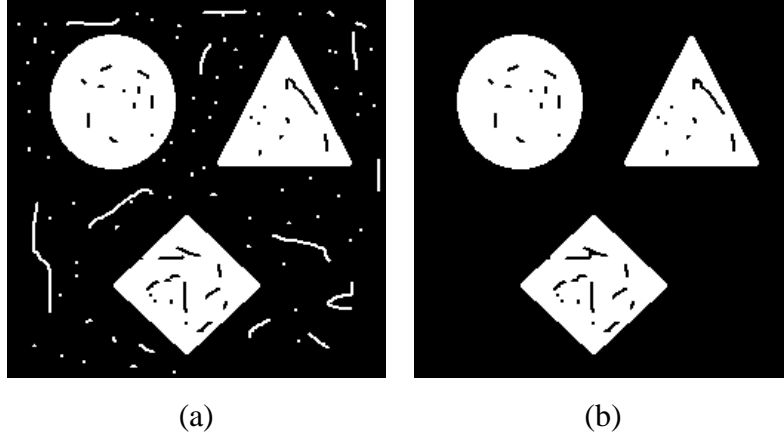
şeklinde tanımlanır. Burada E ve F sırasıyla, işlenecek görüntü matrisini ve uygun biçimde belirlenmiş yapısal elemanı ifade etmektedir (Gonzalez, Woods, & Eddins, 2004).

1.7.4.3. Açma (Opening) ve Kapama (Closing)

Genişleme ve aşınma işlemleri, görüntü işleme uygulamalarında genellikle birlikte kullanılır. Bir görüntüye hem aşınma hem de genişleme işlemlerinin uygulanması ile açma ya da kapama işlemlerinden biri uygulanmış olur (Gonzalez, Woods, & Eddins, 2004).

Morfolojik açma işlemi, bir görüntüye aynı yapısal eleman kullanılarak önce aşınma daha sonra genişleme işlemi uygulanmasıyla gerçekleşir. E ikil bir görüntü ve F yapısal eleman olmak üzere morfolojik açma işlemi aşağıdaki gibi tanımlanır (Gonzalez, Woods, & Eddins, 2004). Şekil 14'te gerçek bir görüntü ve açma işlemi sonucunda elde edilen görüntü verilmiştir.

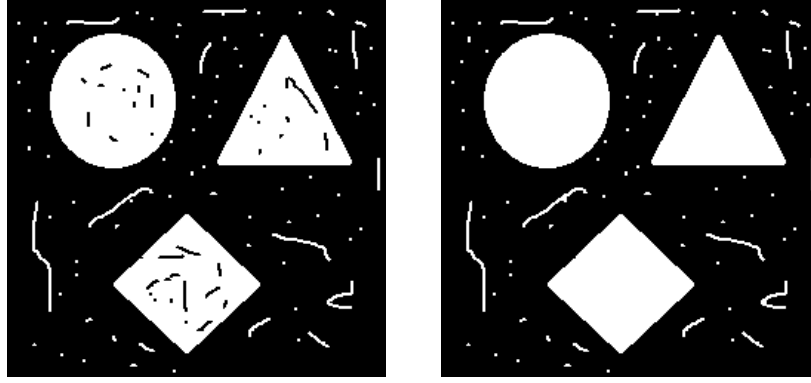
$$E \circ F = (E \ominus F) \oplus F \quad (17)$$



Şekil 14. Açma işlemi, (a) Gerçek görüntü; (b) Açma işlemi uygulanmış görüntü

Morfolojik kapama işlemi, bir görüntüye aynı yapısal eleman kullanılarak önce genişleme daha sonra aşınma işlemi uygulanmasıyla gerçekleşir. E ikil bir görüntü ve F yapısal eleman olmak üzere morfolojik kapama işlemi aşağıdaki gibi tanımlanır (Gonzalez, Woods, & Eddins, 2004). Şekil 15'te gerçek bir görüntü ve kapama işlemi sonucunda elde edilen görüntü verilmiştir.

$$E \cdot F = (E \oplus F) \ominus F \quad (18)$$



(a)

(b)

Şekil 15. Kapama işlemi, (a) Gerçek görüntü; (b) Kapama işlemi uygulanmış görüntü

Açma ve kapama işlemleri genellikle görüntü içerisindeki gürültüleri kaldırmak ve şekil yüzeylerini yumuşatmak için filtre olarak kullanılmaktadır. Bu işlemler genellikle ardı ardına uygulanır ve uygulanma sayısı yapısal elemanın boyutuna ve görüntü yapısına bağlıdır (Nixon & Aguado, 2008).

1.7.5. Bağlantılı Bileşen Etiketleme (Connected Component Labeling)

Görüntü işleme teknikleri arasında önemli bir yeri olan bağlantılı bileşen etiketleme, birden fazla nesne içeren görüntülerde nesnelere birbirlerinden ayırt edilebilmelerini sağlar. İkili görüntülerde gözleklerin görüntü içerisindeki hangi nesneye ait olduğunu bulmak için, öncelikle görüntüde kaç tane nesne olduğu ve bu nesnelerin konumlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bağlantılı bileşen etiketleme işleminde, görüntüdeki nesnelerin her gözeğine özel bir sayı yani etiket atanarak, nesnelereki gözlekler belirlenir. Etiketleme işlemi yayılarak doldurma veya sıralı etiketleme olmak üzere iki yöntem ile yapılabilir. Yayılarak doldurma yönteminde, bölge, içindeki tek bir noktadan başlanarak bütün yönlerde doldurulur. Sıralı bölge işaretleme yönteminde ise, görüntü yukarıdan aşağıya doğru görüntü taranarak bölgeler etiketlenir (Burger & Burge, 2009).

1.7.5.1. Yayılarak Doldurma Yöntemi ile Nesnelerin Etiketlemesi

Son derece basit olan bu yöntemde, etiketsiz bir arka plan gözeği aranır. Daha sonra bu nesnenin komşularındaki bütün gözlekler dolaşılır ve etiketlenir. Yayılarak doldurma ile

nesnelerin etiketlenmesi için özyinelemeli, tekrarlamalı derine ve tekrarlamalı enine yayılarak doldurma algoritmaları olmak üzere 3 algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmalar, kontrol edilecek bir sonraki gözeğin koordinatlarının nasıl seçildiği konusunda farklılık göstermektedir (Burger & Burge, 2009).

Özyinelemeli yayılarak doldurma algoritmalarında, her nesnede gözekler arasında komşuluk ilişkileri yardımıyla kökü başlangıç noktasında olan bir ağaç yapısı tanımlanır. Ancak görüntüdeki nesne sayısının artmasından dolayı daha fazla belleğe ihtiyaç duyulacağından bu yöntem genellikle küçük boyutlu görüntülerde kullanılır.

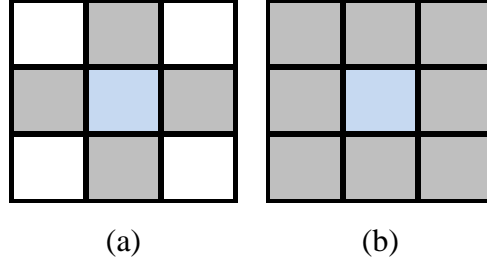
Her özyinelemeli algoritmanın yığınları yönetilerek iteratif bir algoritma gibi yeniden formüle edilebilir. Bu nedenle, tekrarlamalı derine yayılarak doldurma algoritmalarında, ziyaret edilmemiş komşular yığına kaydedilir ve özyinelemeli yöntemde olduğu gibi bir ağaç yapısı tanımlanır. Ancak burada ağaç yapısı derinine taranarak etiketleme işlemi yapılmaya çalışılır.

Tekrarlamalı enine yayılarak doldurma algoritmalarında gözekler başlangıç noktasından dışarı doğru yayılarak genişleyen bir dalga gibi taranır. Bu durumda ziyaret edilmemiş gözek koordinatları yığın yerine kuyrukta tutulur.

1.7.5.2. Sıralı Etiketleme ile Nesnelerin Etiketlenmesi

Sıralı etiketleme, özyinelemeli olmayan klasik bir yöntemdir. Görüntüdeki nesnelerin ön etiketlenmesi ve birden fazla etikete sahip nesnelerin etiketlerinin indirgenmesi olmak üzere iki adımdan oluşmaktadır. Kısmen karmaşık olan bu algoritma, özyinelemeli yöntemlere göre daha az bellek gereksinimi duymaktadır.

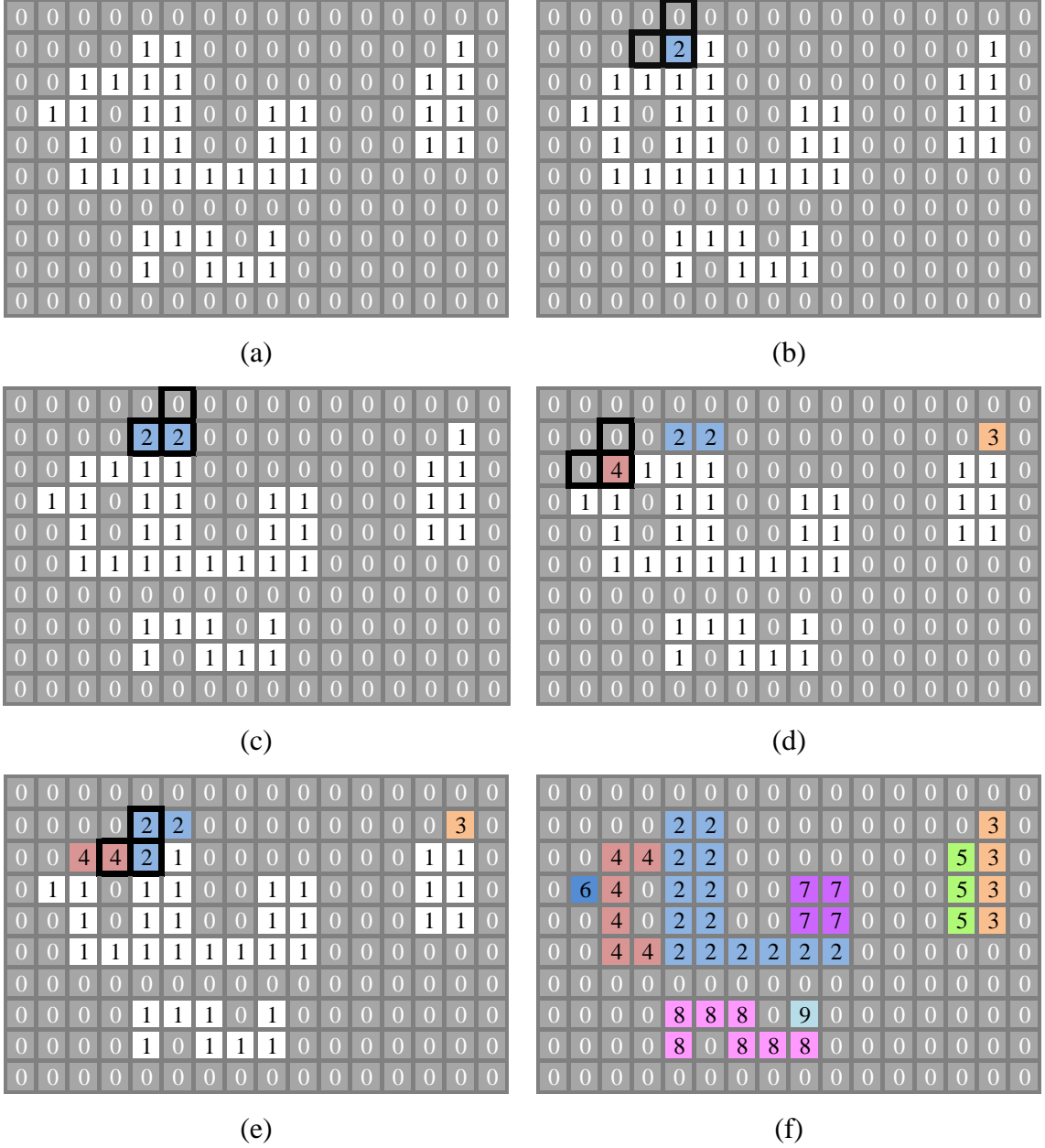
Her ön plan gözeğine başlangıç(ön) etiket atanması için görüntü sol üst köşeden sağ alt köşeye doğru sırayla taranır ve her gözeğin 4 veya 8 komşuluğundaki komşu gözekler incelenir. Şekil 16'da komşuluk gösterimleri verilmektedir.



Şekil 16. Komşuluk gösterimi,
 (a) 4-komşuluk;
 (b) 8-komşuluk

Eğer 4-komşuluğundaki gözetler incelenecekse, mevcut gözeğin sadece üst ve sol gözetleri kontrol edilir. Eğer 8-komşuluğundaki gözetler incelenecekse, mevcut gözeğin sol, sol üst, üst ve sağ üst gözetleri kontrol edilir.

Daha önce de belirtildiği gibi ikil bir görüntüde arka plan gözetlerinin 0 değerli, ön plan gözetlerinin ise 1 değerli olduğu kabul edilmektedir. Önceden tanımlanan komşuluk, görüntü üzerinde sol üst köşeden başlayarak yatay ve dikey olarak kaydırılır. Mevcut görüntü elemanı ön plan gözetki olduğu durumda, ona yeni bir etiket atanır veya incelenen komşulardan biri ön plan gözetki ise mevcut gözeke komşunun etiketi atanır. Bu şekilde ikil bir görüntüde soldan sağa veya yukarıdan aşağıya tarama yapılarak mevcut nesne etiketleri tanımlanır. Eğer iki veya daha fazla komşu farklı etiketlere sahip ise bu durum tek bir nesneye ait gözetlerin farklı etiketlere sahip olması anlamına gelir. Aynı nesnede iki farklı etiket varsa bu etiketler eşdeğerdir ve bu çakışmalar ilk adımda liste gibi dinamik veri yapıları kullanılarak kaydedilir. Ayrıca çakışmaların sayısı görüntünü içeriğine bağlı olup, ilk adımın sonunda bütün görüntü tarandığında kesin sayısı belli olmaktadır.

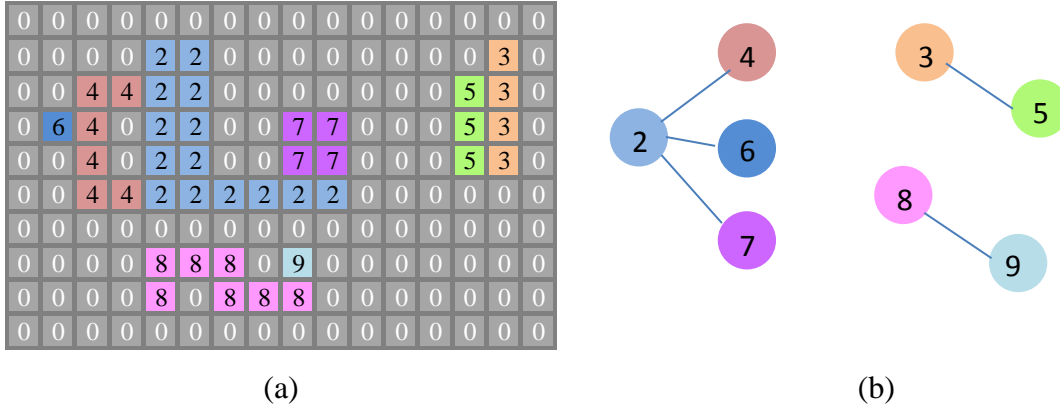


Şekil 17. Ön etiketleme işleminin adımları

Şekil 17(a)'daki ikil görüntüde koyu renkli (0 değerli) gözetler arka planı, beyaz renkli (1 değerli) gözetler ise nesneyi göstermektedir. Şekil 17(b)'de görüntü taranırken ilk kez nesneye ait bir gözetle karşılaşılmıştır ve sol ve üst komşulardaki gözetler kontrol edilmiştir. Bu gözetler 0 değerli oldukları için mevcut gözeğe 2 etiketi atanmıştır. Şekil 17(c)'de aynı nesnenin ikinci gözeğinin sol ve üst komşuları kontrole edilmiş ve komşu gözetlerdeki değerler 0 ve 2 olduğundan etkin gözet 2 ile etiketlenmiştir. Şekil 17(d)'deki mevcut gözeğin sol ve üst komşularının 0 değerli olması nedeniyle bu gözet 4 ile

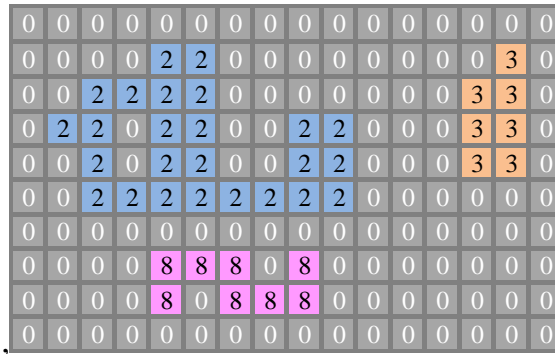
etiketlenmiştir. Şekil 17(e)'de de etkin gözeğin sol komşusunun değeri 4 ve üst komşusunun değeri 2 olduğundan en küçük değerli etiket mevcut gözeğe atanır. Bu durumda bu gözek 2 ile etiketlenir. Bu şekilde diğer gözekler de taranarak görüntüdeki tüm nesnelere etiketlenmiştir (Şekil 17(f)).

Birinci adımda çakışan kısmi nesnelere birleştirmek için ikinci adımda bu etiket çakışmaları kontrol edilir. Şekil 18'de bu etiket çakışmaları gösterilmiştir. Aynı nesnedeki farklı etiketlerden en küçüğü, kendisinden daha büyük değerli diğer tüm gözекlere yeni değer olarak atanır. Bu şekilde tüm görüntüdeki nesnelere etiketleri güncellenerek etiketleme işlemi tamamlanmış olur (Burger & Burge, 2009).



Şekil 18. Etiket çakışmalarının gösterimi, (a) 1. adım sonundaki etiket değerleri; (b) Etiket çakışmaları

Şekil 19'da görüldüğü gibi görüntüdeki tüm nesnelere farklı etiketlerle etiketlenmiştir.



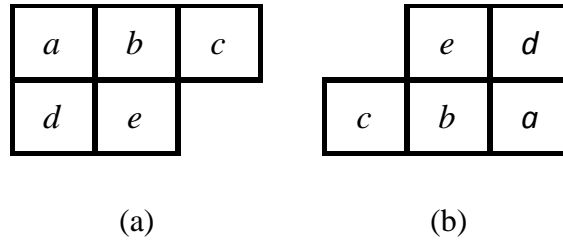
Şekil 19. Etiketleme işlemi uygulanmış görüntü

Suzuki'ye göre bağlantılı bileşen etiketleme algoritmaları dört temel sınıfta incelenebilir (Suzuki, Horiba, & Sugie, 2003):

1. Veri üzerinde ileri ve geri tekrarlı geçiş yapan algoritmalar
2. Veri üzerinden iki geçiş yapan algoritmalar
3. Veriyi temsil etmek için hiyerarşik ağaç yapıları kullanan algoritmalar
4. Paralel algoritma kullanan yöntemler

İlk iki sınıftaki algoritmalar sırdan bilgisayar mimarisi için uygun algoritmalar ve etiketlerin denklik değerlerini ayrı bir dizide tutarlar. Daha sonra arama algoritmaları kullanarak bu denklilikleri çözümlerler.

Bağlantılı bileşen etiketleme için geliştirilen ilk algoritma olan Rosenfeld ve Pfaltz algoritması Suzuki'nin sınıflandırmasına göre ikinci sınıftadır ve Rosenfeld ve Pfaltz tarafından 1966 yılında geliştirilmiştir (Yapa & Harada, 2008). Bu algoritma, Şekil 20'de verilen satır tarama filtrelerini kullanarak görüntüyü soldan sağa ve yukarıdan aşağıya doğru tarar (Rosenfeld & Pfaltz, 1966). Rosenfeld ve Pfaltz bağlantılı bileşen etiketleme filtreleri Şekil 20'de verilmiştir.



Şekil 20. Rosenfeld ve Pfaltz BBE filtreleri, (a) İleriye doğru satır tarama filtresi; (b) geriye doğru satır tarama filtresi

Bu filtredeki mevcut gözek konumu e olarak düşünülür. Eğer mevcut gözek konumundaki değer 0 ise filtre bir sonraki tarama gözeğine hareket ettirilir. Eğer mevcut gözek konumu 1 ve diğer tüm 4 komşuluktaki gözekler de 0 ise e gözeğine yeni bir etiket değeri atanır. Eğer iki veya daha fazla komşunun değeri 0 değilse, 4 komşu gözektan en küçük etiket değerine sahip olan gözeğin etiket değeri, e gözeğinin etiket değerine atanır ve dört komşunun etiketleri birbirine denk olarak işaretlenir. Ayrı bir denklik matrisi oluşturularak denklik bilgileri saklanır ve bu denklik matrisi kullanılarak, gözek etiketleri geçici olarak tanımlandıktan sonra etiketlerdeki fazlalıklar belirlenir. Denklik matrisinin

denklik ilişkilerini çözümlenebilmesi ve fazla etiketleri kaldırabilmesi için bir işlem den geçirilmesi gerekir. İlk taramada her gözege geçici olarak atanan etiket değerleri, ikinci taramada denklik matrisinde kendisine karşılık gelen gerçek etiket değeriyle değiştirilerek işlem tamamlanır. Büyük boyutlu görüntüler için işlem zamanının artması bu algoritmanın en büyük dezavantajıdır (Park, Looney, & Chen, 2000).

Rosenfeld ve Pfalts algoritmasının işlem zamanını düşürmek için Park algoritması geliştirilmiştir. Park algoritması, işlem zamanını düşürmek için, görüntüyü $N \times N$ boyutunda bölgelere ayırır ve her bölgeye Rosenfeld ve Pfalts algoritmasını birbirlerinden bağımsız olarak uygulayarak her bölge için geçerli olan yerel etiket değerleri üretir (Rosenfeld & Pfaltz, 1966). Daha sonra bölge sınırlarındaki denklikleri çözümlenerek her bölge komşu bölgeleriyle birleştirilir. Bu algoritma ikil görüntülerde Rosenfeld ve Pfalts algoritmasına göre daha hızlı çalışmaktadır.

Bir diğer bağlantılı bileşen etiketleme algoritması ise klasik ileri ve geri satır tarama algoritmasıdır. Bu algoritma Suzuki'nin sınıflandırmasına göre birinci sınıfa aittir. Görüntü, ileriye ve geriye doğru tekrarlanan bir biçimde taranarak, tüm nesne gözeklerinin doğru bir şekilde etiketlenmesi sağlanır. Bu taramalar sırasında, nesne gözeklerinin etiketlerine, minimum işlemi uygulanır ve taramaya, hiçbir gözeğin etiket değerinde değişiklik gerçekleşmeyinceye kadar devam edilir (Suzuki, Horiba, & Sugie, 2003).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Sertleşmiş betonda hava boşluklarının tahmininde kullanılan yöntemlere istatistiksel açıdan bakıldığında ideal yöntemler gibi gözükse de, bu yöntemlerin doğruluğunu kanıtlayacak herhangi bir yaklaşım ortaya konulmamıştır. Dolayısıyla önerilecek herhangi bir yöntemin mevcut yöntemle göre daha başarılı olup olmadığı da araştırılmayacaktır. Bu nedenle bu çalışmada hava boşluğu önceden bilinen yapay beton numuneleri oluşturulmuştur. Bu modellerden kesitler alınarak hem mevcut yöntemin hem de önerilen yöntemin başarımları ölçülmüştür. Ayrıca hem mevcut yöntem hem de önerilen yöntem kullanılarak gerçek beton numuneler üzerinde de analizler yapılmıştır.

2.2. Yapay Beton Benzetimi

Yapay bir model oluşturmak için öncelikle model parametrelerinin bilinmesi gerekir. Bu nedenle, yapılacak ölçümlerin daha güvenilir sonuçlar verebilmesi için seçilecek parametreler gerçek parametrelere yakın olmalıdır. Dolayısıyla model parametrelerinin gerçek kesit yardımıyla belirlenmesi doğru bir yaklaşım olacaktır. Bu işlemi gerçekleştirmek için öncelikle gerçek numunenin bazı istatistiksel işlemlere tabi tutulması gerekir. Numune analizi yapılmadan önce bazı varsayımlar kabul edilmiştir. Bu varsayımlar,

1. Sürüklenmiş hava boşlukları küresel bir yapıdadır.
2. Ölçülebilen hava boşluklarının çapları $4mm$ 'den küçüktür.
3. Ölçülebilen sürüklenmiş hava boşluklarının çapları $5\mu m$ 'den büyüktür.

ve istenen parametreler ise,

1. Hava boşluklarının yarıçaplarının dağılımı,
2. Hava boşluk dağılım parametreleri,
3. Hava boşluklarının konumlarının dağılımları,
4. Hava boşluk oranı

olarak verilmektedir.

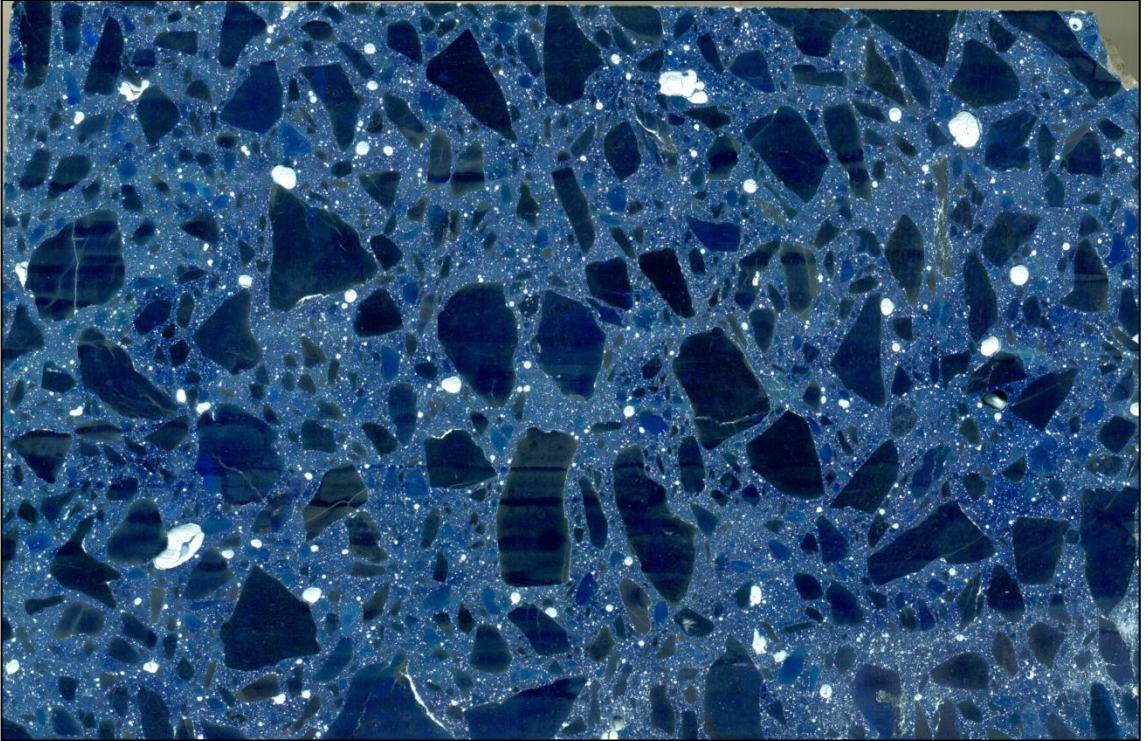
2.2.1. Model Parametrelerinin Belirlenmesi

Başlangıç olarak $150 \times 100 \times 40$ mm'lik kesilmiş ve cilalanmış bir numunenin yüzeyi (Şekil 21) çinko pastası ile kaplandıktan sonra mavi beton boyası ile boyanır (Şekil 22). İncelenmeye hazır hale getirilen numuneler, yüksek çözünürlüklü bir tarayıcıda taranarak sayısal ortama aktarılır. Burada kullanılacak olan tarayıcının çözünürlüğünün en az 2400dpi olması gerekir. Çünkü hava boşluklarının analizi yapılırken çapları $5\mu m$ 'den küçük olan boşluklar incelemeye katılmamaktadır. Bu nedenle, her bir gözeğin en az $5\mu m$ boyutunda olması için 4800dpi çözünürlüğünde bir tarayıcı gerekir. Ancak tarayıcının büyük olması işlem hacmini oldukça artırmaktadır. Ayrıca, boşluk çapları belirli sınıflara ayrılır ve bu sınıf aralıkları en küçük $10\mu m$ çaplarında olduğundan çözünürlüğü 2400dpi olan bir tarayıcı kullanmak yeterli bir sonuç verecektir. İncelenecek numune 2400dpi çözünürlüğünde bir tarayıcı ile tarandığında yaklaşık olarak 14172×9448 göze boyutlarında renkli bir görüntü elde edilmektedir. Renkli görüntülerin daha kolay işlenebilmesi için görüntünün renk bileşenlerinin ortalaması alınarak gri seviyeli sayısal bir görüntü elde edilmektedir (Şekil 23).

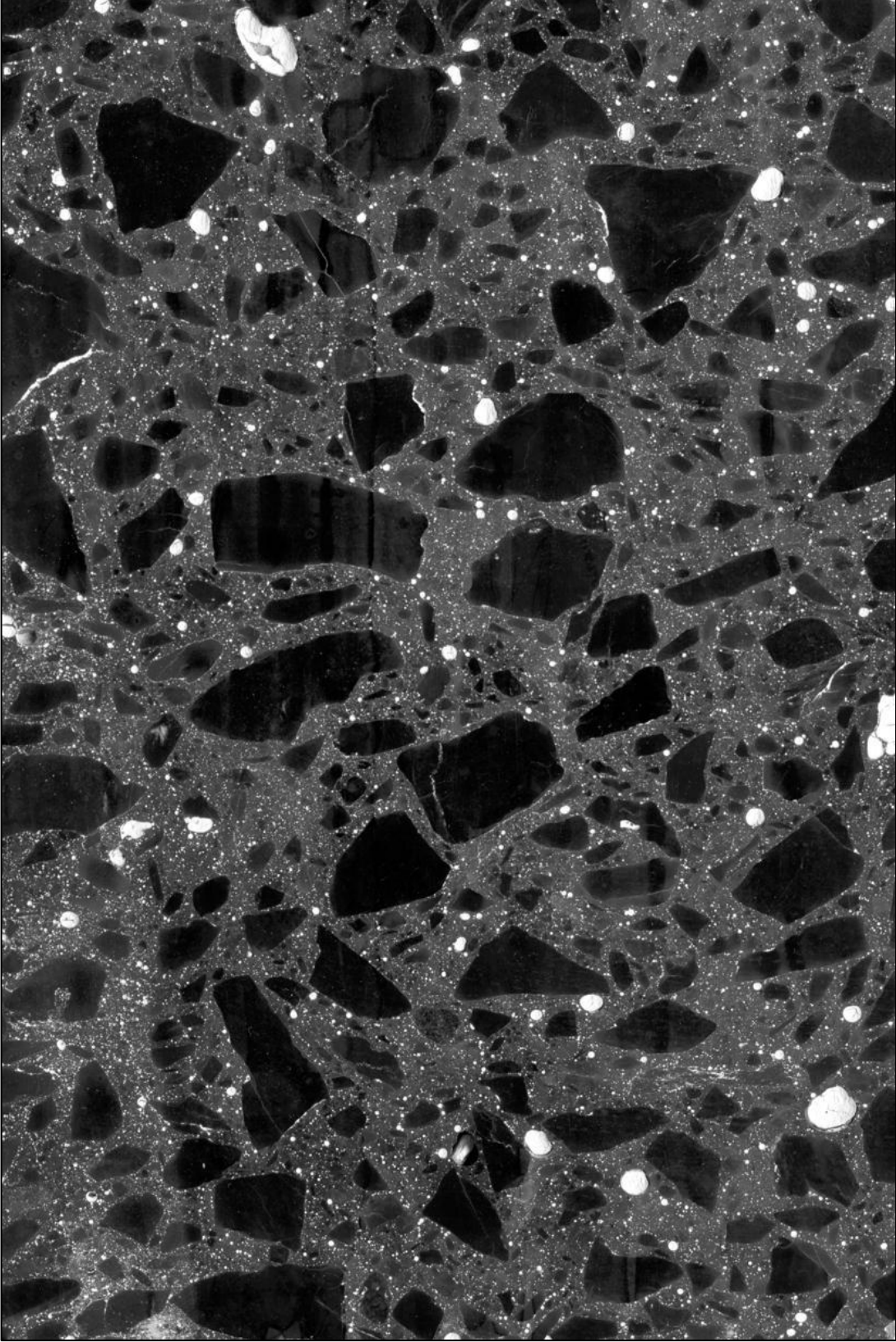
İşlenmeye hazır hale getirilen görüntülerdeki hava boşluk dağılımlarının homojen bir dağılım gösterip göstermediğini incelemek için görüntü, düşeyde ve yatayda 4 eşit parçaya bölünerek 16 tane küçük numune elde edilir (Şekil 24). Her bir parçaya tek tek eşikleme işlemi uygulanırsa ikil tabanlı 16 ayrı görüntü elde edilir (Şekil 25). İkil tabanlı görüntülerdeki nesnelere (hava boşlukları) tek tek etiketlenerek Şekil 26'daki renklendirilmiş görüntü elde edilir.



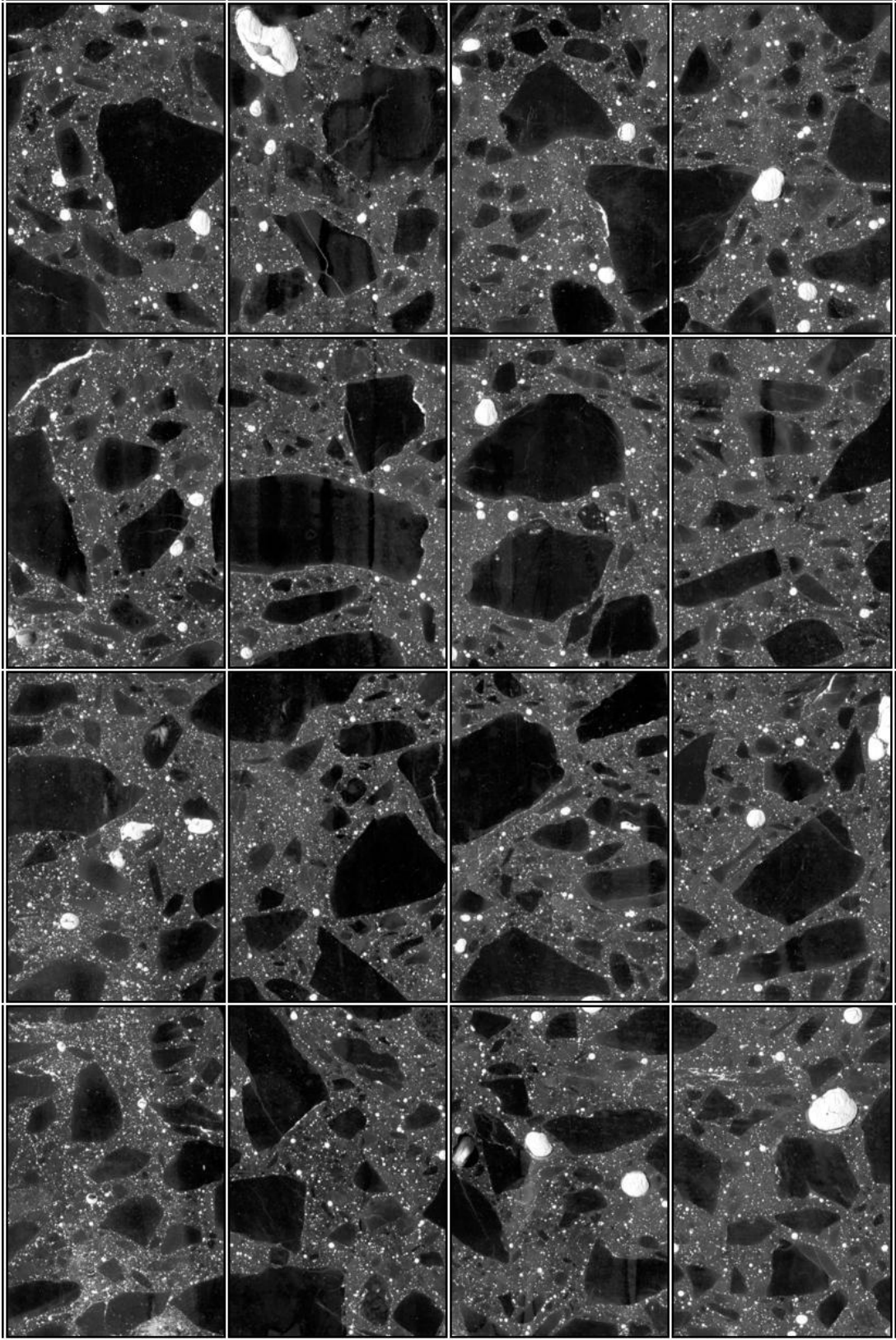
Şekil 21. Kesilmiş numune kesiti



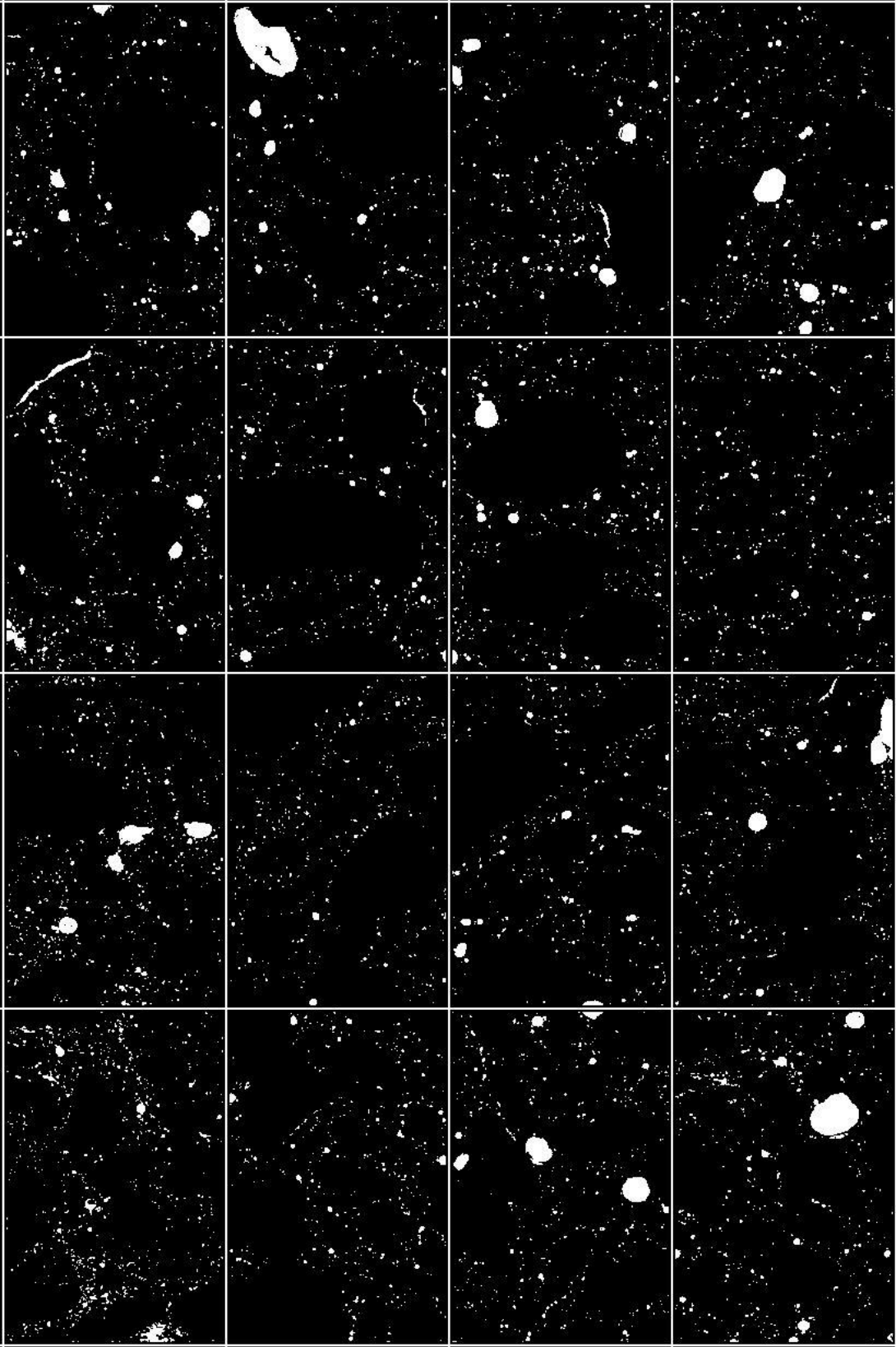
Şekil 22. Çinko pastası yedirilmiş ve mavi boyanmış numune kesiti



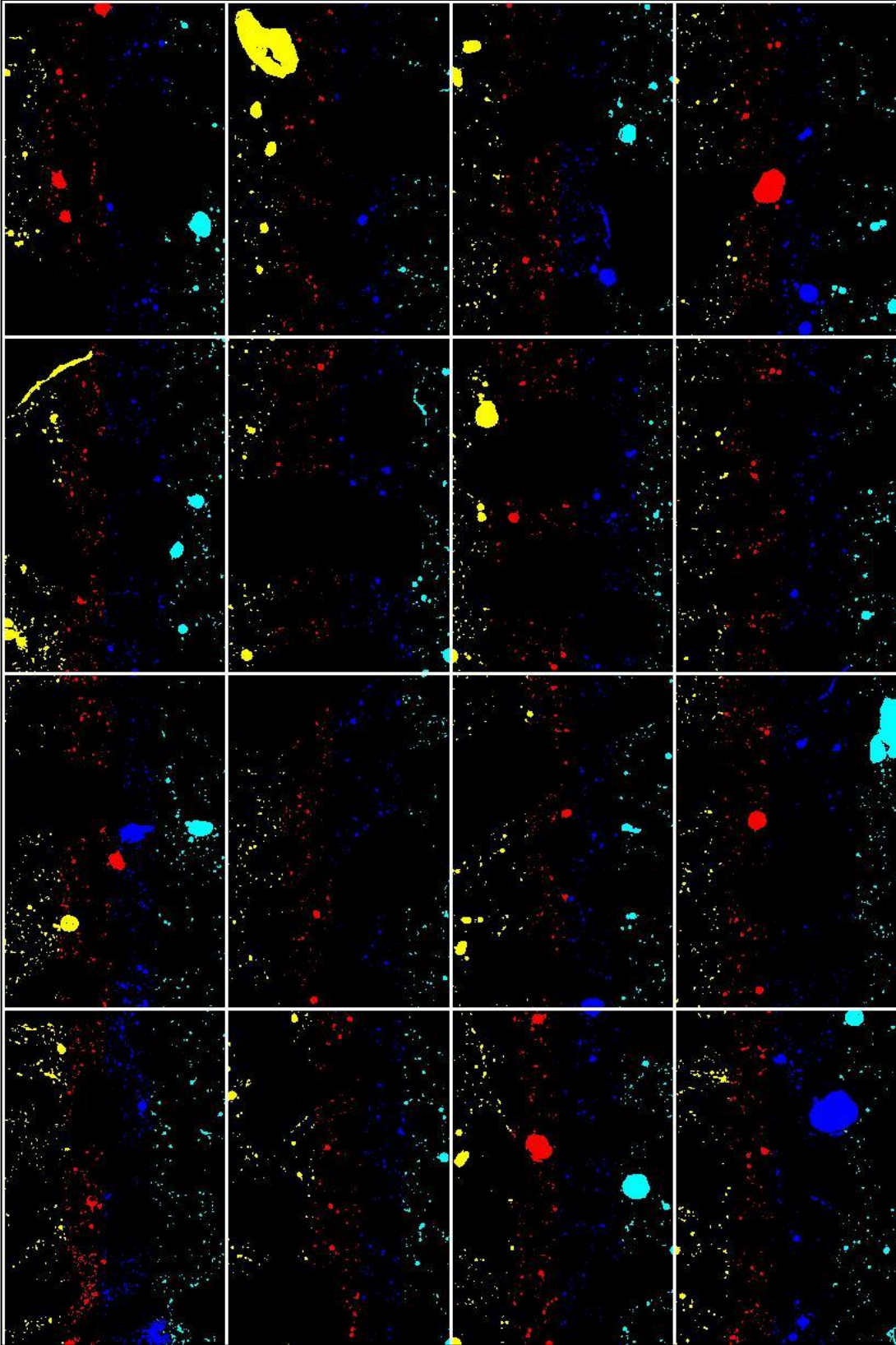
Şekil 23. Düşey yönde gösterilmiş numune kesiti görüntüsü



Şekil 24. Numune görüntüsünün parçalara bölünmesi



Şekil 25. Parçalanmış numune görüntülerinin iki düzeyli eşiklenmesi



Şekil 26. Eşiklenmiş görüntülerin etiketlenmesi

Etiketleme sonucunda ikil görüntü, etiket matrislerine (h_{ij}) döner. Bu etiketleme sonucunda her parça için toplam nesne (hava boşluğu) sayısı (L_{ij}) belirlenebilir ve etiketlenen her nesnenin (T_{ijk}) gözet sayısı (gözet alanı),

$$A_{ijk} = \sum_{y=1}^{H_{ij}} \sum_{x=1}^{W_{ij}} h_{ij}(x, y) \delta(h_{ij}(x, y) - k), \quad (k = 1, 2, \dots, L_{ij}) \quad (19)$$

biçiminde bulunmaktadır. Buradaki δ fonksiyonu ise,

$$\delta(x) = \begin{cases} 1 & x = 0 \\ 0 & x \neq 0 \end{cases} \quad (20)$$

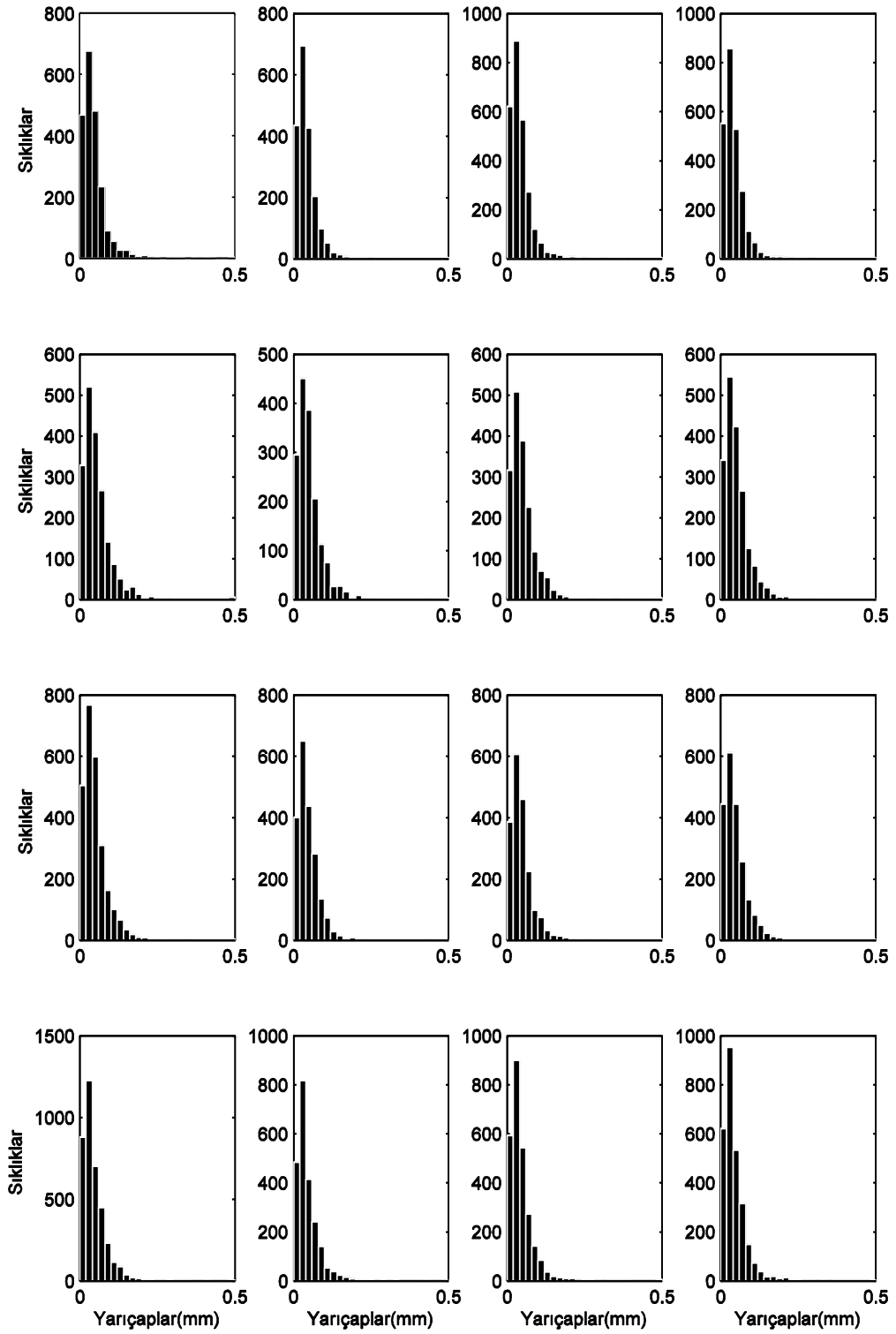
biçiminde gösterilmektedir. Burada W_{ij} ve H_{ij} sırasıyla g_{ij} görüntü parçasının gözet biriminde genişlik ve yüksekliktir. Her gözet alanı (A_{ijk}) T_{ijk} nesnenin gözet cinsinden alanını vermektedir. Her bir boşluk dairesel bir şekilde kabul edildiğinden elde edilen alanlar yardımıyla nesnelerin yarıçapları,

$$r_{ijk} = \sqrt{A_{ijk}/\pi} \quad (21)$$

biçiminde bulunmaktadır. Nesnelerin yarıçaplarının elde edilmesiyle birlikte model parametreleri kestirilebilir.

2.2.2. Gerçek Numunelerden Boşluk Dağılımının Belirlenmesi

Tüm parçalardaki nesnelerin yarıçaplarının histogramları Şekil 27'de verilmektedir. Histogramların dağılımlarına bakıldığında sola dayalı pozitif değerlerden oluşan bir dağılım olduğu görülmektedir.



Şekil 27. Tüm parçalardaki nesnelerin yarıçaplarının histogramları

Görüntü tabanlı verilerin doğası gereği, belirlenen yarıçaplar kesikli değerlerden oluşmaktadır. Dolayısıyla χ^2 uyum iyiliği testinde yüksek yarıçaplarda beklenen veya gözlenen değerler 5'in altında olacağından, boşluk dağılımının belirlenmesinde χ^2 uyum

iyiliği testinin kullanımı güvenilir olmayacaktır. Öte yandan deneysel dağılım fonksiyonları (EDF) yardımıyla yapılacak uyum testlerinde ise kesikli verilerin uyumda sorunlara neden olacağından öncelikle logaritmik olabilirlik değerlerine göre dağılımın belirlenmesi yoluna gidilmiştir. Bu nedenle boşluk dağılımını belirlemek için beş tane dağılım seçilmiştir ve bu dağılımların olabilirlik değerleri hesaplanarak elde edilen sonuçlara göre en uygun dağılım belirlenmiştir.

Her parçanın boşluk yarıçaplarına göre hangi dağılıma uyduğunun araştırılması için

- Normal
- Lognormal
- Weibull
- Üstel
- Gamma

dağılımları seçilmiştir. Seçilen dağılımlara göre hesaplanan logaritmik olabilirlikler Tablo 4-8'de verilmiştir. Her parçanın logaritmik olabilirlikleri karşılaştırıldığında Tablo 5'te verilen logaritmik olabilirlikten 12 tanesi en büyük olabilirliği verirken, Tablo 8'de verilen logaritmik olabilirliklerden sadece 4 tanesi en büyük olabilirliği vermiştir. Olabilirlik değerleri incelendiğinde Tablo 8'de en büyük olabilirliği veren parçaların Tablo 5'teki olabilirliklerinin birbirine çok yakın olduğu da görülmektedir. Bu verilerden yola çıkarak numune parçalarının log-normal bir dağılım olabileceği olasılığı yüksektir. Bu nedenle yapay model çalışmalarında oluşturulacak boşluk yarıçaplarının log-normal dağılımdan üretilmesine karar verilmiştir. Ayrıca literatürde bu konuda yapılan çalışmalarda hava boşlukları dağılımının log-normal bir dağılım gösterdiği belirtilmektedir (Yim, Kim, Lee, & Kwak, 2013).

Tablo 4. Normal dağılıma göre tüm parçaların Logaritmik Olabilirliği (*: en büyük olabilirlik)

Logaritmik Olabilirlik Değerleri		<i>j</i>			
		1	2	3	4
<i>i</i>	1	4026	3902	5212	4755
	2	3357	2943	3223	3441
	3	4831	4004	3699	3962
	4	7095	4217	5109	5249

Tablo 5. Log-normal dağılıma göre tüm parçaların Logaritmik Olabilirliği (*: en büyük olabilirlik)

Logaritmik Olabilirlik Değerleri		<i>j</i>			
		1	2	3	4
<i>i</i>	1	4694 *	4539 *	6029 *	5617 *
	2	3832	3365	3643	3954 *
	3	5521 *	4499	4236 *	4474 *
	4	8304 *	5052 *	5947 *	6187 *

Tablo 6. Weibull dağılımına göre tüm parçaların Logaritmik Olabilirliği (*: en büyük olabilirlik)

Logaritmik Olabilirlik Değerleri		<i>j</i>			
		1	2	3	4
<i>i</i>	1	4587	4424	5896	5472
	2	3797	3332	3611	3895
	3	5447	4453	4167	4429
	4	8150	4898	5816	6031

Tablo 7. Üstel dağılıma göre tüm parçaların Logaritmik Olabilirliği (*: en büyük olabilirlik)

Logaritmik Olabilirlik Değerleri		<i>j</i>			
		1	2	3	4
<i>i</i>	1	4388	4220	5634	5243
	2	3622	3177	3428	3701
	3	5191	4209	3962	4225
	4	7865	4715	5569	5790

Tablo 8. Gamma dağılımına göre tüm parçaların Logaritmik Olabilirliği (*: en büyük olabilirlik)

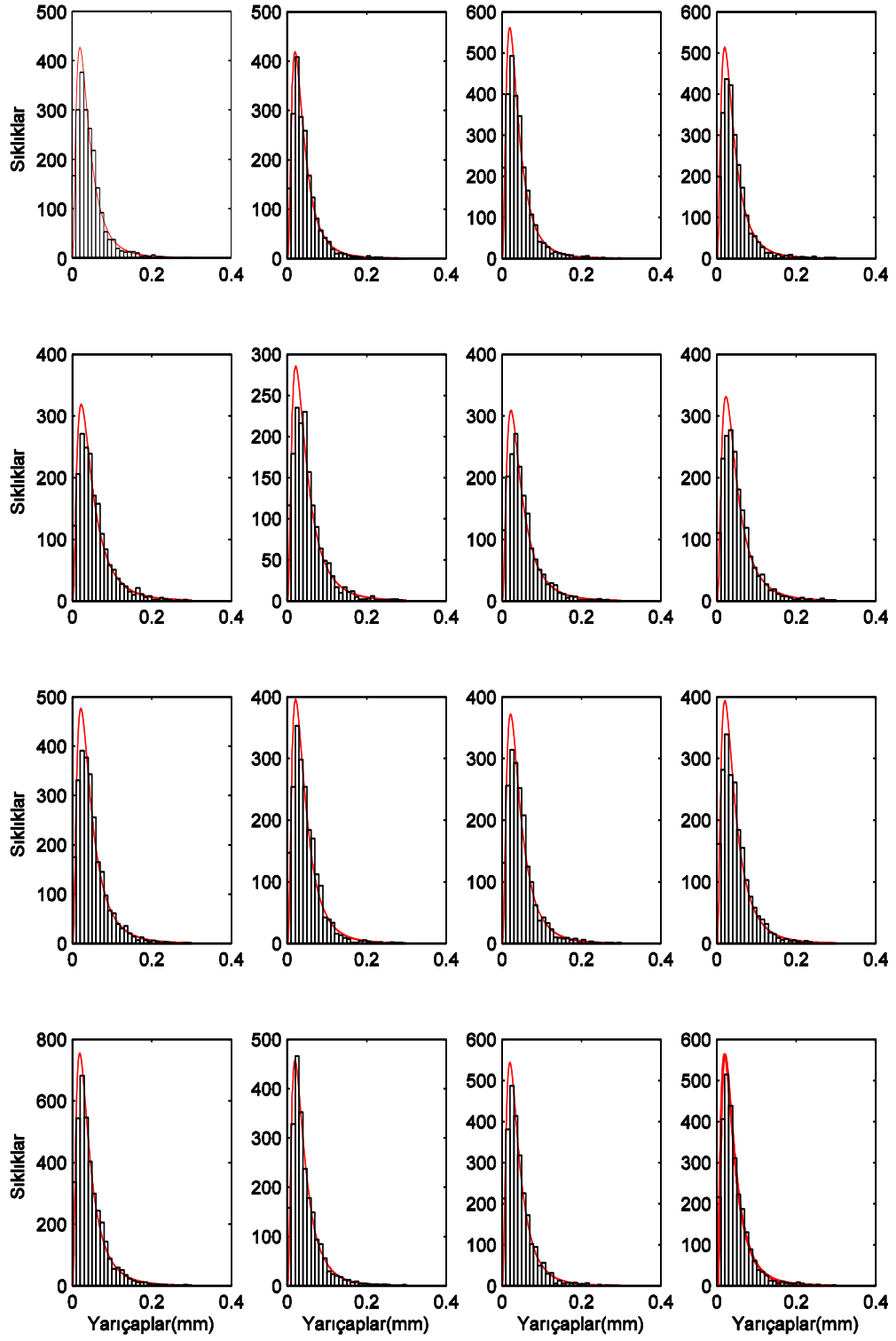
Logaritmik Olabilirlik Değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	4652	4491	5977	5558
	2	3833 *	3366 *	3648 *	3942
	3	5507	4502 *	4219	4470
	4	8239	4974	5894	6118

Her parça yerine tüm numunenin logaritmik olabilirliği hesaplandığında Tablo 9'daki değerler elde edilmiştir.

Tablo 9. Bütün numunelerin seçilen dağılımlara göre Logaritmik Olabilirliği (*: en büyük olabilirlik)

İncelenen Dağılımlar	Logaritmik olabilirliği
Normal Dağılım	343893
Log-normal Dağılım	398371 *
Weibull Dağılımı	390879
Üstel Dağılım	374121
Gamma Dağılımı	395732

Tablo 9 incelendiğinde de log-normal dağılımın en büyük olabilirlik değerini verdiği görülmektedir. Şekil 28'de yarıçapların log-normal dağılıma uyum grafikleri verilmektedir. Boşluk yarıçapların log-normal dağılıma uygunluğu test etmek için Kolmogorov-Smirnov uyum iyiliği testi kullanılmıştır. Test sonuçlarının p değerleri Tablo 10'da verilmiştir.



Şekil 28. Her numune parçasındaki nesnelerin yarıçaplarının dağılımı

Tablo 10. Her parçanın Log-normal dağılıma uyumunun Kolmogorov-Smirnov testine göre p değerleri (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar)

p değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	0.0153	0.0871 *	0.0037	0.0012
	2	0.0038	0.0004	0.0003	0.0061
	3	0.0001	0.0005	0.0016	0.0027
	4	0.0001	0.0946 *	0.0056	0.0020

Numune parçaları P_{ij} şeklinde ifade edilmektedir. Burada i satır numarasını j sütun numarasını belirtmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, sadece $P_{1,2}$ ve $P_{4,2}$ görüntü parçalarının %5 anlamlılık düzeyinde Kolmogorov-Smirnov uyum iyiliği testine göre log-normal bir dağılıma uyduğu görülmektedir.

Bu uygulamada gözet tabanlı görüntüden dolayı kesikli bir veri kümesi test edilmiştir. Bu nedenle, diğer parçaların Kolmogorov-Smirnov testine göre sürekli bir dağılım olan log-normal dağılıma uymadığı görülmüştür. Ayrıca numunedeki agregaların düzensiz dağılması da testi olumsuz etkileyen önemli faktörlerden biridir. Bununla birlikte bütün numunenin log-normal dağılıma uygunluğu da Kolmogorov-Smirnov uyum iyiliği testine göre reddedilmiştir. Yine de log-normal dağılımın hem görsel yaklaşımlardan hem de logaritmik olabilirlik değerlerine göre en iyi yakınsamayı sağladığı görülmektedir. Öte yandan literatürde yapılan çalışmalarda da hava boşluklarının dağılımının log-normal bir dağılıma sahip olduğu gösterilmiştir (Yim, Kim, Lee, & Kwak, 2013).

2.2.3. Gerçek Numunelerden Boşluk Dağılım Parametrelerinin Tahmini

Log-normal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu,

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\log_e(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (22)$$

biçiminde verilmektedir. Bu dağılımda μ ve σ parametrelerinin tahmin edilmesi gerekmektedir. Ancak parametreler doğrudan hesaplanamadığından μ ve σ parametreleri,

$$\mu = \log\left(\frac{m^2}{\sqrt{v + m^2}}\right) \quad (23)$$

ve

$$\sigma = \sqrt{\log\left(\frac{v}{m^2} + 1\right)} \quad (24)$$

biçiminde hesaplanmaktadır. Buradaki m ve v sırasıyla yarıçapların ortalama ve varyansdır. Her parçadaki hava boşluklarının yarıçaplarının ortalaması ve varyansı sırasıyla Tablo 11 ve Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 11. Parça modellerdeki hava boşluklarının yarıçaplarının ortalamaları

m ortalama		j			
		1	2	3	4
i	1	0.047485	0.045019	0.044999	0.046484
	2	0.057529	0.05511	0.05473	0.054263
	3	0.052227	0.048612	0.050114	0.0503
	4	0.047977	0.047042	0.046721	0.047017

Tablo 12. Parça modellerdeki hava boşluklarının yarıçaplarının varyansları

v varyans		j			
		1	2	3	4
i	1	0.001798	0.001466	0.00156	0.001669
	2	0.002935	0.002633	0.002512	0.002268
	3	0.002229	0.001703	0.001955	0.00209
	4	0.002007	0.001708	0.001732	0.001754

Tablo 11 ve Tablo 12’deki veriler kullanılarak μ ve σ parametreleri (23) ve (24) eşitlikleri yardımıyla bulunmuş ve Tablo 13 ve Tablo 14’de gösterilmiştir.

Tablo 13. Parça modellerdeki hava boşluk dağılımlarının μ parametreleri

μ parametreleri		j			
		1	2	3	4
i	1	-3.34049	-3.37282	-3.38675	-3.35486
	2	-3.17291	-3.21057	-3.20988	-3.19946
	3	-3.25074	-3.29528	-3.28136	-3.29078
	4	-3.35055	-3.34267	-3.35567	-3.34933

Tablo 14. Parça modellerdeki hava boşluk dağılımlarının σ parametreleri

σ parametreleri		j			
		1	2	3	4
i	1	0.765697	0.737782	0.755834	0.756577
	2	0.796802	0.790112	0.780425	0.755698
	3	0.772777	0.736744	0.758812	0.775924
	4	0.791842	0.756248	0.764349	0.764316

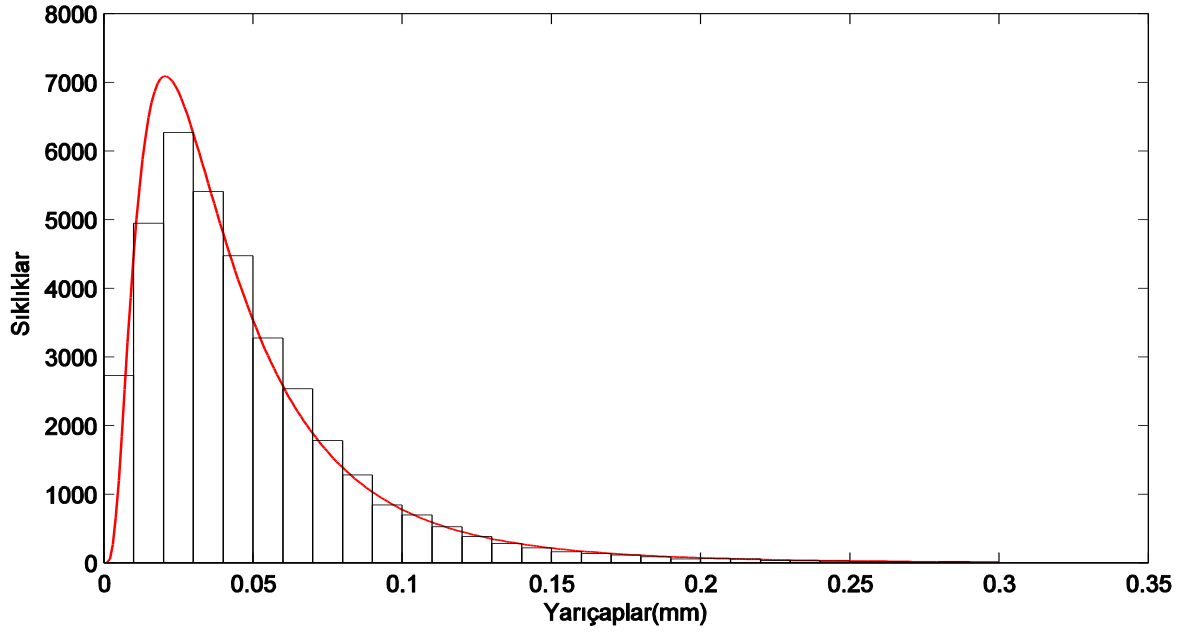
Numune tek bir parça olarak ele alınıp değerlendirildiğinde, boşluk yarıçaplarının ortalaması ve varyansı,

$$\begin{aligned} m &= 0.04927 \\ v &= 0.001961 \end{aligned} \quad (25)$$

olarak bulunmuştur. Ortalama ve varyans yardımıyla μ ve σ parametreleri,

$$\begin{aligned} \mu &= -3.30652 \\ \sigma &= 0.769518 \end{aligned} \quad (26)$$

olarak hesaplanmıştır. Hava boşluğu yarıçaplarının histogramı ile bulunun parametreler yardımıyla çizilen olasılık yoğunluk fonksiyonunun çakıştırılması Şekil 29'da gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde büyük yarıçaplı hava boşluklarında iyi bir uyum gözlenirken, küçük yarıçapların dağılımında uyumsuzluk gözlenmektedir.



Şekil 29. Bütün numunedeki hava boşluğu yarıçaplarının dağılımının gösterilmesi

2.2.4. Gerçek Numune Parçalarının Karşılaştırılması

Gerçek numune parçalarının aynı dağılımdan gelip gelmediğini araştırılması ile hava boşluklarının dağılımının homojen bir dağılım gösterip göstermediği bulunabilir. Her bir P_{ij} numune parçası diğer parçalar ile iki popülasyonlu Kolmogorov-Smirnov uyum iyiliği testine tabi tutularak aynı dağılımdan gelip gelmedikleri araştırılmıştır. Araştırma sonucunda elde edilen p değerleri Tablo 15-30'da verilmektedir. Bu sonuçlara göre 0.05 anlamlılık düzeyinde kabul edilen p değerleri işaretlenmiştir.

Tablo 15. P_{11} parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar)

p değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	1.000000 *	0.178950 *	0.084036 *	0.495932 *
	2	0.000000	0.000002	0.000001	0.000000
	3	0.000378	0.022936	0.030333	0.004999
	4	0.000995	0.025885	0.018337	0.025789

Tablo 16. P_{12} parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar)

p değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	0.178950 *	1.000000 *	0.868502 *	0.305314 *
	2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	3	0.000000	0.000277	0.000023	0.000121
	4	0.001339	0.094494 *	0.021856	0.029748

Tablo 17. P_{13} parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar)

p değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	0.084036 *	0.868502 *	1.000000 *	0.245170 *
	2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	3	0.000000	0.000015	0.000029	0.000001
	4	0.000131	0.059469 *	0.010421	0.014663

Tablo 18. P_{14} parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar)

p değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	0.495932 *	0.305314 *	0.245170 *	1.000000 *
	2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	3	0.000001	0.000074	0.001497	0.000168
	4	0.000431	0.065054 *	0.012049	0.016845

Tablo 19. P_{21} parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar)

p değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	2	1.000000 *	0.192799 *	0.034011	0.458450 *
	3	0.000704	0.000033	0.000001	0.000210
	4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Tablo 20. P_{22} parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar)

p değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	0.000002	0.000000	0.000000	0.000000
	2	0.192799 *	1.000000 *	0.979066 *	0.885472 *
	3	0.059923 *	0.003746	0.004784	0.011948
	4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Tablo 21. P_{23} parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar)

p değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000
	2	0.034011	0.979066 *	1.000000 *	0.753222 *
	3	0.100473 *	0.005956	0.008068	0.001854
	4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Tablo 22. P_{24} parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar)

p değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	2	0.458450 *	0.885472 *	0.753222 *	1.000000 *
	3	0.082304 *	0.007217	0.000532	0.002591
	4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Tablo 23. P_{31} parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar)

p değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	0.000378	0.000000	0.000000	0.000001
	2	0.000704	0.059923 *	0.100473 *	0.082304 *
	3	1.000000 *	0.097619 *	0.204576 *	0.180200 *
	4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Tablo 24. P_{32} parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar)

p değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	0.022936	0.000277	0.000015	0.000074
	2	0.000033	0.003746	0.005956	0.007217
	3	0.097619 *	1.000000 *	0.645939 *	0.267304 *
	4	0.000013	0.000007	0.000027	0.000004

Tablo 25. P_{33} parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar)

p değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	0.030333	0.000023	0.000029	0.001497
	2	0.000001	0.004784	0.008068	0.000532
	3	0.204576 *	0.645939 *	1.000000 *	0.328335 *
	4	0.000006	0.000001	0.000009	0.000000

Tablo 26. P_{34} parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar)

p değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	0.004999	0.000121	0.000001	0.000168
	2	0.000210	0.011948	0.001854	0.002591
	3	0.180200 *	0.267304 *	0.328335 *	1.000000 *
	4	0.000060	0.000005	0.000015	0.000002

Tablo 27. P_{41} parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar)

p değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	0.000995	0.001339	0.000131	0.000431
	2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	3	0.000000	0.000013	0.000006	0.000060
	4	1.000000 *	0.289497 *	0.043800	0.157859 *

Tablo 28. P_{42} parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar)

p değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	0.025885	0.094494 *	0.059469 *	0.065054 *
	2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	3	0.000000	0.000007	0.000001	0.000005
	4	0.289497 *	1.000000 *	0.935529 *	0.972315 *

Tablo 29. P_{43} parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar)

p değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	0.018337	0.021856	0.010421	0.012049
	2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	3	0.000000	0.000027	0.000009	0.000015
	4	0.043800	0.935529 *	1.000000 *	0.984727 *

Tablo 30. P_{44} parçası ile diğer parçaların iki popülasyon Kolmogorov-Smirnov Test Sonuçları (*: 0.05 anlamlılık düzeyini sağlayanlar)

p değerleri		j			
		1	2	3	4
i	1	0.025789	0.029748	0.014663	0.016845
	2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	3	0.000000	0.000004	0.000000	0.000002
	4	0.157859 *	0.972315 *	0.984727 *	1.000000 *

2.2.5. Gerçek Numunelerden Boşluk Oranının Belirlenmesi

Model çalışmalarındaki en son ve en önemli parametrelerden biri hava boşluk oranının belirlenmesidir. Bu işlem için gerçek numune kesitindeki hava boşluklarının tüm kesite oranı temel alınmaktadır. Ancak kesitlerdeki hava boşlukları incelenirken hava boşluklarının agregaların bulunduğu konumlarda olmadığı görülmektedir. Bu ise boşluk dağılımının olumsuz yönde etkilenmesine neden olmaktadır. Farklı dağılımlara sahip agregalar karıştırılarak elde edilmiş bir numunede agregaların düzenli dağılması beklenemez. Bu nedenle agrega dışında kalan çimento hamuru içerisindeki hava boşluğunun çimento hamuruna olan oranı incelenirse, boşluk dağılımı daha doğru bir şekilde bulunabilir. Bu amaçla öncelikle numune kesitindeki agregalar belirlenir (Şekil 30). Şekil 30'daki kesitte agregalar beyaz gözek ile gösterilirken diğer bileşenler siyah olarak gösterilmektedir. Bu görüntüde agregaya ait beyaz gözelerin sayısı,

$$N_a = \sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^H \begin{cases} 1, & b_a(x, y) = \text{beyaz} \\ 0, & b_a(x, y) = \text{siyah} \end{cases} \quad (27)$$

biçiminde bulunur. Burada $b_a(x, y)$, x ve y konumunda bulunan agregaya ait ikil görüntünün gözek değeridir. Tüm görüntünün gözek sayısı ise görüntünün genişliği (W) ile yüksekliğinin (H) çarpımına eşittir. Öte yandan Şekil 31'deki numune içerisinde bulunan yarıçapları $2mm$ 'den küçük hava boşluklarının gözek cinsinden sayısı ise,

$$N_b = \sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^H \begin{cases} 1 & b_b(x, y) = \text{beyaz} \\ 0 & b_b(x, y) = \text{siyah} \end{cases} \quad (28)$$

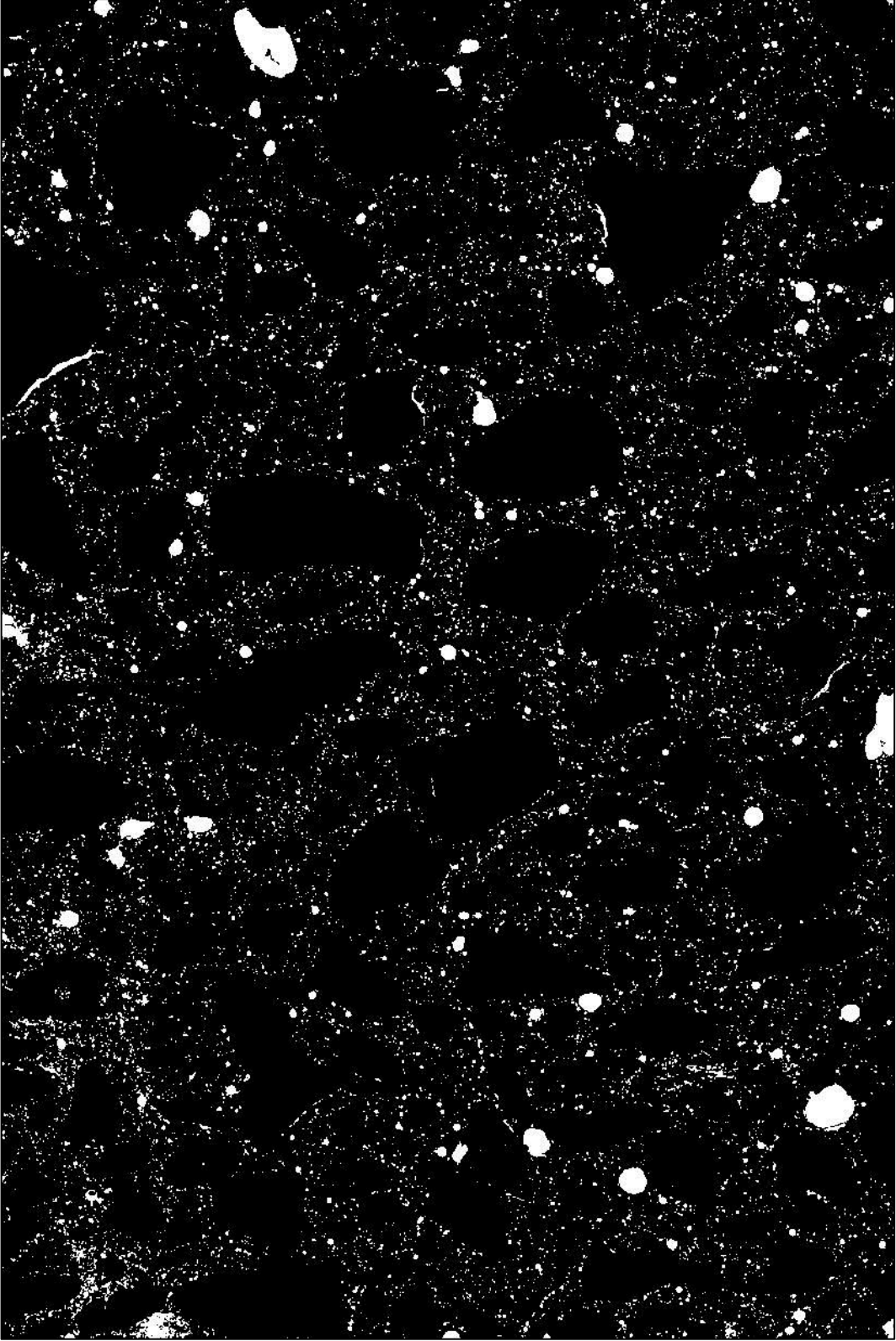
biçiminde bulunur. Burada $b_b(x, y)$, x ve y konumunda bulunan hava boşluğuna ait ikil görüntünün gözek değeridir. Böylece N_a ve N_b değerleri kullanılarak hava boşluğunun çimento hamuruna olan oranı,

$$\rho = \frac{N_b}{W \cdot H - N_a} \quad (29)$$

biçiminde bir eşitlikle bulunabilir. Bununla birlikte, gerçek numune kesitinden elde edilen boşluk oranı $\rho = 0.071$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 30. Numune kesitindeki agregaların belirlenmesi



Şekil 31. Numune kesitindeki hava boşluklarının belirlenmesi

2.2.6. Yapay Beton Numune Modelinin Oluşturulması

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi genel anlamda beton, çimento hamuru, değişik boyutlarda agrega ve küresel olarak kabul edilen değişik çaplardaki hava boşluklarından oluşmaktadır.

İlk olarak numunenin boyutları belirlenir. Gerçek uygulamada numuneler ($150mm \times 150mm \times 150mm$) boyutlarında bir küp biçiminde verilebildiği gibi, çapı $150mm$ ve yüksekliği $150mm$ olan bir silindir biçiminde de verilebilmektedir. Sertleşmiş beton numunelerin orta kısmından ($150mm \times 100mm \times 40mm$) boyutlarında bir numune kesilerek analizler yapılır.

Bu çalışmada ise, boyutları ($156mm \times 104mm \times 10mm$) olan yapay numuneler oluşturulmuştur. Burada hava boşluk yarıçapının $2mm$ 'den küçük olduğu düşünülürse kalın bir derinlik seçilmesine gerek yoktur.

Hava boşluğu yarıçapı,

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\log_e(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (30)$$

biçiminde tanımlanan log-normal dağılıma sahip olduğu önceki bölümlerde belirtilmiştir. Bu fonksiyonun birikimli dağılım fonksiyonu kullanılarak rastgele sayı oluşturulabilir. Diğer bir yaklaşım ise, ortalaması (μ) ve standart sapması (σ) olan normal dağılımdan elde edilecek bir $X \sim N(\mu, \sigma)$ rastgele sayısının (31) eşitliği yardımıyla log-normal dağılıma sahip bir rastgele sayıya dönüştürülmesidir.

$$r = e^X \quad (31)$$

Böylelikle log-normal dağılımdan istenen rastgele sayılar elde edilebilir. Bu çalışmada ise, log-normal dağılımdan oluşturulan rastgele sayıların μ ve σ parametreleri Bölüm 2.2.3'te gerçek kesitten elde edilen parametreler olarak belirlenmiştir.

Öte yandan gerçek numune, hazırlanan beton blok ortadan kesilerek elde edildiğinden sınırlardaki agregalar ve boşluklar da kesilecektir. Aynı durumu modelle oluşturmak için alttan, üstten, sağdan ve soldan en az $2mm$ 'lik bir fazlalık bırakılması düşünülmüştür.

Yapay numune kalınlığı 10mm 'ye indirgenmesi diğer boyutların da indirgenmesini gerektirir. Bu nedenle model boyutları $156 \times 104 \times 10$ olarak seçilmiştir. Oluşturulan modelin ortasından bir kesit alınmıştır. Daha sonra kesitin üstten ve alttan 3mm , soldan ve sağdan 2mm kırılarak gerçek numune boyutlarına benzer bir model kesiti oluşturulmuştur.

Yapay model oluşturulurken hesap kolaylığı açısından modelin içerisine öncelikle hava boşlukları yerleştirilip daha sonra agregaların yerleştirilmesi uygun görülmüştür. Modelin içerisine konulacak olan boşlukların sayısını belirlemek için ise gerçek modelden elde edilen boşluk oranı yardımıyla belirlenmiştir. Bu işlem için tüm modelin hacmi,

$$v_0 = 156 \times 104 \times 10 = 162240 \quad (32)$$

biçiminde gözeysel bir hacim değeri olarak elde edilir. Boşluk hacmi ise,

$$v_0 \cdot \rho = \frac{4\pi}{3} \sum_{i=1}^N r_i^3 \quad (33)$$

biçiminde verilmektedir. Bu eşitlikte değerler yerine konulduğunda,

$$\frac{3(162240 \cdot 0.071)}{4\pi} = \sum_{i=1}^N r_i^3 \quad (34)$$

biçiminde bir eşitlik elde edilir. Buradaki r_i log-normal dağılımdan bir rastgele sayıdır. Ancak burada boşluk sayısının bulunabilmesi için bilinmeyen N 'nin kesitilmesi gerekir. İşlemin analitik zorluğundan dolayı simülasyon yardımıyla N sayısının bulunabilmesi için,

$$f(N) = \frac{3(162240 \cdot 0.071)}{4\pi} - \sum_{i=1}^N r_i^3 = 0 \quad (35)$$

biçiminde doğrusal olmayan bir probleme dönüştürülmüştür. Burada $f(N)$ 'i sıfır yapan N değerini bulmak için ikiye yarılama yöntemi kullanılmıştır. İşlem sonucunda,

$$N = 3,887,000 \quad (36)$$

olarak bulunmuştur.

Boyutları belirlenmiş modelin içerisine öncelikle yarıçapları önceden rastgele belirlenmiş boşlukların yerleştirilmesi planlanmıştır. Yerleştirme işleminde her boşluğun merkez koordinatı (X_i, Y_i, Z_i) ,

$$X \sim U(0,104)$$

$$Y \sim U(0,10)$$

$$Z \sim U(0,156)$$

biçiminde düzgün dağılımdan rastgele seçilmektedir. Ancak boşluklar birer küre olarak kabul edildiğinden bu boşlukların birbirini kesmemeleri istenmektedir. Bu işlemi gerçekleştirmek için yerleştirilecek her yeni boşluk önceden yerleştirilmiş tüm boşluklar ile aşağıdaki eşitsizlik yardımıyla karşılaştırılmıştır.

Eğer,

$$\sqrt{(X - X_j)^2 + (Y - Y_j)^2 + (Z - Z_j)^2} > r_i + r_j, \quad \begin{pmatrix} i = 1,2, \dots, N; \\ j = 1,2, \dots, i \end{pmatrix} \quad (37)$$

ise,

$$(X_i, Y_i, Z_i) = (X, Y, Z) \quad (38)$$

olarak atanır ve i indisini bir artırarak bir sonraki boşluğu yerleştirilir. Değilse (X, Y, Z) rastgele değişkenlerini yeniden oluşturulur ve işleme devam edilir. Tüm işlem adımları Algoritma 1'de verilmiştir.

Algoritma 1. Yapay beton numunelerinin oluşturulması

Adım 1. Beton numune boyutlarını $(156 \times 104 \times 10)$ belirle,

Adım 2. Numune içerisine yerleştirilecek hava boşluk sayısını $(N = 3,887,000)$ belirle,

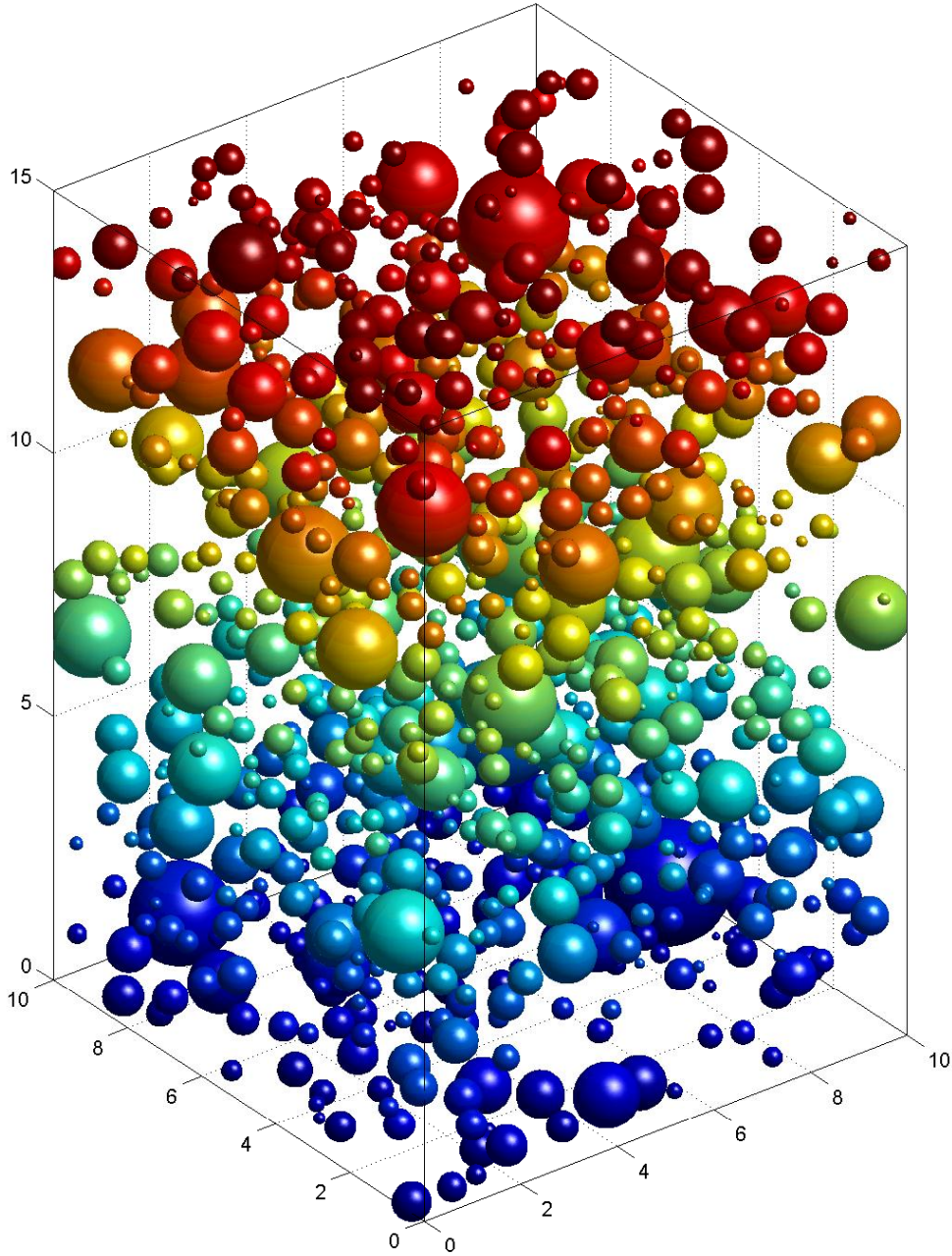
Adım 3. Hava boşluğunun yarıçaplarının log-normal dağılım parametrelerini $(\mu = -3.30652, \sigma = 0.769518)$ belirle,

Adım 4. Log-normal dağılımdan rastgele seçilmiş yarıçaplarda hava boşlukları oluştur,

Adım 5. Yarıçapları azalan sırada sırala,

Adım 6. Küresel hava boşluklarının merkez noktasını numune içinde kalacak şekilde ve daha önce oluşturulmuş hava boşluklarını kesmeyecek şekilde yerleştir,

Adım 7. Değişik dağılımlara sahip agregaları kesiti çokgen ve derinliği 10mm'lik bir prizma olacak şekilde tasarla ve merkezleri numune içerisinde olacak şekilde yerleştir.



Şekil 32. Üç boyutlu yapay hava boşlukları modelinin grafiksel örnek gösterimi

Model içerisine hava boşlukları yerleştirilirken yapılan karşılaştırma işlemi hesaplama zamanının üstel olarak artmasına neden olmaktadır. Boşluk sayısının yüksek bir değer olması durumunda hesaplama zamanının sonsuza gitmesine neden olmaktadır. Bu sorunu çözmek için bu çalışmada, model düşeyde ve yatayda 13 eşit aralığa bölünerek toplam 169 parça model oluşturulmuştur. Her parça model için yarıçapları aynı dağılıma sahip,

$$N_{ij} = \frac{3,887,000}{169} = 23,000 \quad (39)$$

tane boşluk oluşturulmuştur. Ancak bir parçadaki herhangi bir boşluk merkezi o parçanın içerisinde olmasına rağmen diğer bir parçanın sınırları içerisine geçebilir. Bu durumda oraya başka bir boşluğun yerleştirilmemesi gerekir. Bunu sağlamak ve işlem hızını artırmak için boşluk yerleştirme işlemi dört aşamada gerçekleştirilmiştir.

Algoritma 2. Hava boşluklarının hızlı yerleştirilmesi

- Adım 1. Birbirine temas etmeyen 169 parça kendi içerisinde karşılaştırma yapılarak boşluklar yerleştirilir (Şekil 32). Bu işlemde her parça için yerleştirilen boşluklar 12×8 boyutlarında bir alanda karşılaştırma yapılarak yerleştirilir. Alan olarak $12 \times 8 = 96mm^2$ 'lik bir bölgede yerleştirme yapılmaktadır.
- Adım 2. Şekil 33'te görüldüğü gibi en az oranda köşelerde $2mm$ genişliğinde bir çerçeve içinde yerleştirme işlemi yapılır. Burada 12×8 boyutlarında bir alana yerleştirme yapılırken 16×12 boyutlarında bir alanda karşılaştırma yapılır. Bu karşılaştırmada her parçayı çerçeveleyen üst, alt, sağ ve sol kısımlardaki alanlarda herhangi bir veri bulunmadığından karşılaştırma en düşük düzeyde tutulmaktadır. Alan olarak,
- $$12 \times 8 + 2 \times 2 + 2 \times 2 + 2 \times 2 + 2 \times 2 = 112 mm^2 \text{ 'lik bir bölgede}$$
- karşılaştırma yapılmaktadır.
- Adım 3. Şekil 34'te, Şekil 33'te boş kalan parçalar arasından köşeleri boş olacak şekilde birer satır atlamalı olarak seçilen parçalar içerisine boşluklar yerleştirilir. Burada 12×8 boyutlarında bir alana yerleştirme yapılırken karşılaştırma işlemi $16 \times 12mm^2$ 'lik bir alanda gerçekleşmektedir. Alan olarak,

$12 \times 8 + 12 \times 2 + 12 \times 2 + 8 \times 2 + 8 \times 2 = 176mm^2$ 'lik bir bölgede karşılaştırma yapılmıştır.

Adım 4. Şekil 35'te tüm boş parçalar doldurulmaktadır. Her parçadaki doldurma alanı 12×8 boyutlarında olmasına rağmen karşılaştırma alanı $16 \times 12 = 192mm^2$ 'dir.

Tüm boşlukları yerleştirilen model Şekil 36'da verilmiştir. Model içerisine yerleştirilecek yapay agregaların oluşturulması için geliştirilen algoritma ise Algoritma 3'te verilmiştir.

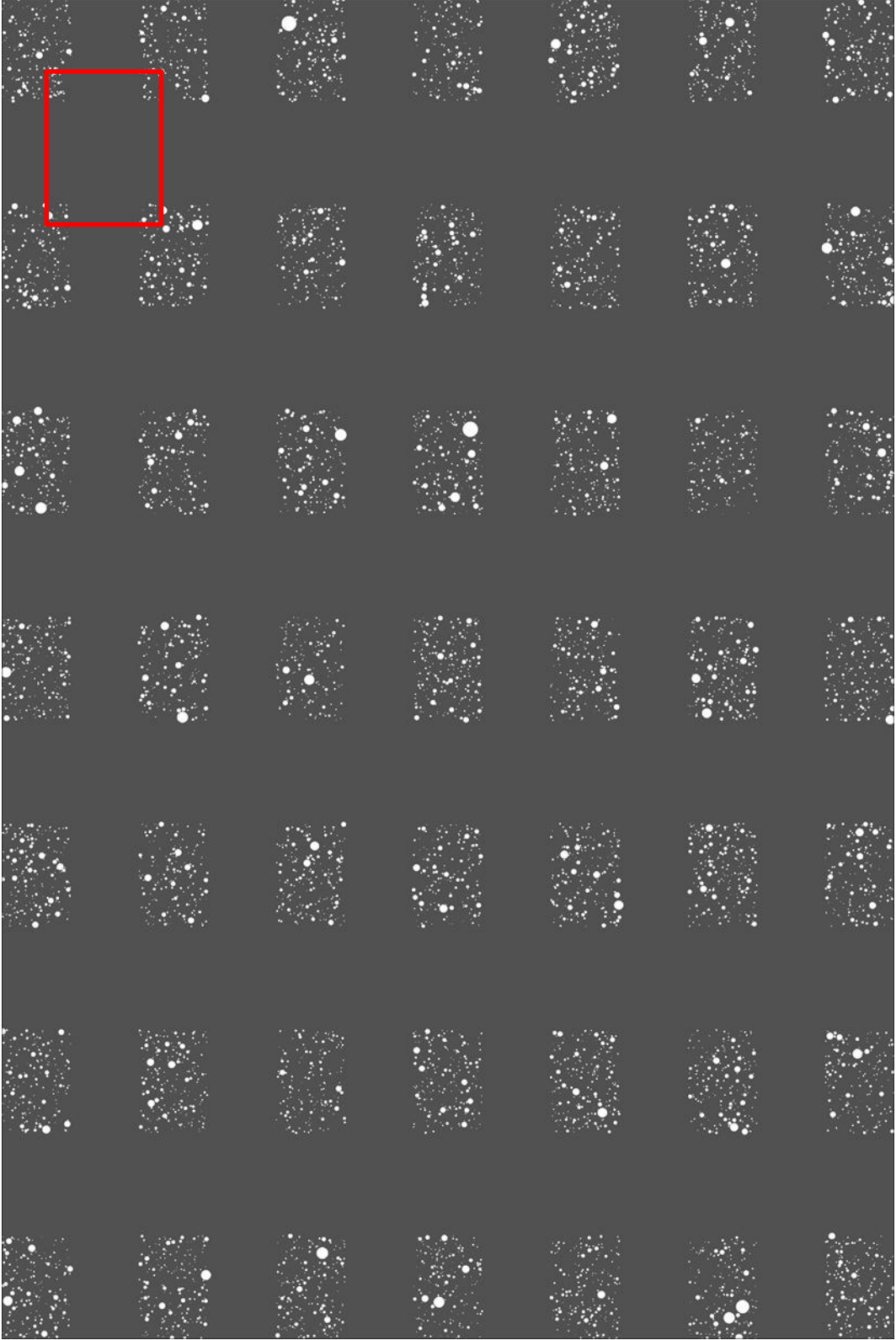
Algoritma 3. Agregaların oluşturulması

- Adım 1. Yarıçapları $N(\mu = 6mm, \sigma = 1mm)$ parametrelerine sahip normal dağılımdan rastgele 30 tane; yarıçapları $N(\mu = 4mm, \sigma = 1mm)$ parametrelerine sahip normal dağılımdan rastgele 70 tane; yarıçapları $N(\mu = 2mm, \sigma = 1mm)$ parametrelerine sahip normal dağılımdan rastgele 200 tane olmak üzere toplam 300 tane agrega modeli seçilir.
- Adım 2. Seçilen her agreganın yarıçapına göre, köşe noktalarının sayısı, bir çember üzerinde $[7,12]$ aralığında düzgün dağılımdan rastgele belirlenir. Bu sayı kadar $[0,2\pi)$ aralığında düzgün dağılımdan rastgele açılar seçilir ve bu açılar küçükten büyüğe doğru sıralanır. Böylece açılarının gösterdikleri köşe noktalarına göre agregaların sınırları da belirlenmiş olur.
- Adım 3. Merkez noktası iki boyutlu model içerisinde önceden oluşturulmuş agregalar birbirini kesmeyecek şekilde yerleştirilir.
-

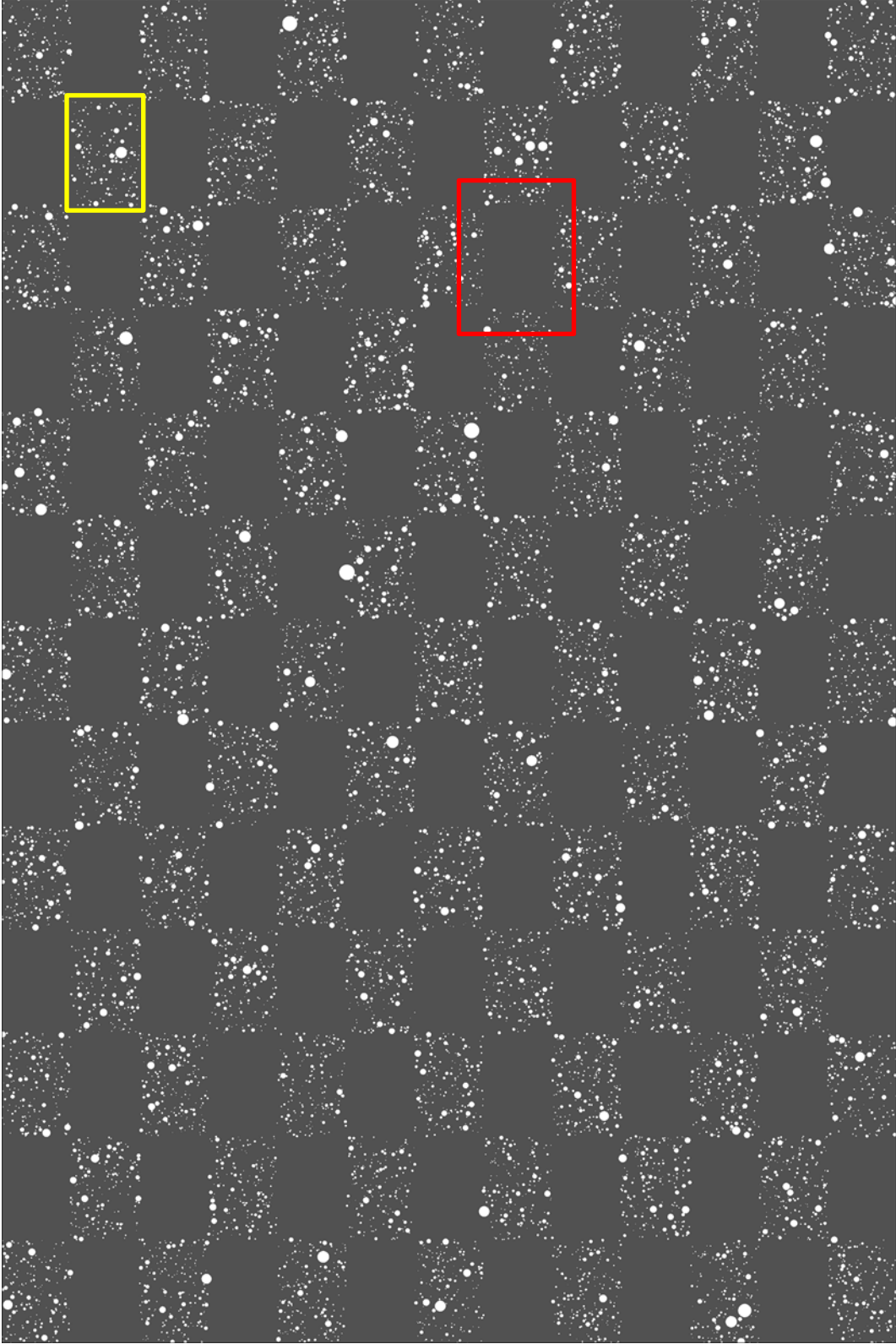
Modele hava boşlukları yerleştirildikten sonra modele değişik çaplarda agregaları yerleştirilmesi gerekir. Agregalar düşey kesiti çokgen, derinlik boyutu prizma olacak şekilde yerleştirilir. Aynı zamanda yapay agregaların birbirini kesmeyecek şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir (Şekil 37). Agregalar yerleştirilirken kapladıkları hacmin içindeki tüm hava boşlukları modelden silinir (Şekil 39). Agregalı ve hava boşluklu model soldan ve sağdan $2mm$ ve üstten ve alttan $3mm$ olacak şekilde kırılır (Şekil 40). Sınırdaki kalan hava boşluklarının kesik küre modelinden yararlanarak hacimleri hesaplanır.

Bununla birlikte kesiti alınan bir modelde kesilmiş kürelerin kesilen dairelerinin alanları da hesaplanmaktadır.

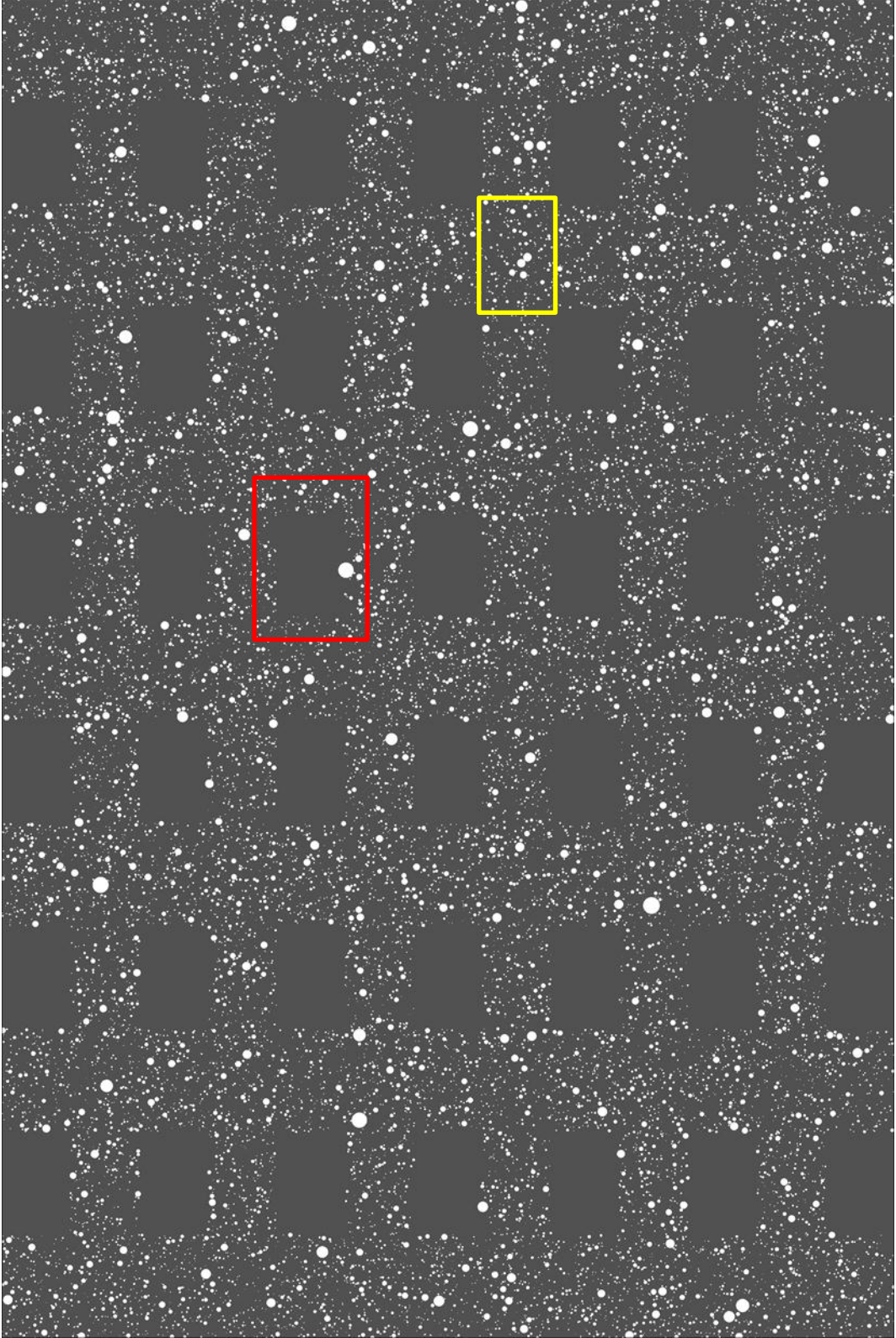
Algoritma 1 ile oluşturulacak bir modelin hesaplama zamanı sonsuza gideceği kestirilmiştir. Ancak Algoritma 2 ile oluşturulan bir modelin hesaplama zamanı ortalama 92.5 dakika sürmektedir. Bu nedenle model içerisine hava boşlukları yerleştirilirken Algoritma 2’de verilen algoritmaya göre yerleştirme işlemi yapılmıştır.



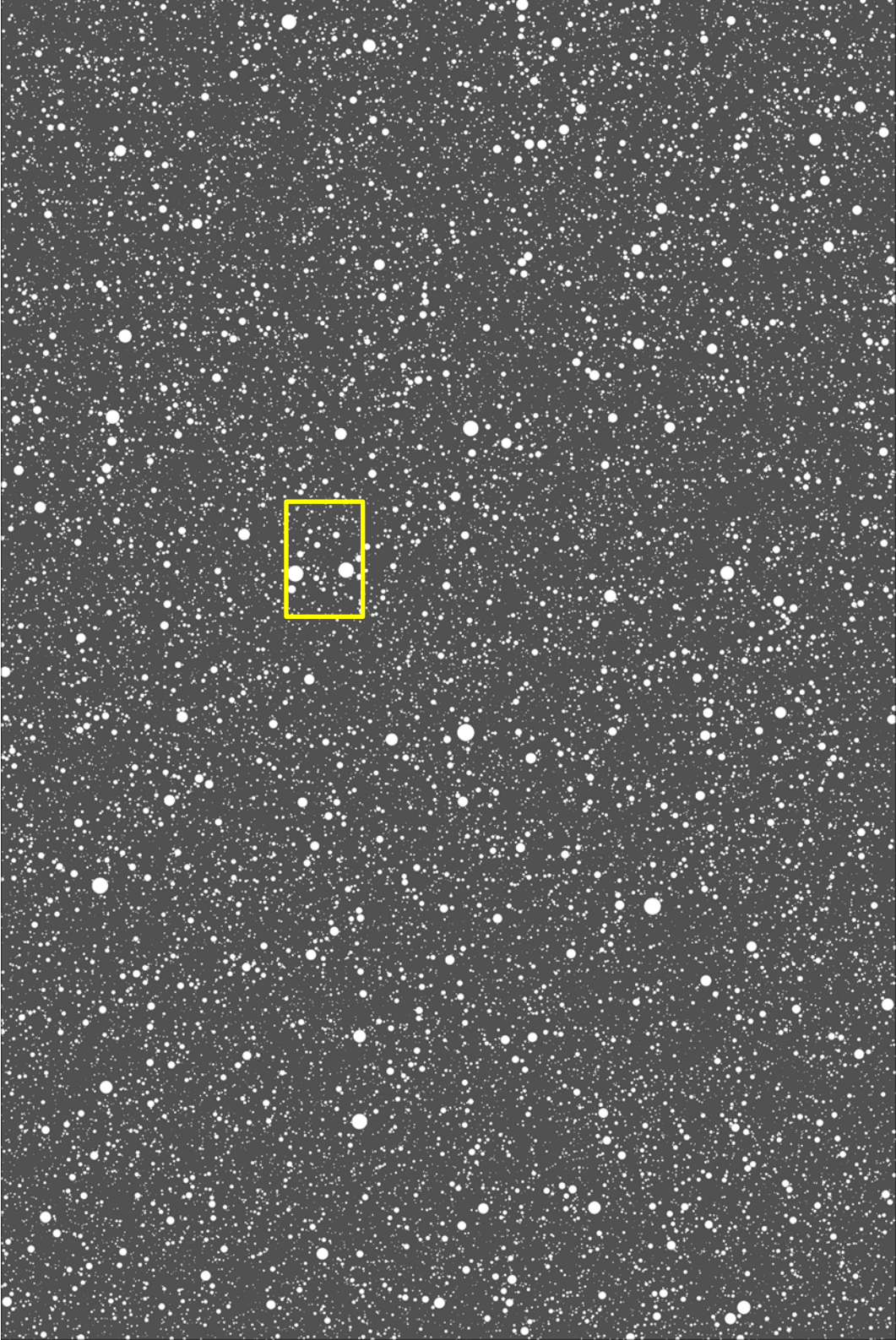
Şekil 33. Birinci aşamada hava boşlukların yerleştirilmesi



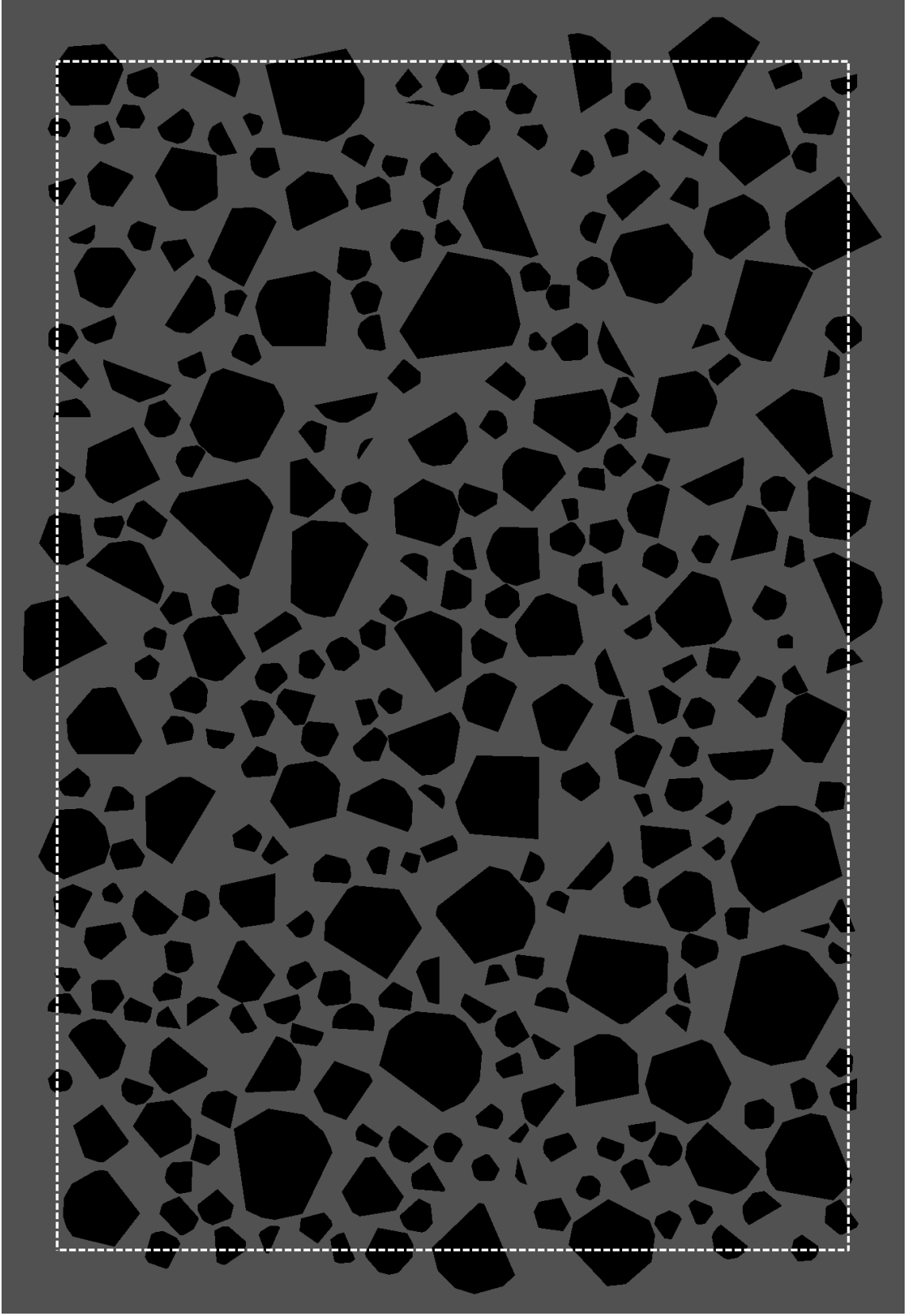
Şekil 34. İkinci aşamada hava boşluklarının yerleştirilmesi, önceki adımda seçilen kısmın doldurulması



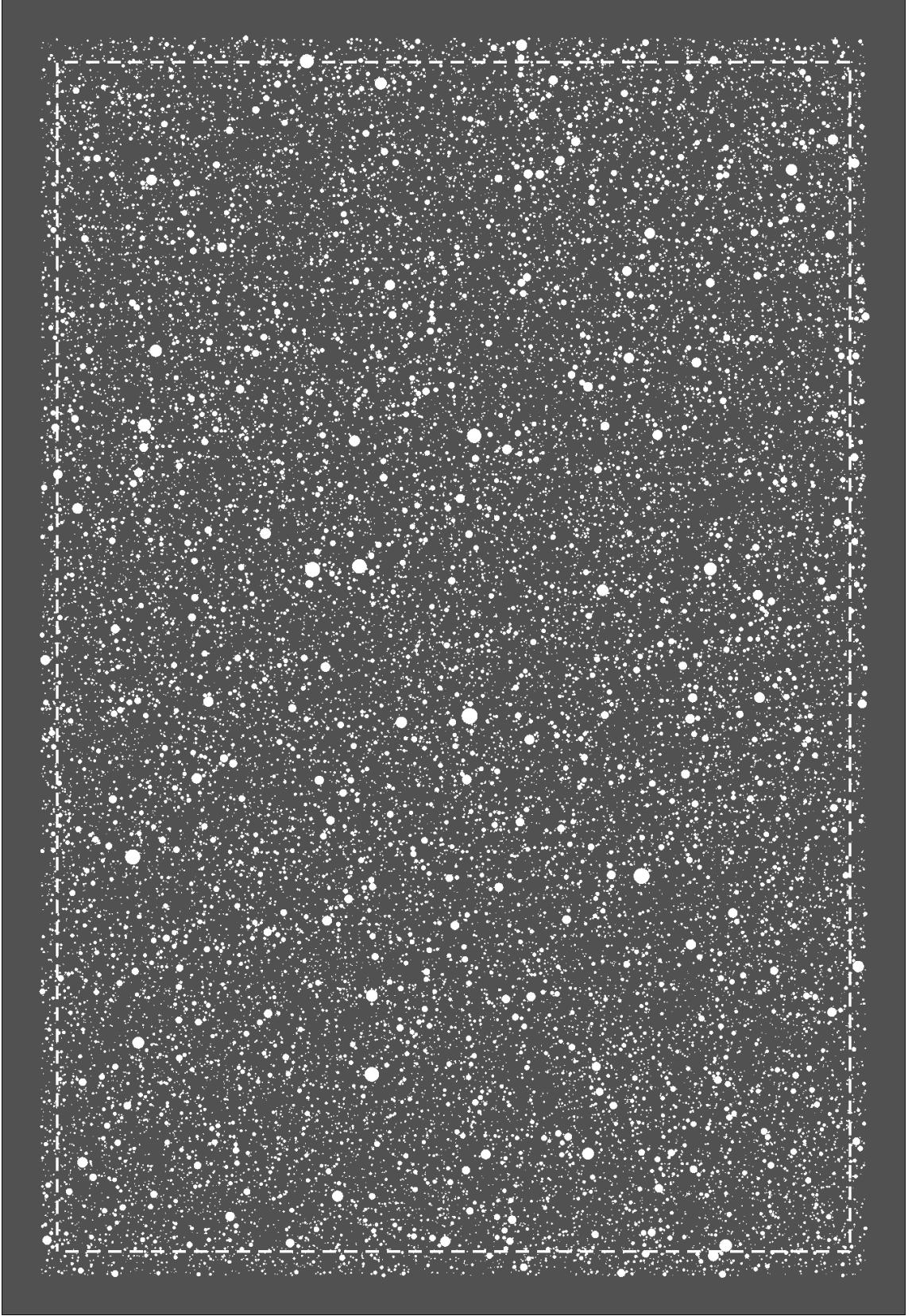
Şekil 35. Üçüncü aşamada hava boşluklarının yerleştirilmesi, önceki adımda seçilen kısmın doldurulması



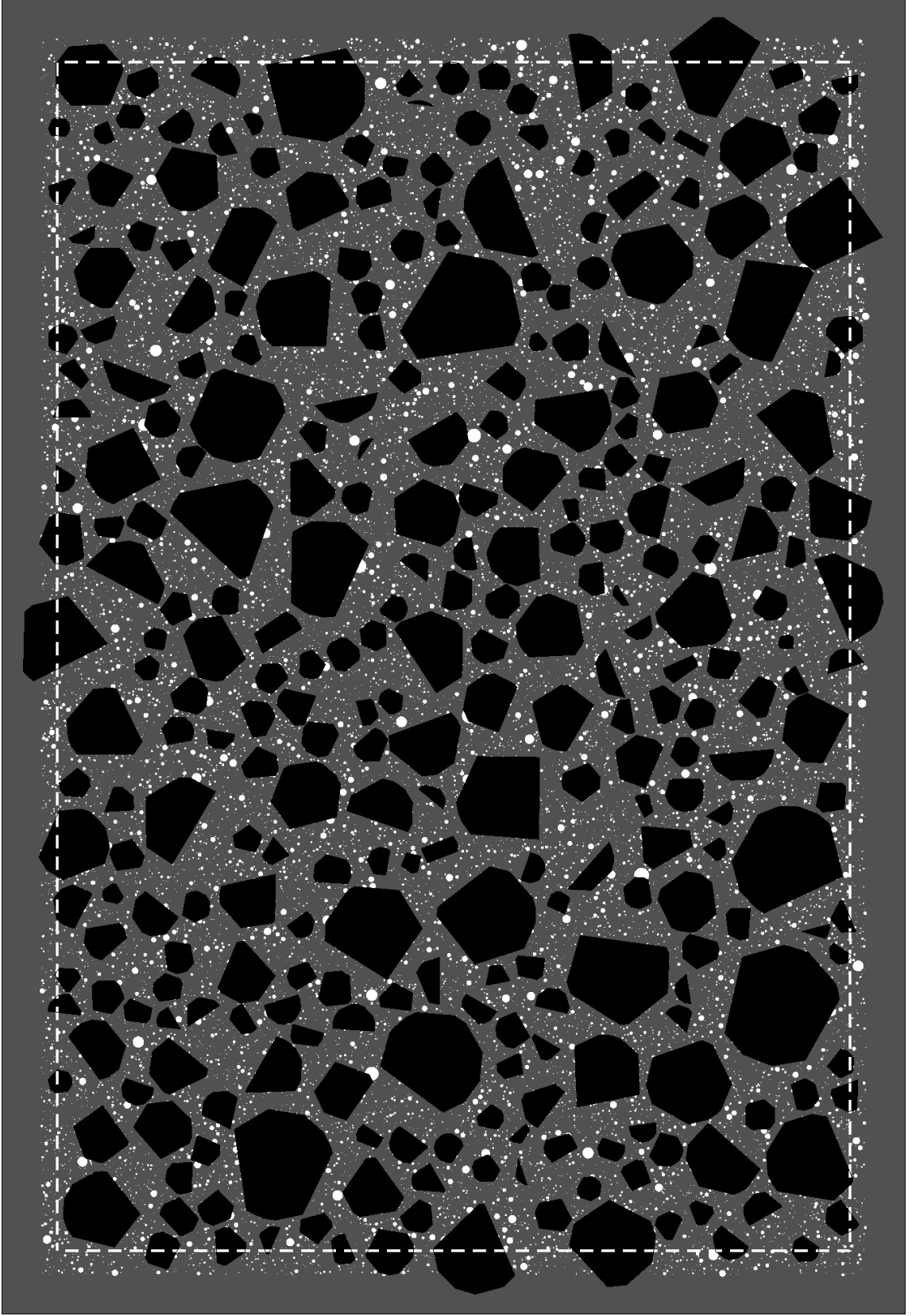
Şekil 36. Dördüncü aşamada hava boşluklarının yerleştirilmesi, önceki adımda seçilen kısmın doldurulması



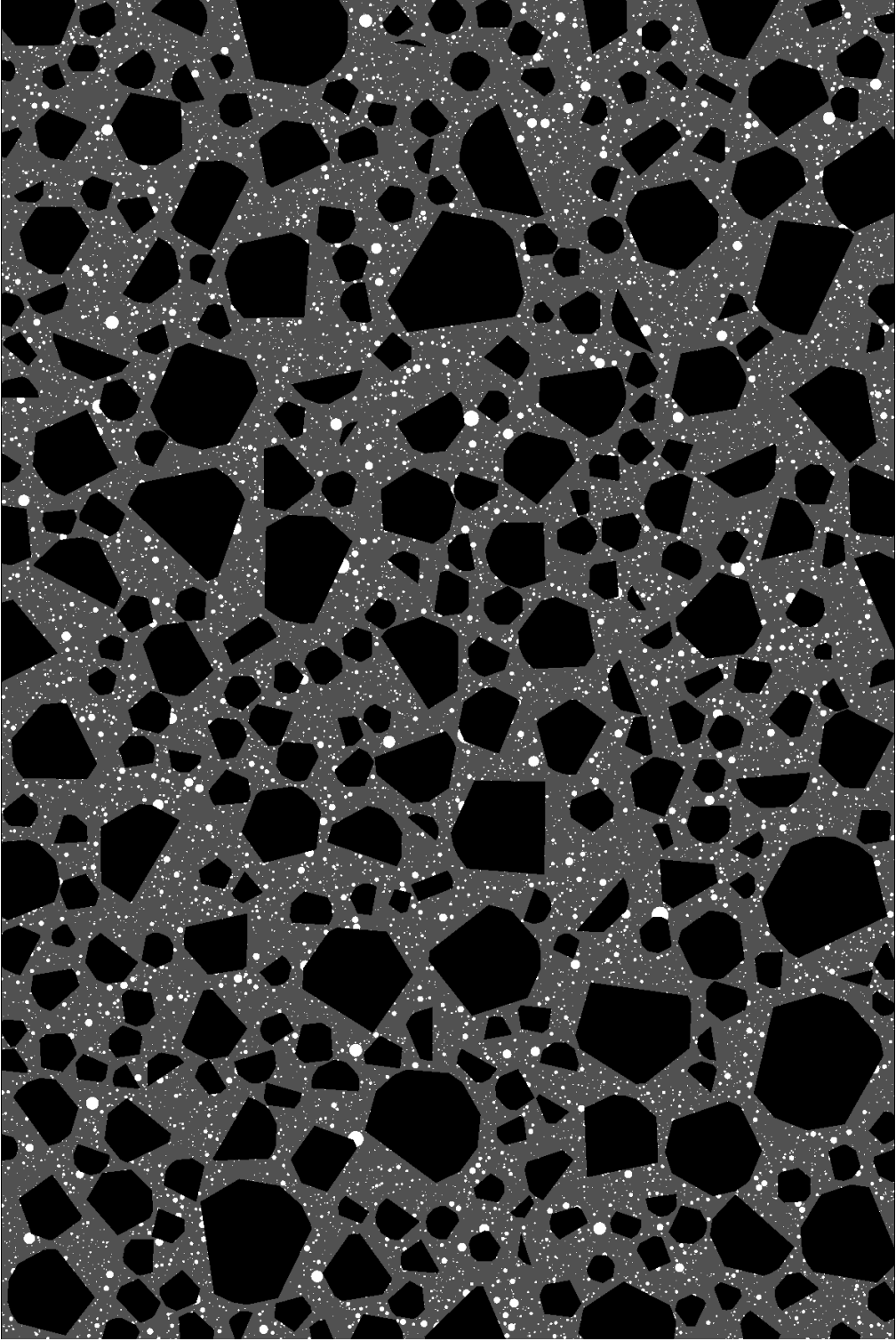
Şekil 37. Yapay agrega modellerinin oluşturulması



Şekil 38. Hava boşlukları modelinin kesitinin kırılma sınırları



Şekil 39. Modele agregaların yerleştirilmesi



Şekil 40. Agregalı modelin kenarlarından kırılması

2.3. Yapay Model Analizi

Yapay modelleme ile $150 \times 100 \times 10$ boyutlarında oluşturulan 100 adet yapay numune örneğinin gerçek hava boşluk oranları bulunmuştur ve bu hava boşlukları belirli sınıflara ayrılmıştır. Her sınıf için ortalama hava boşluk oranları ve birikimli hava boşluk oranları Tablo 31’de verilmiştir. Ayrıca her modelin gerçek birikimli hava boşluk oranları, ölçüm doğruları yöntemi ile önerilen yöntemin başarımını ölçmek için uygulanacak testlerde karşılaştırma amaçlı olarak kullanılacaktır.

Tablo 31. Üç boyutlu 100 yapay model ortalama boşluk oranları ve bu oranların birikimli değerleri

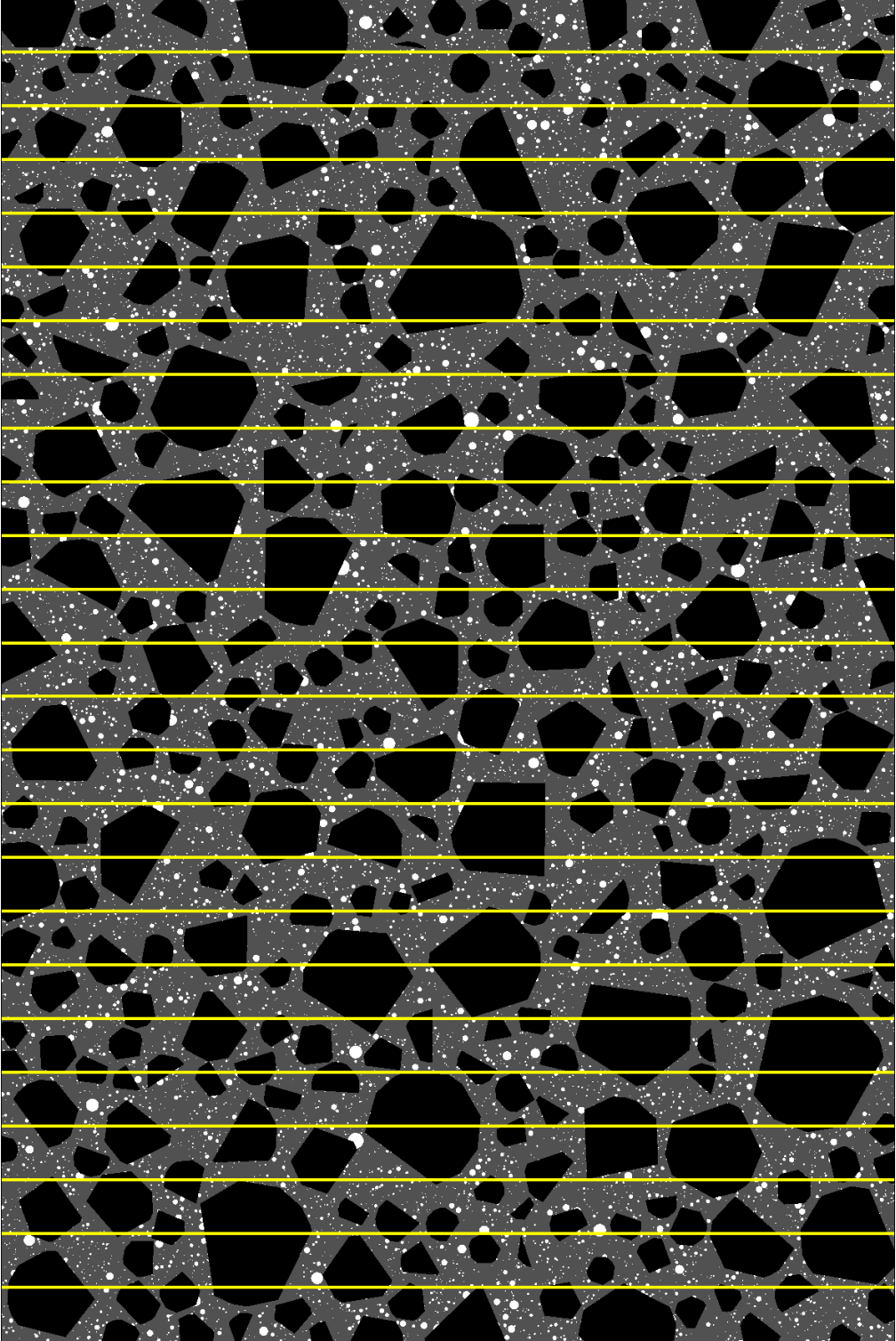
Sınıfın Alt Sınırı	Sınıfın Üst Sınırı	Boşluk Oranları	Birikimli Boşluk Oranları
0.0	12.5	0.0000	0.0000
12.5	22.5	0.0000	0.0000
22.5	32.5	0.0000	0.0000
32.5	42.5	0.0000	0.0001
42.5	52.5	0.0001	0.0001
52.5	62.5	0.0001	0.0003
62.5	82.5	0.0005	0.0007
82.5	102.5	0.0007	0.0014
102.5	122.5	0.0009	0.0024
122.5	142.5	0.0011	0.0034
142.5	162.5	0.0012	0.0046
162.5	182.5	0.0013	0.0059
182.5	202.5	0.0013	0.0073
202.5	222.5	0.0014	0.0086
222.5	242.5	0.0014	0.0100
242.5	262.5	0.0013	0.0113
262.5	282.5	0.0013	0.0126
282.5	302.5	0.0013	0.0139
302.5	352.5	0.0030	0.0169
352.5	402.5	0.0026	0.0195
402.5	452.5	0.0023	0.0218
452.5	502.5	0.0020	0.0238
502.5	1002.5	0.0096	0.0334
1002.5	1502.5	0.0023	0.0357
1502.5	2002.5	0.0006	0.0363
2002.5	2502.5	0.0002	0.0365
2502.5	3002.5	0.0001	0.0366
3002.5	4000.0	0.0000	0.0366

2.3.1. Ölçüm Doğrusu Yöntemine Göre Analiz

ASTM C457 ve EN 480-11 standartlarında belirtilen yöntemine göre, boşluk oranları numune üzerinde değişik konumlarda geçirilen 12 doğrultu boyunca, boşlukları kesen giriş uzunlukları istatistikler yöntemlerle analiz edilerek hesaplanır. Bu çalışmada, yapay model y eksenine göre ortadan ($y = 5$) kesilerek elde edilen kesit sayısal görüntüye dönüştürülüp incelenmektedir. Bu incelemede kesit içerisindeki beyaz renkli hava boşluklarının giriş uzunlukları hesaplanmaktadır. Öte yandan örneklem hacmini artırmak için yapay olarak oluşturulan numune kesitlerinin üzerine düşey yönde $6mm$ 'den başlayıp $6mm$ aralıklarla $144mm$ 'ye kadar yatay yönde 24 tane doğrultu geçirilmiştir (Şekil 41). Böylelikle hesaplamadaki doğruluk oranının artırılması amaçlanmıştır. Oluşturulan yapay kesitlerin ölçüm doğrusu yöntemine göre analizi sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 32'de verilmiştir.

Tablo 32. Üç boyutlu 100 yapay modelin y eksenine göre ortadan kesit görüntüsünden elde edilen ölçüm doğrusu boyunca kesilen kırıtlara göre ortalama boşluk oranları ve bu oranların birikimli değerleri

Sınıfın Alt Sınırı	Sınıfın Üst Sınırı	Boşluk Oranları	Birikimli Boşluk Oranları
0.0	12.5	0.0004	0.0004
12.5	22.5	0.0000	0.0004
22.5	32.5	0.0173	0.0177
32.5	42.5	0.0000	0.0177
42.5	52.5	0.1353	0.1530
52.5	62.5	0.0000	0.1530
62.5	82.5	0.0583	0.2113
82.5	102.5	0.0514	0.2627
102.5	122.5	0.1051	0.3678
122.5	142.5	0.1289	0.4967
142.5	162.5	0.1280	0.6247
162.5	182.5	0.1525	0.7773
182.5	202.5	0.1022	0.8795
202.5	222.5	0.2464	1.1259
222.5	242.5	0.1687	1.2946
242.5	262.5	0.1325	1.4271
262.5	282.5	0.2198	1.6468
282.5	302.5	0.1527	1.7996
302.5	352.5	0.5021	2.3016
352.5	402.5	0.0926	2.3942
402.5	452.5	0.4246	2.8188
452.5	502.5	0.2799	3.0987
502.5	1002.5	0.8734	3.9721
1002.5	1502.5	0.2278	4.2000
1502.5	2002.5	0.0553	4.2553
2002.5	2502.5	0.0234	4.2787
2502.5	3002.5	0.0025	4.2812
3002.5	4000.0	0.0000	4.2812



Şekil 41. Modele ölçüm doğrularının eklenmesi

2.3.2. Önerilen Yönteme Göre Analiz

Önerilen yöntemin temel yaklaşımı, toplam hava boşluklarının tüm hacme oranı ile kesitteki tüm nesnelerin daire alanlarının tüm kesit alanı oranına eşit olmasıdır. Matematiksel olarak yaklaşım,

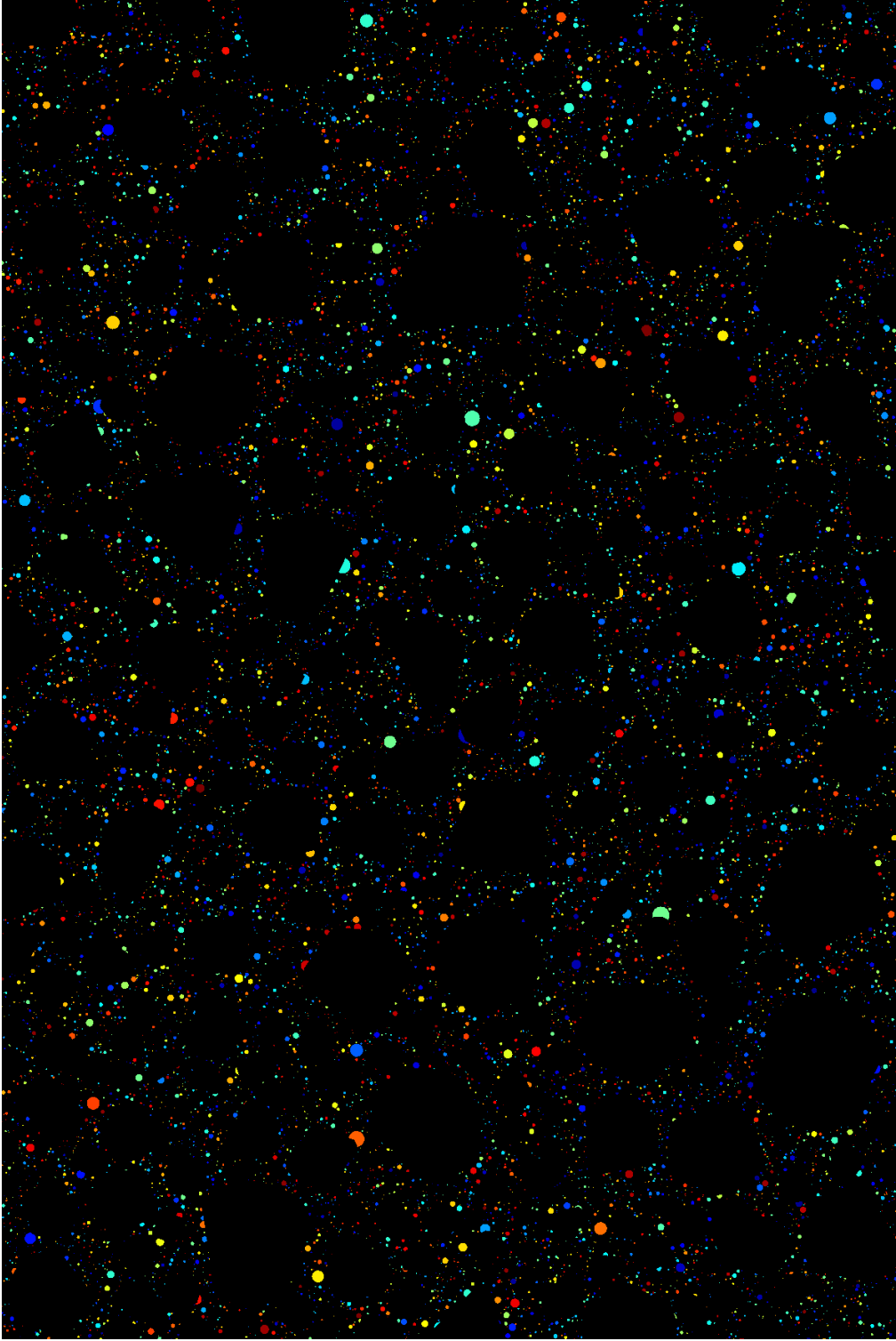
$$\frac{V_a}{V_t} = \frac{A_c}{A_s} \quad (40)$$

biçiminde gösterilmektedir. Burada V_a toplam boşluk hacmi; V_t numunenin toplam hacmi; A_c nesnelerin toplam alanı; A_s ise kesitin toplam alanını göstermektedir.

Bu yöntemde yapay modellerin y eksenine göre ortadan ($y = 5$) kesiti alınarak elde edilen görüntü sayısal görüntüye dönüştürülür. Bu dönüştürme işleminde her bir gözeğin $10\mu m$ 'ye karşılık gelmesi için 100 kat büyütülerek kayıt edilmektedir. Dolayısıyla $150mm \times 100mm$ boyutlarındaki bir kesit 15000×10000 'lik bir sayısal görüntüye dönüşmektedir. Daha sonra sayısal görüntüler eşiklenerek ikil tabanlı bir görüntü elde edilir (Şekil 42). Bu görüntüdeki bir biriyle bağlantısı olmayan her beyaz bölge birer nesne veya hava boşluğu olarak ifade edilmektedir. Bu nesneler görüntü işleme teknikleri yardımıyla etiketlenerek her biri işaretlenmektedir. Bu işaretlemenin açık bir görüntüsünü ortaya koymak için nesneler farklı renklerle renklendirilmiştir (Şekil 43).



Şekil 42. Modeldeki boşluk dağılımı



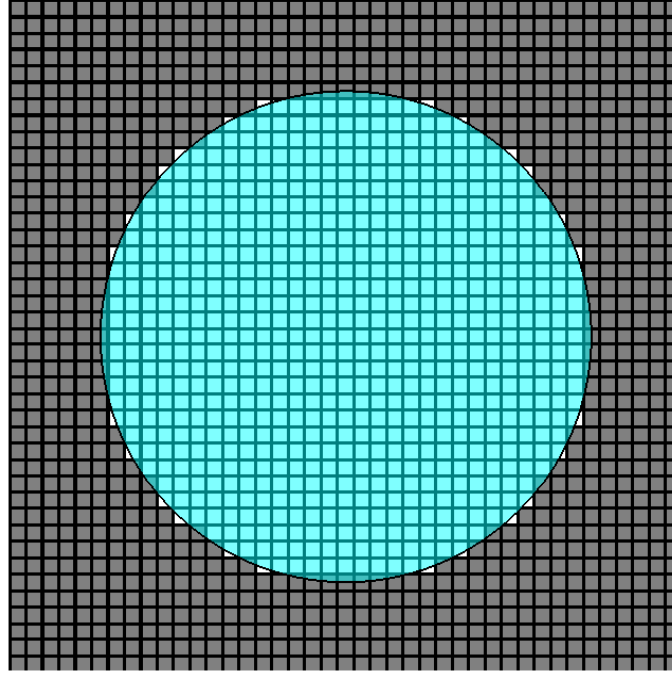
Şekil 43. İkiz görüntüdeki nesnelerin etiketlenmesi ve renklendirilmesi

2.3.2.1. Sayısallaştırma Hatasının Düzeltilmesi

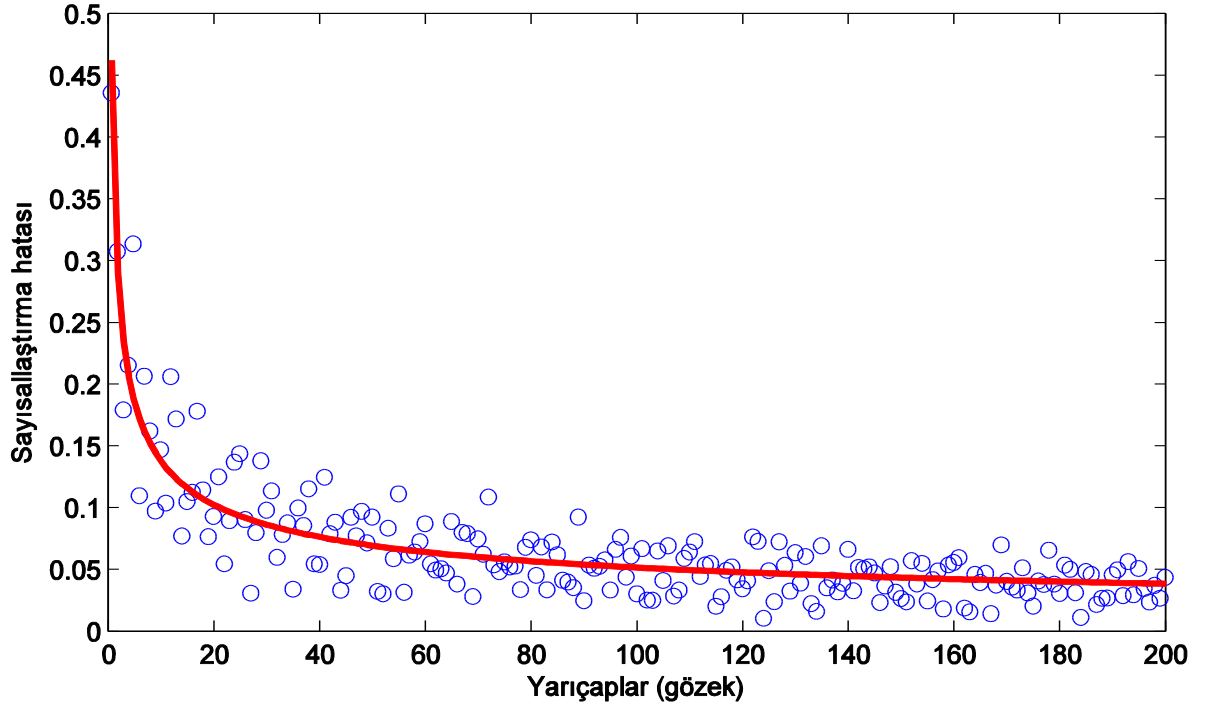
Görüntüdeki etiketlenmiş her nesnenin toplam gözek sayısı o nesnenin alanını vermektedir. Bu alan (19) eşitliği yardımıyla hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu alanların bir daire olduğu varsayımı altında (21) eşitliği yardımıyla her nesnenin yarıçapı hesaplanır. Bu yarıçaplar gerçek yarıçaplardan farklı olmaktadır. Bunun en önemli nedenlerinden biri gerçek hava boşluklarının dairesel gösteriminin sürekli bir uzayda olmasına rağmen gözeysel gösterimin ayrık bir uzayda gerçekleşmesidir. Bunu iyi bir şekilde açıklamak için Şekil 44'te sürekli uzaydaki bir daire ile ayrık uzaydaki bir dairenin karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 44'te de görülen gözeysel alan ile gerçek alan arasındaki farkın düzeltilmesi gerekir. Yapılan kabullere göre yarıçapların en küçüğü 1, en büyüğü 200 gözek olacak şekilde tam sayılardan oluşmaktadır. Bu durumda sürekli dairenin yarıçapı (r_s) ile ayrık (gözeysel) dairenin yarıçapı (r_a) arasındaki ilişkiyi araştırmak için,

$$r_s - r_a = c r_a^m \quad (41)$$

biçiminde bir model oluşturulmuştur. Bu model Şekil 45'te grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 44. Gözet tabanlı bir görüntüde gerçek daire ile işaretlenen gözleklerin alanları arasındaki farklılıkların gösterimi



Şekil 45. Sürekli dairenin yarıçapları ile ayırık dairenin yarıçapları arasındaki farkın eğri uydurması

Modelin parametreleri araştırıldığında,

$$\begin{aligned} c &= 0.3629 \\ m &= -0.4223 \end{aligned} \quad (42)$$

olarak bulunmuştur. Bu parametrelere göre yarıçaplara uygulanacak düzeltme faktörü,

$$r_s = r_a + 0.3629 r_a^{-0.4223} \quad (43)$$

biçiminde belirlenmiştir.

2.3.2.2. Dağılımsal Örneklem Hatasının Düzeltilmesi

Bir diğer düzeltme ise hacimsel birikimli oranlar ile alansal birikimli oranlar arasındaki farkın giderilmesidir. Birikimli oranlar arasında son sınıfta bir farklılık

olmamasına rağmen ara sınıflarda alansal oranda bir fazlalık olmaktadır. Bu fazlalığı gidermek için iki oran arasında bir düzeltmeye ihtiyaç vardır.

Yapay bir modelin üç boyutlu boşluk oranları, tüm hacimsel model içerisinde hesaplanarak çaplara göre sınıflandırılmaktadır. Benzer şekilde kesitten elde edilen alansal boşluk oranları da daire çaplarına göre sınıflandırılır. Bu durumda kesitteki r_1 yarıçaplı bir boşluk modeldeki r_2 yarıçaplı bir küreye denk gelebilir. Yani kesitteki boşluklar kendinden daha büyük bir küreyi ifade edebilir. Dolayısıyla kesitteki çapı $4mm$ 'den küçük tüm daireler hacimsel modeldeki tüm boşlukları kapsamaktadır. Oysa $0.3mm$ 'den küçük olan çaplardaki oran değerleri modeldeki tüm küreleri kapsamaktadır. Dolayısıyla kesitten elde edilen boşluk oranı ile modelden elde edilen hacimsel oran aynı olmamaktadır. Bu sorun, kesitten elde edilen boşluk oranının bir düzeltme faktörü ile çarpılmasıyla çözülebilir. Bu çarpan,

$$\beta_x = 1 - (1 - \text{LogNormalCDF}(x, \mu, \sigma))^{\frac{1}{2}} \quad (44)$$

biçiminde belirlenmiştir. Bu çarpana göre (40) eşitliği yeniden düzenlenirse, sınıfın üst çap sınırının R 'ye göre birikimli oran eşitliği,

$$\frac{V_a(R)}{V_t} = \beta_r \frac{A_c(R)}{A_s} \quad (45)$$

biçiminde verilmektedir.

Kesitteki hava boşluk analizi için yapılan hesaplamalar sonucunda çap sınıflarına göre boşluk dağılımları Tablo 33'te verilmiştir.

Tablo 33. Sayısalştırma ve dağılımsal örnekleme hatalarının düzeltilmesi sonucu elde edilen boşluk oranları ve birikimli boşluk oranları

Sınıfın Alt Sınırı	Sınıfın Üst Sınırı	Boşluk Oranları	Yarıçapları Düzeltilmiş Boşlukların Oranları	Birikimli Boşluk Oranları	Dağılımı Düzeltilmiş Birikimli Boşluk Oranları
0.0	12.5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12.5	22.5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22.5	32.5	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000
32.5	42.5	0.0000	0.0002	0.0002	0.0000
42.5	52.5	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000
52.5	62.5	0.0005	0.0005	0.0008	0.0002
62.5	82.5	0.0007	0.0008	0.0016	0.0005
82.5	102.5	0.0010	0.0010	0.0027	0.0011
102.5	122.5	0.0012	0.0013	0.0040	0.0019
122.5	142.5	0.0013	0.0014	0.0054	0.0030
142.5	162.5	0.0014	0.0015	0.0069	0.0042
162.5	182.5	0.0015	0.0016	0.0084	0.0055
182.5	202.5	0.0015	0.0015	0.0100	0.0069
202.5	222.5	0.0015	0.0015	0.0115	0.0083
222.5	242.5	0.0014	0.0014	0.0129	0.0097
242.5	262.5	0.0014	0.0014	0.0143	0.0111
262.5	282.5	0.0013	0.0014	0.0157	0.0126
282.5	302.5	0.0013	0.0013	0.0170	0.0139
302.5	352.5	0.0023	0.0024	0.0193	0.0166
352.5	402.5	0.0030	0.0031	0.0224	0.0198
402.5	452.5	0.0017	0.0018	0.0242	0.0219
452.5	502.5	0.0022	0.0022	0.0263	0.0243
502.5	1002.5	0.0080	0.0080	0.0343	0.0337
1002.5	1502.5	0.0017	0.0017	0.0360	0.0358
1502.5	2002.5	0.0004	0.0004	0.0365	0.0364
2002.5	2502.5	0.0002	0.0002	0.0366	0.0366
2502.5	3002.5	0.0000	0.0000	0.0366	0.0366
3002.5	4000.0	0.0000	0.0000	0.0367	0.0366

2.3.3. Student-t Testi ile Değerlendirme

Ölçümler sonucunda elde edilen hacimsel modelin, alansal kesitin ve doğrultulu ölçümün hava boşluk oranları karşılaştırılarak aynı ortalama oran değerlerini verip vermedikleri test edilmiştir. Bu testler için mikro hava içeriği ($R \leq 300\mu m$) ve toplam

hava içeriğine ($R \leq 4000\mu m$) göre birikimli oranlara student-t testi uygulanmış ve sonuçları Tablo 34’te verilmiştir. Burada dört hipotez kurulmuştur ve bunlar,

H_0 : Mikro hava içeriği açısından ortalama hacimsel oran ile ortalama alansal oran arasında anlamlı bir fark yoktur.

H_0 : Mikro hava içeriği açısından ortalama hacimsel oran ile ortalama doğrultulu oran arasında anlamlı bir fark yoktur.

H_0 : Toplam hava içeriği açısından ortalama hacimsel oran ile ortalama alansal oran arasında anlamlı bir fark yoktur.

H_0 : Toplam hava içeriği açısından ortalama hacimsel oran ile ortalama doğrultulu oran arasında anlamlı bir fark yoktur.

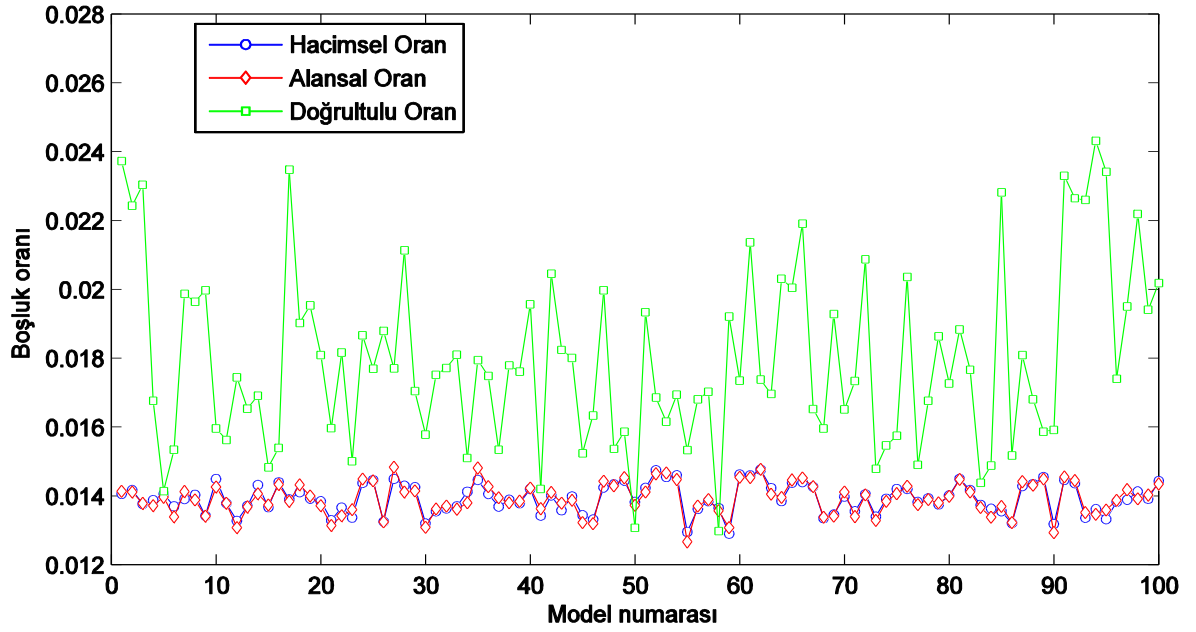
biçiminde ifade edilmektedir.

Tablo 34. Hesaplanan boşluk oranlarının student-t ile karşılaştırılması

p değerleri	$H_0: \bar{Q}_{hacimsel} = \bar{Q}_{alansal}$	$H_0: \bar{Q}_{hacimsel} = \bar{Q}_{dogrultulu}$
$R \leq 300\mu m$	0.4697	1.1947×10^{-28}
$R \leq 4000\mu m$	0.4993	9.5274×10^{-32}

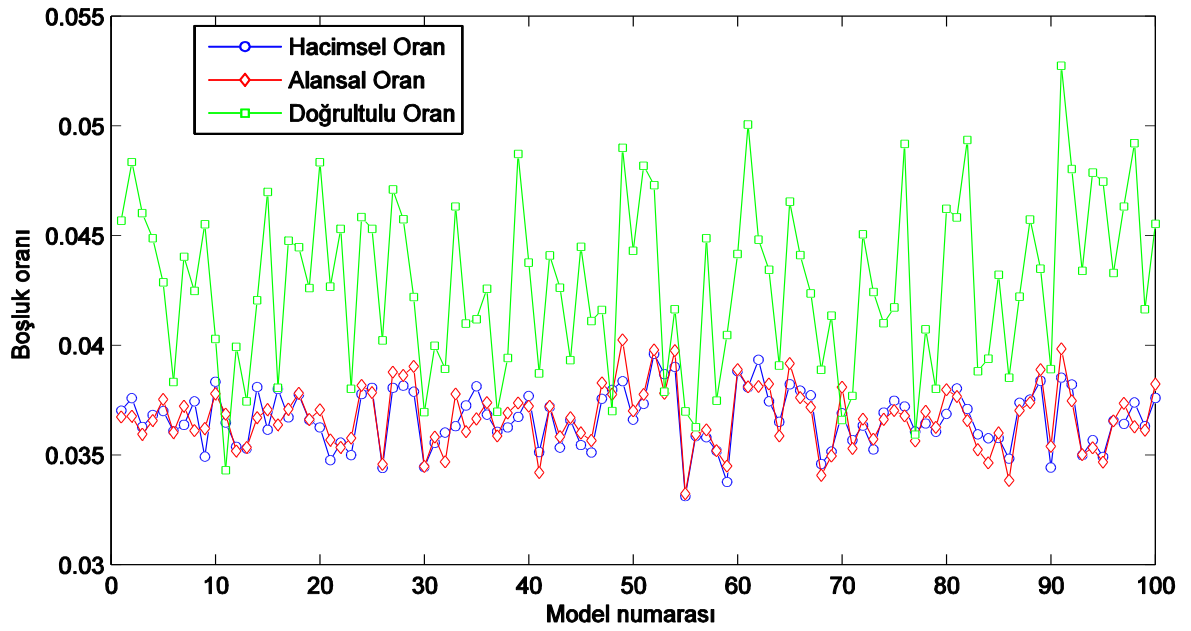
Tablo 34’te, $\bar{Q}_{hacimsel}$, $\bar{Q}_{alansal}$ ve $\bar{Q}_{dogrultulu}$ sırasıyla hacimsel oran, alansal oran ve doğrultulu orandan elde edilen ortalama birikimli boşluk oranlarını ifade etmektedir.

100 yapay model ile yapılan deney sonucunda elde edilen ortalama mikro hava içeriği Şekil 46’da verilmiştir. Mavi renkli çizgiler modelin hacimsel oranlarını, kırmızı renkli çizgiler alansal kesitin oranlarını, yeşil renkli olanlar ise doğrultulu ölçümler sonucunda elde edilen oranları göstermektedir.



Şekil 46. 100 model için mikro hava içeriği grafiksel karşılaştırılması

100 yapay model ile yapılan deneyde sonucunda elde edilen ortalama toplam hava içeriği Şekil 47’de verilmiştir. Mavi renkli çizgiler modelin hacimsel oranlarını, kırmızı renkli çizgiler alansal kesitin oranlarını, yeşil renkli olanlar ise doğrultulu ölçümler sonucunda elde edilen oranları göstermektedir.



Şekil 47. 100 model için toplam hava içeriği grafiksel karşılaştırılması

2.3.4. Doğrulama Yüzdesinin Hesaplanması

Yapay numune analizlerinin başarımının karşılaştırılması için doğrulama yüzdesi parametresi kullanılabilir. Ap_k ile ifade edilen doğrulama yüzdesi,

$$Ap_k = 100\% - \widehat{\Delta}_k \quad (46)$$

biçiminde hesaplanabilmektedir. Burada $\widehat{\Delta}_k$ göreceli hata olup aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\widehat{\Delta}_k = \frac{\Delta_k}{Beklenen_k} 100\% \quad (47)$$

Δ_k değeri ise aşağıdaki gibi hesaplanan mutlak hatayı ifade etmektedir.

$$\Delta_k = |Gözlenen_k - Beklenen_k| \quad (48)$$

Yapay olarak oluşturulan toplam 100 modelden 10 tanesinin ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen alansal yöntem ile analizi sonucunda elde edilen oranların mikro hava içeriği ve toplam hava içeriği açısından doğrulama yüzdeleri Tablo 35-38'de verilmiştir.

Her iki yöntemle göre 100 yapay modelin analizi sonucunda elde edilen doğrulama yüzdelerinin ortalamaları, standart sapmaları ve doğrulama yüzdesi %95'i geçen modellerin sayısı Tablo 39'da verilmiştir.

Tablo 35. Mikro hava içeriği açısından ölçüm doğrusu yöntemi ile elde edilen sonuçların doğrulama yüzdeleri

Yapay Model Numarası	Hacimsel Birikimli Boşluk Oranları	Doğrultulu Birikimli Boşluk Oranları	Mutlak Hata (Δ_k)	Göreceli Hata ($\hat{\Delta}_k(\%)$)	Doğrulama Yüzdesi (%)
1	0.0141	0.0237	0.0097	68.8080	31.1920
2	0.0142	0.0224	0.0083	58.3493	41.6507
3	0.0138	0.0230	0.0093	67.3629	32.6371
4	0.0139	0.0168	0.0029	20.8350	79.1650
5	0.0141	0.0141	0.0001	0.5888	99.4112
6	0.0137	0.0153	0.0016	11.9820	88.0180
7	0.0139	0.0199	0.0060	42.8757	57.1243
8	0.0140	0.0196	0.0056	39.9480	60.0520
9	0.0134	0.0200	0.0066	48.8776	51.1224
10	0.0145	0.0160	0.0015	10.1595	89.8405
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Tablo 36. Mikro hava içeriği açısından önerilen yöntem ile elde edilen sonuçların doğrulama yüzdeleri

Yapay Model Numarası	Hacimsel Birikimli Boşluk Oranları	Alansal Birikimli Boşluk Oranları	Mutlak Hata (Δ_k)	Göreceli Hata ($\hat{\Delta}_k(\%)$)	Doğrulama Yüzdesi (%)
1	0.0141	0.0141	0.0001	0.5128	99.4872
2	0.0142	0.0141	0.0001	0.3538	99.6462
3	0.0138	0.0138	0.0000	0.0992	99.9008
4	0.0139	0.0137	0.0002	1.1577	98.8423
5	0.0141	0.0140	0.0001	0.7046	99.2954
6	0.0137	0.0134	0.0003	2.2331	97.7669
7	0.0139	0.0141	0.0002	1.5741	98.4259
8	0.0140	0.0139	0.0002	1.0897	98.9103
9	0.0134	0.0134	0.0000	0.0931	99.9069
10	0.0145	0.0142	0.0002	1.6238	98.3762
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Tablo 37. Toplam hava içeriği açısından ölçüm doğrusu yöntemine göre elde edilen sonuçların doğrulama yüzdeleri

Yapay Model Numarası	Hacimsel Birikimli Boşluk Oranları	Doğrultulu Birikimli Boşluk Oranları	Mutlak Hata (Δ_k)	Göreceli Hata ($\hat{\Delta}_k(\%)$)	Doğrulama Yüzdesi (%)
1	0.0370	0.0457	0.0087	23.4044	76.5956
2	0.0376	0.0483	0.0108	28.6214	71.3786
3	0.0363	0.0460	0.0098	26.8848	73.1152
4	0.0368	0.0449	0.0080	21.8506	78.1494
5	0.0370	0.0429	0.0059	15.8397	84.1603
6	0.0361	0.0383	0.0022	6.2162	93.7838
7	0.0364	0.0440	0.0077	21.0584	78.9416
8	0.0374	0.0425	0.0050	13.4176	86.5824
9	0.0349	0.0455	0.0106	30.3769	69.6231
10	0.0383	0.0403	0.0019	5.0827	94.9173
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Tablo 38. Toplam hava içeriği açısından ölçüm doğrusu yöntemine göre elde edilen sonuçların doğrulama yüzdeleri

Yapay Model Numarası	Hacimsel Birikimli Boşluk Oranları	Alansal Birikimli Boşluk Oranları	Mutlak Hata (Δ_k)	Göreceli Hata ($\hat{\Delta}_k(\%)$)	Doğrulama Yüzdesi (%)
1	0.0370	0.0367	0.0003	0.7899	99.2101
2	0.0376	0.0368	0.0008	2.2168	97.7832
3	0.0363	0.0359	0.0003	0.9082	99.0918
4	0.0368	0.0366	0.0003	0.6806	99.3194
5	0.0370	0.0375	0.0005	1.4280	98.5720
6	0.0361	0.0360	0.0001	0.1730	99.8270
7	0.0364	0.0372	0.0009	2.3418	97.6582
8	0.0374	0.0361	0.0013	3.5731	96.4269
9	0.0349	0.0362	0.0013	3.6779	96.3221
10	0.0383	0.0378	0.0006	1.4460	98.5540
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Tablo 39. Ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yöntemle göre elde edilen sonuçların mikro hava içeriği ve toplam hava içeriği açısından doğrulama yüzdelerinin ortalamaları, standart sapmaları ve doğrulama yüzdesi %95'i geçen modellerin sayısı

	Ortalama		Standart Sapma		Model Sayısı (>%95)	
	Doğrultulu Oran	Alansal Oran	Doğrultulu Oran	Alansal Oran	Doğrultulu Oran	Alansal Oran
Mikro Hava İçeriği	70.7851	99.1280	18.2269	0.6136	3	100
Toplam Hava İçeriği	83.0387	98.4418	9.1747	1.1433	7	100

2.4. Gerçek Numune Çalışması

Bu bölümde gerçek beton numunelerindeki boşluk oranları hem ölçüm doğruları yöntemi hem de önerilen yöntem ile bulunmuştur.

2.4.1. Numune Üzerinde Yapılan İşlemler

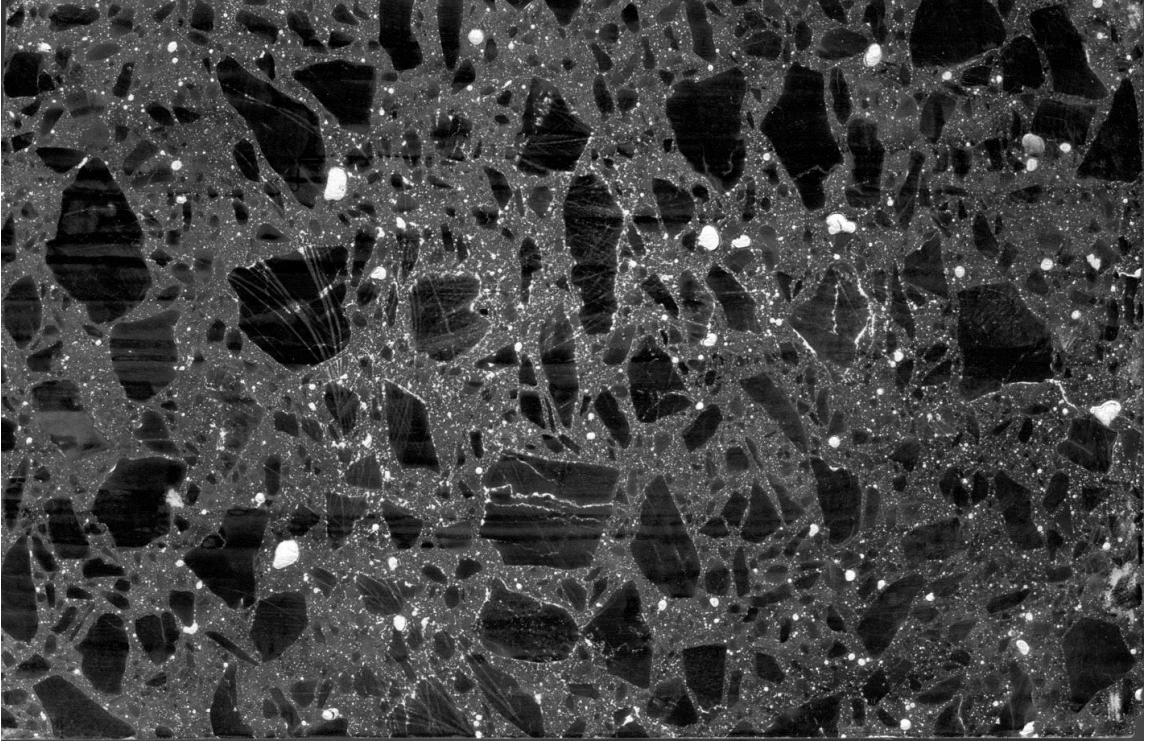
Dört tane gerçek beton numunesi yüzeyi çözünürlüğü 2400dpi olan bir tarayıcı yardımıyla taranarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Sayısal ortamdaki görüntüler çimento hamuru, agrega ve hava boşlukları olmak üzere üç fazdan oluşmaktadır. Bu sayısal görüntüler çoklu eşik değeri belirleme algoritmasıyla, her görüntü için iki tane eşik değeri belirlenmiştir. Görüntüdeki hava boşluklarını beyaz gözeteklerle ifade edebilmek için en büyük eşik değeri kullanılarak sayısal görüntüler eşikleme işlemine tabi tutulmuştur. Böylece Şekil 48-51'de verilen ikil görüntüler elde edilmiştir.

Elde edilen ikil görüntüler üzerine geçirilen ölçüm doğrularına karşılık gelen boşluklardaki kiriş uzunlukları hesaplanmıştır. Bu kiriş uzunlukları belirli sınıflara ayrılarak her sınıftaki birikimli boşluk oranları hesaplanmıştır.

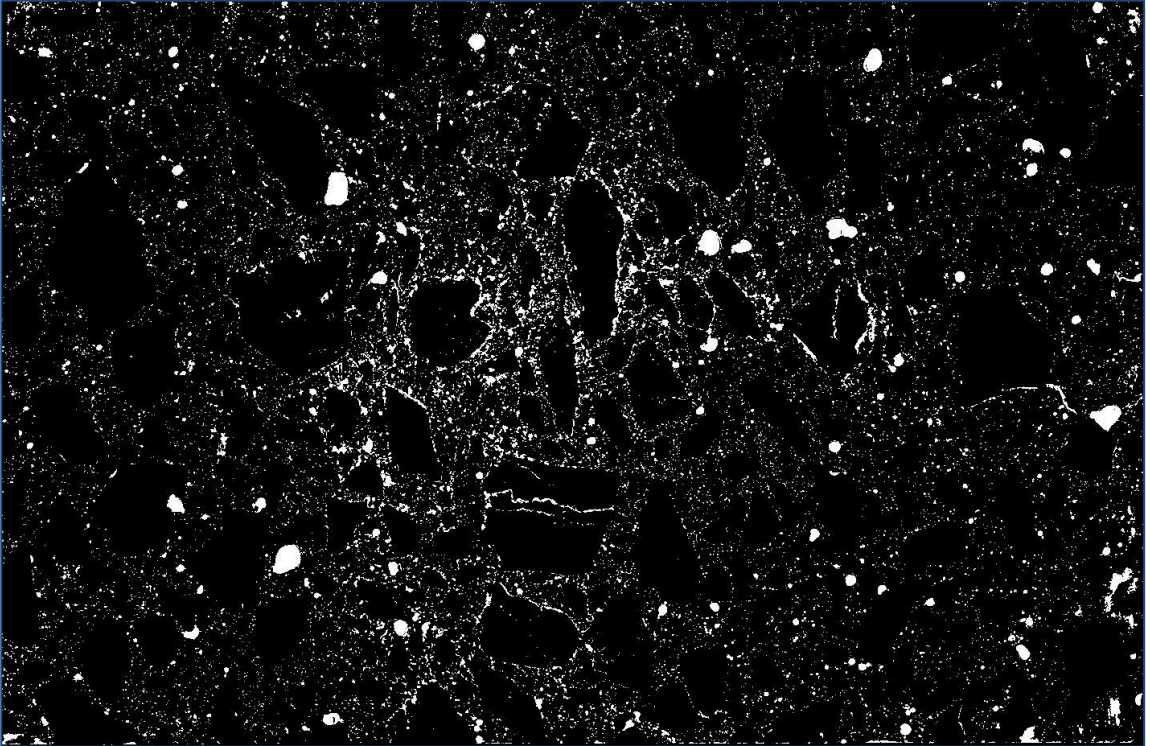
Önerilen yöntemle göre boşluk oranını hesaplamak için öncelikle ikil görüntü içerisindeki gürültülerin giderilmesi gerekmektedir. Bu amaçla ikil görüntüye bazı morfolojik işlemler uygulanmıştır. Gürültüleri giderilen ikil görüntülerdeki nesnelere yani hava boşlukları sıralı etiketleme algoritmasıyla tek tek belirlenmiştir. Her bir nesnenin

gözek sayısı o nesnenin alanını verdiğiinden, boşlukların yarıçapları bu alanlar yardımıyla hesaplanmıştır. Daha sonra sayısal ortama aktarılırken meydana gelen sayısallaştırma hataları ve dağılımsal örnekleme hataları düzeltilmiştir. Düzeltme işlemleri tamamlandıktan sonra boşluk çapları ölçüm doğrusu yönteminde olduğu gibi belirli sınıflara ayrılarak numunelerdeki birikimli boşluk oranları hesaplanmıştır.

Her iki yönteme göre hesaplanan birikimli boşluk oranları Tablo 40-43'te verilmiştir.



(a)



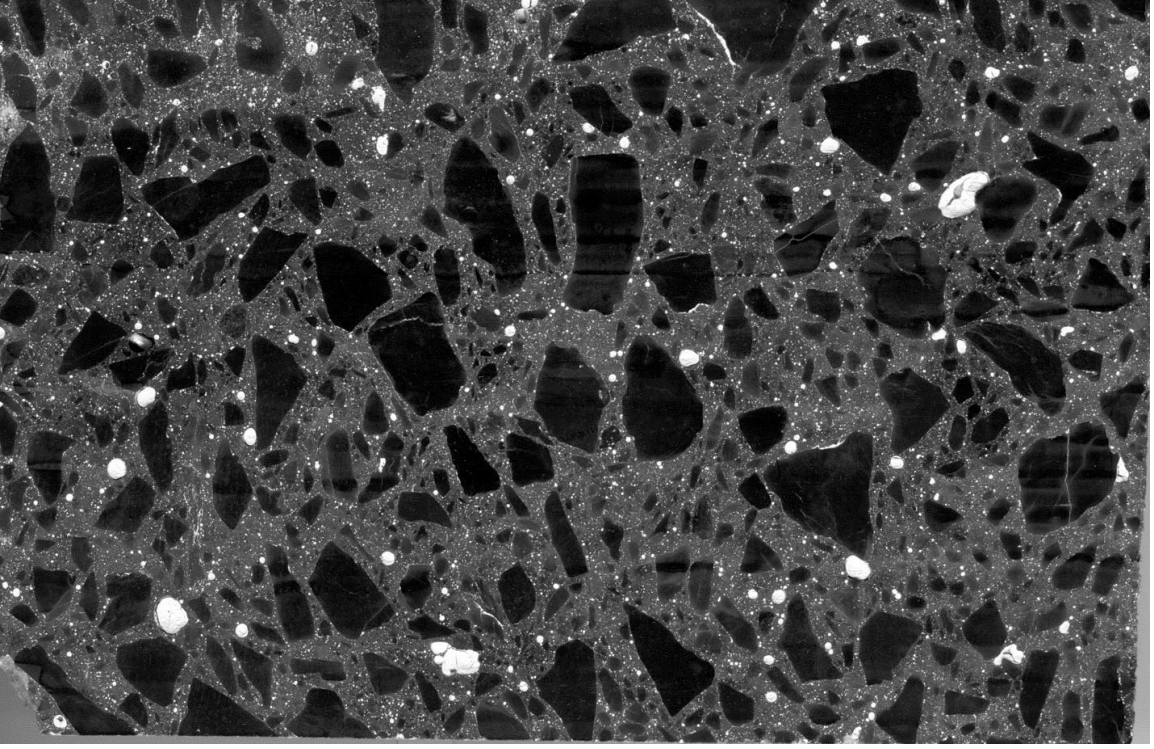
(b)

Şekil 48. Numune 1, (a) Taranmış gerçek beton numune kesiti; (b) Eşikleme işlemi uygulanmış gerçek beton numune kesiti

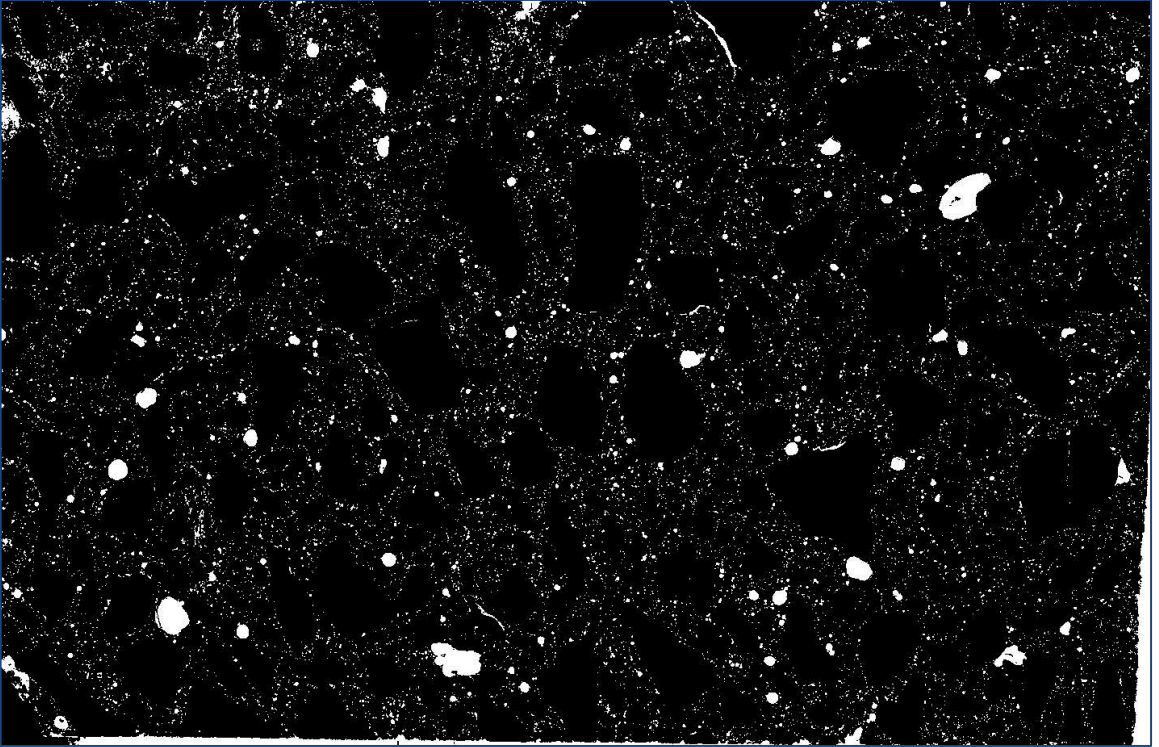
Tablo 40. Numune 1 için ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yönteme göre elde edilen birikimli boşluk oranları

Sınıfın Alt Sınırı	Sınıfın Üst Sınırı	Alansal Birikimli Boşluk Oranları	Doğrultulu Birikimli Boşluk Oranları
0.0	12.5	0.0000	0.0000
12.5	22.5	0.0000	0.0001
22.5	32.5	0.0000	0.0004
32.5	42.5	0.0001	0.0006
42.5	52.5	0.0003	0.0010
52.5	62.5	0.0006	0.0026
62.5	82.5	0.0018	0.0052
82.5	102.5	0.0038	0.0091
102.5	122.5	0.0063	0.0124
122.5	142.5	0.0092	0.0135
142.5	162.5	0.0123	0.0164
162.5	182.5	0.0154	0.0215
182.5	202.5	0.0183	0.0249
202.5	222.5	0.0211	0.0249
222.5	242.5	0.0236	0.0310
242.5	262.5	0.0261	0.0310
262.5	282.5	0.0283	0.0369
282.5	302.5	0.0303	0.0372
302.5	352.5	0.0347	0.0401
352.5	402.5	0.0386	0.0430
402.5	452.5	0.0417	0.0458
452.5	502.5	0.0442	0.0495
502.5	1002.5	0.0575	0.0537
1002.5	1502.5	0.0642	0.0571
1502.5	2002.5	0.0676	0.0577
2002.5	2502.5	0.0689	0.0615
2502.5	3002.5	0.0703	0.0615
3002.5	4000.0	0.0724	0.0615

Numune 1'den elde edilen sonuçlara göre doğrultulu birikimli boşluk oranları ile alansal birikimli boşluk oranları arasında farklılıklar görülmektedir. Tablo 40'a göre küçük çaplarda, ölçüm doğrusu yöntemiyle elde edilen oranlar, önerilen yöntem ile elde edilen oranlardan daha büyüktür. Büyük çaplarda ise, ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yöntemden elde edilen oranlar arasındaki fark oldukça yüksektir.



(a)



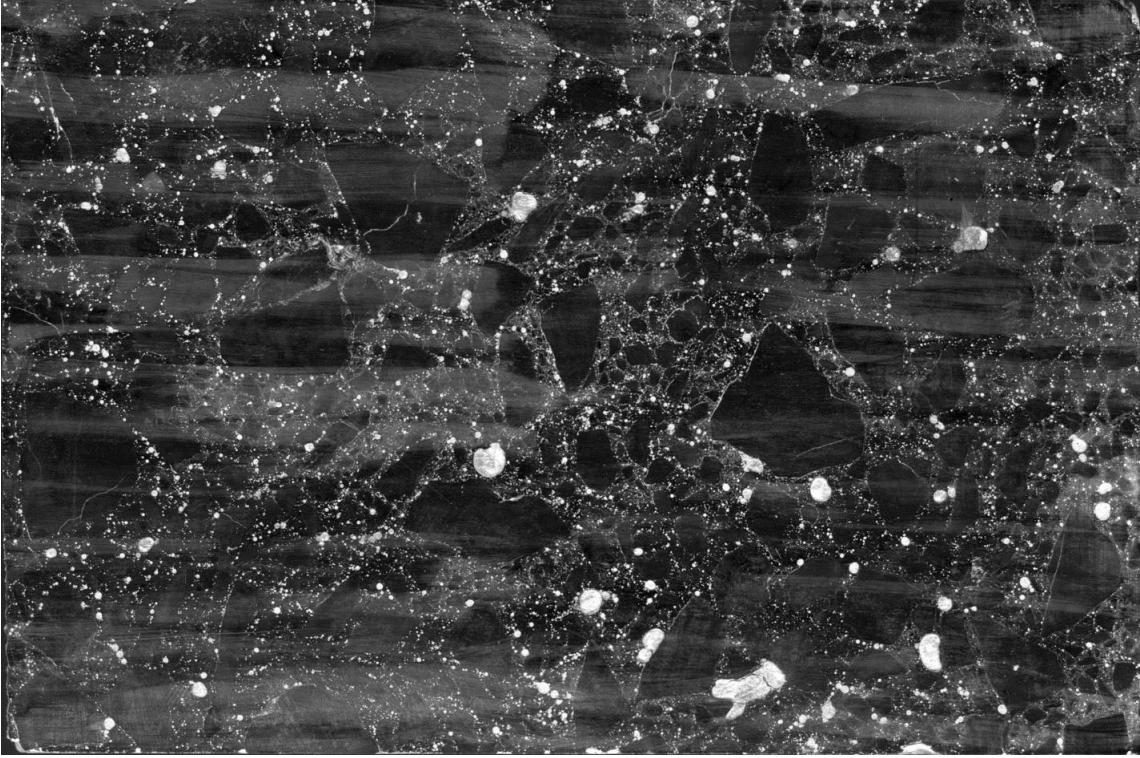
(b)

Şekil 49. Numune 2, (a) Taranmış gerçek beton numune kesiti; (b) Eşikleme işlemi uygulanmış gerçek beton numune kesiti

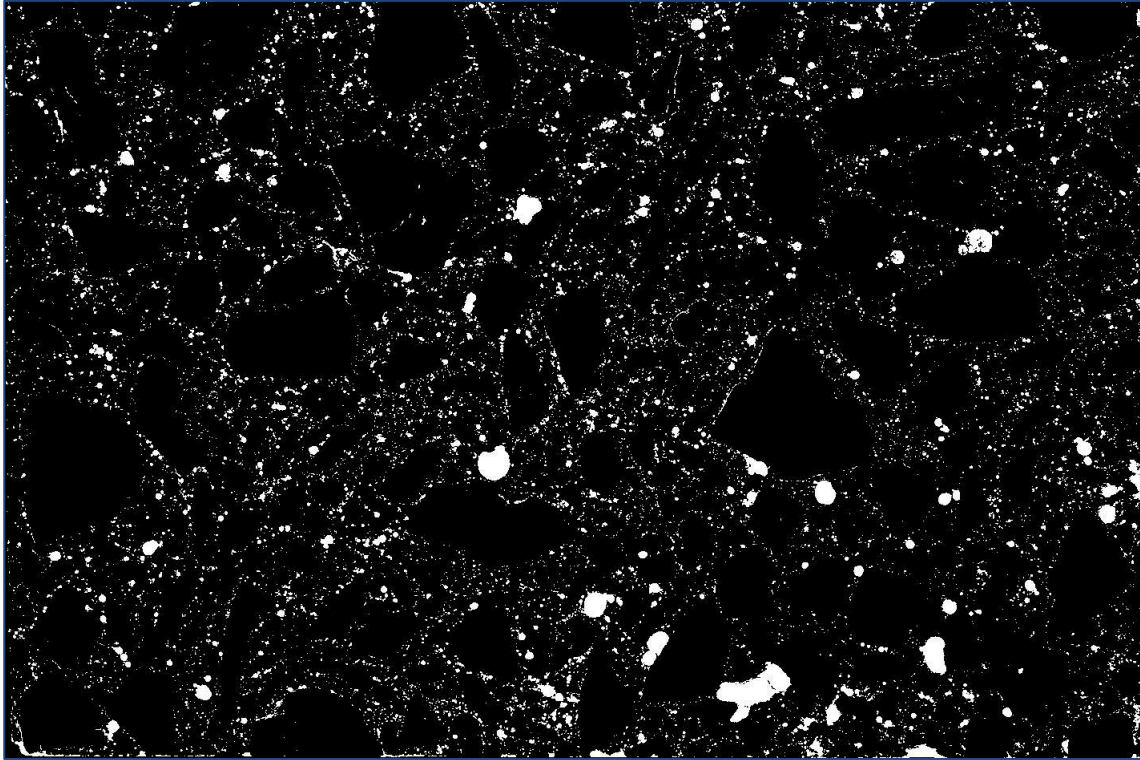
Tablo 41. Numune 2 için ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yönteme göre elde edilen birikimli boşluk oranları

Sınıfın Alt Sınırı	Sınıfın Üst Sınırı	Alansal Birikimli Boşluk Oranları	Doğrultulu Birikimli Boşluk Oranları
0.0	12.5	0.0000	0.0000
12.5	22.5	0.0000	0.0000
22.5	32.5	0.0000	0.0004
32.5	42.5	0.0001	0.0007
42.5	52.5	0.0003	0.0012
52.5	62.5	0.0007	0.0028
62.5	82.5	0.0021	0.0048
82.5	102.5	0.0043	0.0094
102.5	122.5	0.0071	0.0136
122.5	142.5	0.0101	0.0169
142.5	162.5	0.0133	0.0196
162.5	182.5	0.0162	0.0230
182.5	202.5	0.0191	0.0239
202.5	222.5	0.0218	0.0300
222.5	242.5	0.0241	0.0300
242.5	262.5	0.0263	0.0313
262.5	282.5	0.0282	0.0348
282.5	302.5	0.0300	0.0353
302.5	352.5	0.0337	0.0367
352.5	402.5	0.0366	0.0379
402.5	452.5	0.0388	0.0379
452.5	502.5	0.0404	0.0413
502.5	1002.5	0.0478	0.0474
1002.5	1502.5	0.0509	0.0503
1502.5	2002.5	0.0536	0.0531
2002.5	2502.5	0.0569	0.0534
2502.5	3002.5	0.0582	0.0561
3002.5	4000.0	0.0583	0.0561

Numune 2'den elde edilen sonuçlara göre doğrultulu birikimli boşluk oranları ile alansal birikimli boşluk oranları arasında farklılıklar görülmektedir. Tablo 41'e göre küçük çaplarda, ölçüm doğrusu yöntemi, önerilen yönteme göre daha büyük değerler elde etmiştir. Büyük çaplarda ise, önerilen yöntem, ölçüm doğrusu yöntemine göre daha büyük değerler elde etmiştir.



(a)



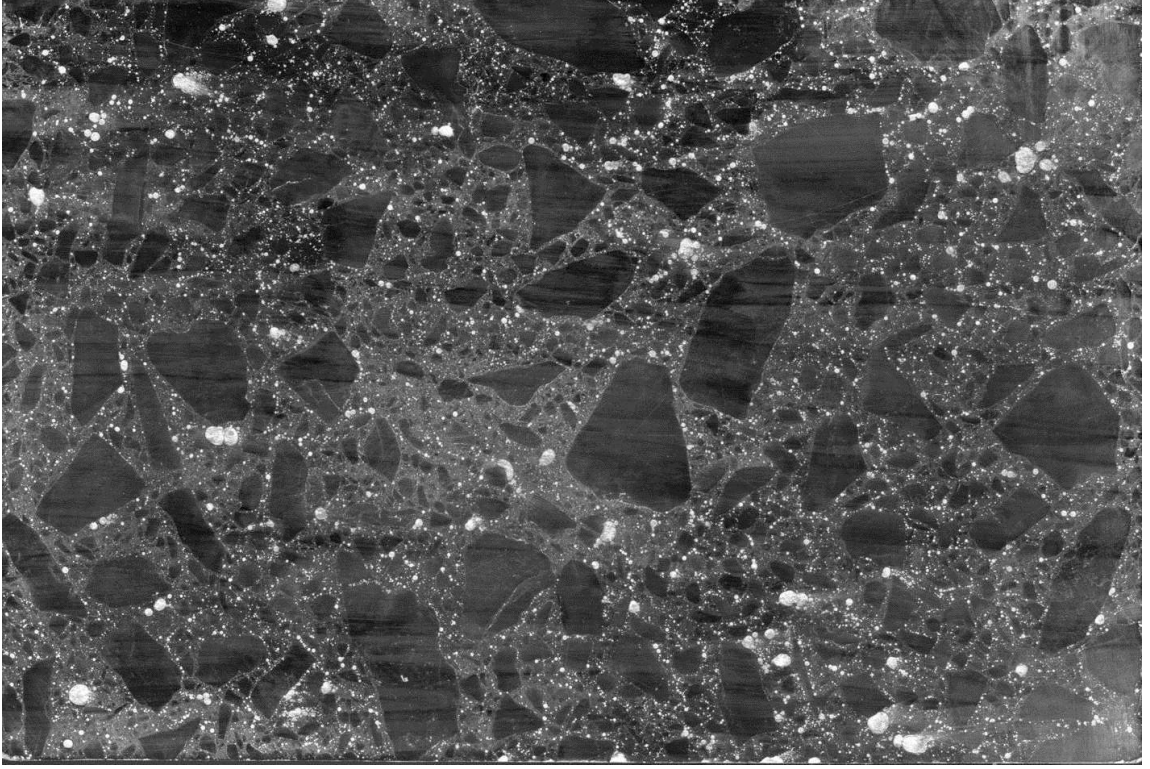
(b)

Şekil 50. Numune 3, (a) Taranmış gerçek beton numune kesiti; (b) Eşikleme işlemi uygulanmış gerçek beton numune kesiti

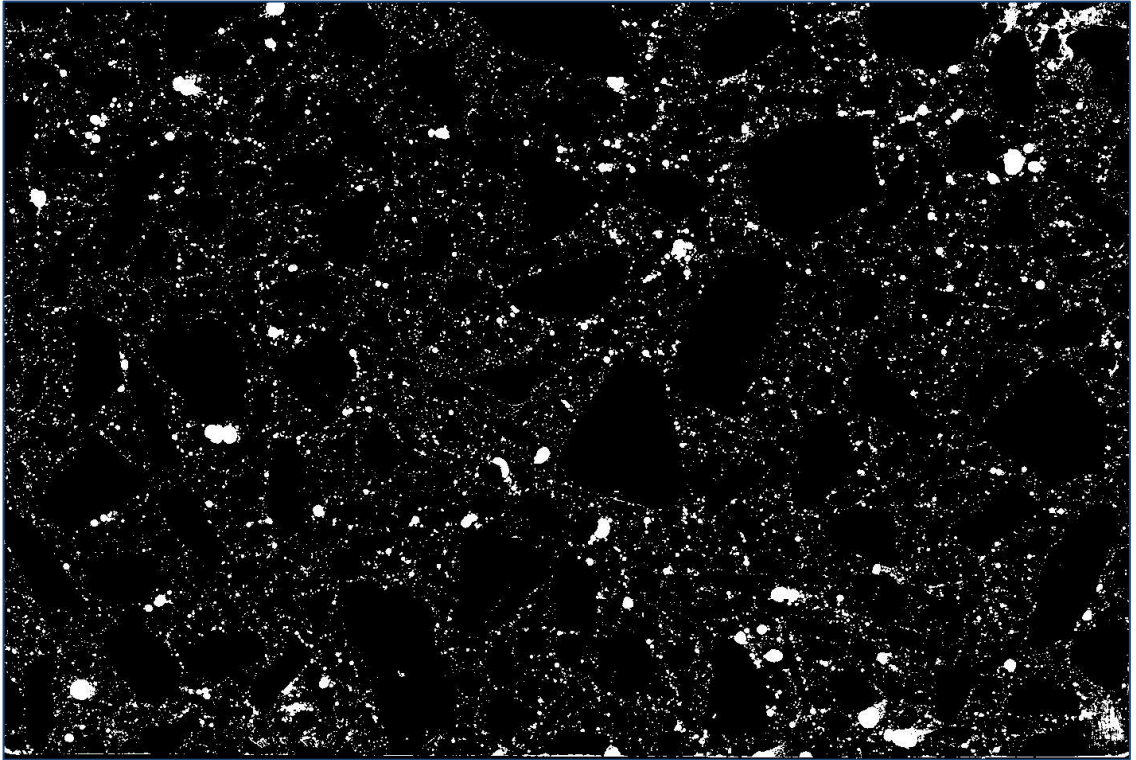
Tablo 42. Numune 3 için ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yönteme göre elde edilen birikimli boşluk oranları

Sınıfın Alt Sınırı	Sınıfın Üst Sınırı	Alansal Birikimli Boşluk Oranları	Doğrultulu Birikimli Boşluk Oranları
0.0	12.5	0.0000	0.0000
12.5	22.5	0.0000	0.0001
22.5	32.5	0.0000	0.0001
32.5	42.5	0.0000	0.0002
42.5	52.5	0.0001	0.0003
52.5	62.5	0.0003	0.0011
62.5	82.5	0.0009	0.0025
82.5	102.5	0.0021	0.0047
102.5	122.5	0.0036	0.0059
122.5	142.5	0.0054	0.0085
142.5	162.5	0.0075	0.0120
162.5	182.5	0.0096	0.0133
182.5	202.5	0.0117	0.0154
202.5	222.5	0.0137	0.0184
222.5	242.5	0.0158	0.0206
242.5	262.5	0.0178	0.0215
262.5	282.5	0.0196	0.0231
282.5	302.5	0.0214	0.0271
302.5	352.5	0.0253	0.0314
352.5	402.5	0.0286	0.0314
402.5	452.5	0.0315	0.0337
452.5	502.5	0.0339	0.0382
502.5	1002.5	0.0466	0.0463
1002.5	1502.5	0.0523	0.0538
1502.5	2002.5	0.0558	0.0538
2002.5	2502.5	0.0578	0.0538
2502.5	3002.5	0.0591	0.0647
3002.5	4000.0	0.0624	0.0647

Numune 3'ten elde edilen sonuçlara göre doğrultulu birikimli boşluk oranları ile alansal birikimli boşluk oranları arasında farklılıklar görülmektedir. Tablo 42'ye göre genel olarak küçük çaplarda, ölçüm doğrusu yönteminde, önerilen yönteme göre daha büyük değerler elde edilmiştir. Büyük çaplarda ise, önerilen yöntem, ölçüm doğrusuna göre daha büyük değerler elde ederken, bazı değerlerde ise ölçüm doğrusu yöntemi önerilen yönteme göre daha büyük değerler elde etmiştir.



(a)



(b)

Şekil 51. Numune 4, (a) Taranmış gerçek beton numune kesiti; (b) Eşikleme işlemi uygulanmış gerçek beton numune kesiti

Tablo 43. Numune 4 için ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yönteme göre elde edilen birikimli boşluk oranları

Sınıfın Alt Sınırı	Sınıfın Üst Sınırı	Alansal Birikimli Boşluk Oranları	Doğrultulu Birikimli Boşluk Oranları
0.0	12.5	0.0000	0.0000
12.5	22.5	0.0000	0.0001
22.5	32.5	0.0000	0.0001
32.5	42.5	0.0001	0.0002
42.5	52.5	0.0002	0.0005
52.5	62.5	0.0003	0.0012
62.5	82.5	0.0010	0.0030
82.5	102.5	0.0021	0.0037
102.5	122.5	0.0037	0.0054
122.5	142.5	0.0056	0.0093
142.5	162.5	0.0076	0.0114
162.5	182.5	0.0098	0.0114
182.5	202.5	0.0120	0.0150
202.5	222.5	0.0142	0.0185
222.5	242.5	0.0164	0.0202
242.5	262.5	0.0186	0.0228
262.5	282.5	0.0206	0.0228
282.5	302.5	0.0224	0.0228
302.5	352.5	0.0267	0.0295
352.5	402.5	0.0309	0.0343
402.5	452.5	0.0341	0.0348
452.5	502.5	0.0369	0.0397
502.5	1002.5	0.0506	0.0501
1002.5	1502.5	0.0559	0.0582
1502.5	2002.5	0.0595	0.0610
2002.5	2502.5	0.0614	0.0610
2502.5	3002.5	0.0642	0.0665
3002.5	4000.0	0.0661	0.0665

Numune 4'ten elde edilen sonuçlara göre doğrultulu birikimli boşluk oranları ile alansal birikimli boşluk oranları arasında farklılıklar görülmektedir. Tablo 43'e göre genel olarak küçük çaplarda, ölçüm doğrusu yönteminde, önerilen yönteme göre daha büyük değerler elde edilmiştir. Büyük çaplarda ise, ölçüm doğrusu yöntemi, önerilen yöntemine göre daha büyük değerler elde etmiştir.

3. BULGULAR VE SONUÇLAR

Yapay model oluştururken ölçülerin gereğinden fazla seçilmesi işlem hacminin artmasına ve dolayısıyla hesaplama zamanının da artmasına neden olmaktadır. Ayrıca hesaplama zamanını azaltmak için model 169 parçaya bölünerek, her bir parça model içerisine boşluklar yerleştirilmiştir. Böylece boşluk yerleştirilirken yerleştirilecek olan yeni boşluk, tüm modelde yerleştirilmiş diğer boşluklarla karşılaştırılmak yerine parça içerisine yerleştirilen boşluklarla karşılaştırılmıştır.

Parça modeller değerlendirildiğinde aynı satırdaki parçaların Kolmogorov-Smirnov testine göre aynı dağılımdan gelebilme olasılıklarının yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, numunenin hazırlanması sırasında yerçekimi etkisiyle oluşan basınçtan dolayı hava boşluklarının yukarıya doğru hareket etmesinden kaynaklanmaktadır.

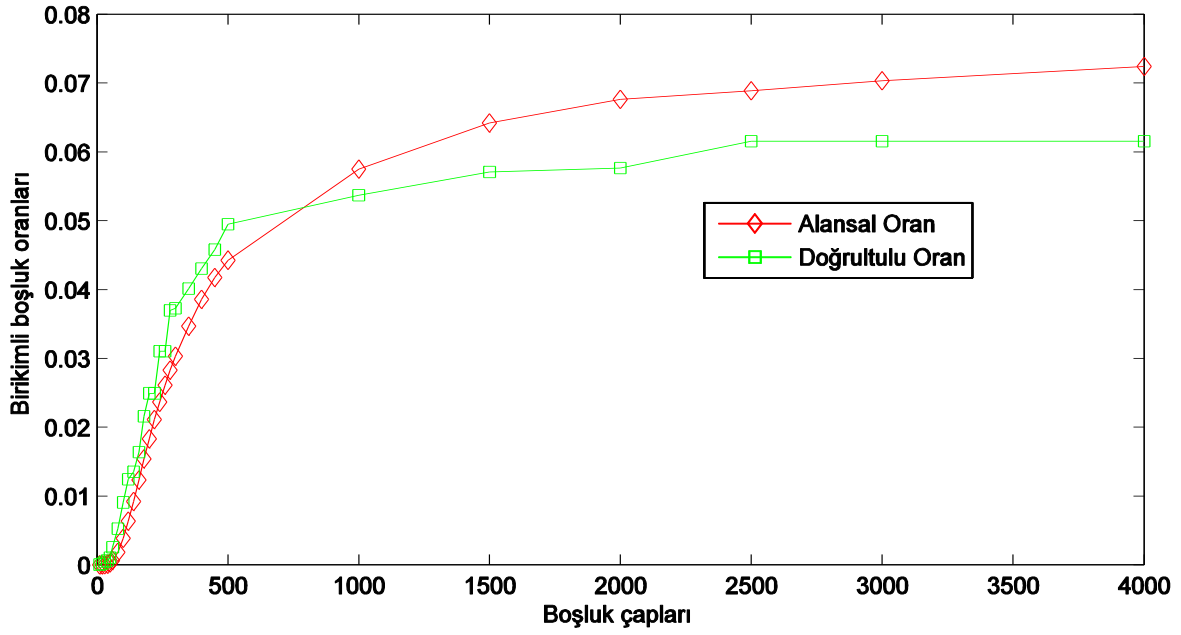
Gerçek numuneler yardımıyla parametreler belirlenirken hacim yerine kesit yüzey alanı tercih edilmiştir. Dolayısıyla belli bir düzeyde bir yanılma payı olabilmektedir. Öte yandan numune içerisindeki agregaların boyutlarının büyük olması ve düzensiz dağılması parametre kestirimlerinde sorunlara neden olmaktadır.

3.1. Gerçek Model Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Gerçek modelin hem ölçüm doğruları yöntemi hem de önerilen yöntem ile analizi sonucunda elde edilen boşluk oranları arasında farklılıklar bulunmaktadır. Hava boşluk çapları μm gibi çok küçük bir birimde olduğundan birikimli boşluk oranları arasındaki bu fark son derece önemlidir.

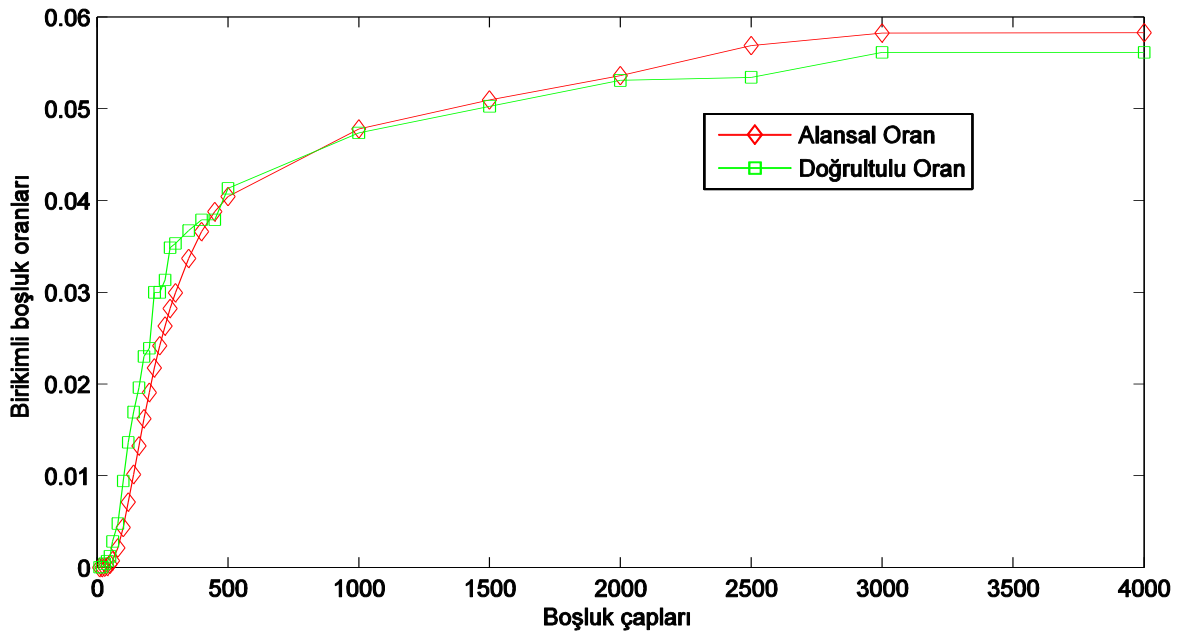
Dört ayrı numune üzerinde ölçüm doğrusu yöntemi ile önerilen yöntem uygulanmış ve sonuçların grafiksel karşılaştırılması Şekil 52-55'de verilmiştir.

Şekil 52'de Numune 1'den elde edilen ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. $500\mu m$ 'den küçük olan çaplarda ölçüm doğrusu yöntemi, önerilen yöntemle göre daha büyük değerler elde etmiştir. $500\mu m$ 'den büyük değerlerde ise ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yöntemden elde edilen oranlar arasındaki fark oldukça yüksektir.



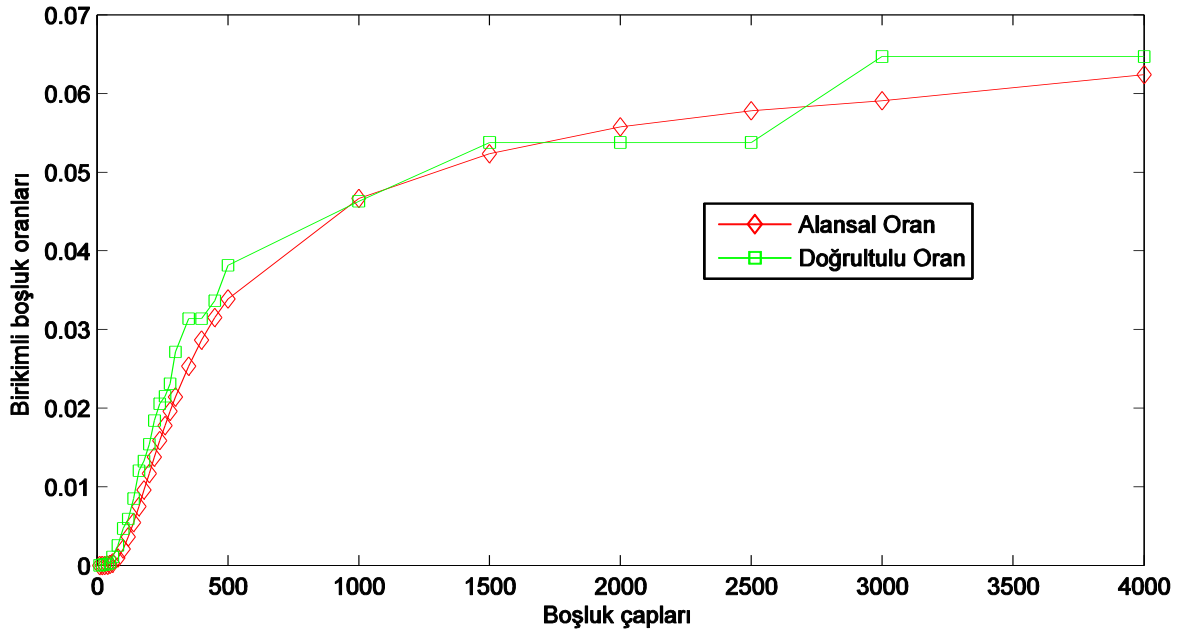
Şekil 52. Numune 1 için ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yöntemden elde edilen birikimli boşluk oranlarının grafiksel karşılaştırılması

Şekil 53'te Numune 2'den elde edilen ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. $1000\mu m$ 'den küçük olan çaplarda ölçüm doğrusu yöntemi, önerilen yöntemle göre daha büyük değerler elde etmiştir. $1000\mu m$ 'den büyük değerlerde ise önerilen yöntem, ölçüm doğrusu yöntemine göre daha büyük değerler elde etmiştir.



Şekil 53. Numune 2 için ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yöntemden elde edilen birikimli boşluk oranlarının grafiksel karşılaştırılması

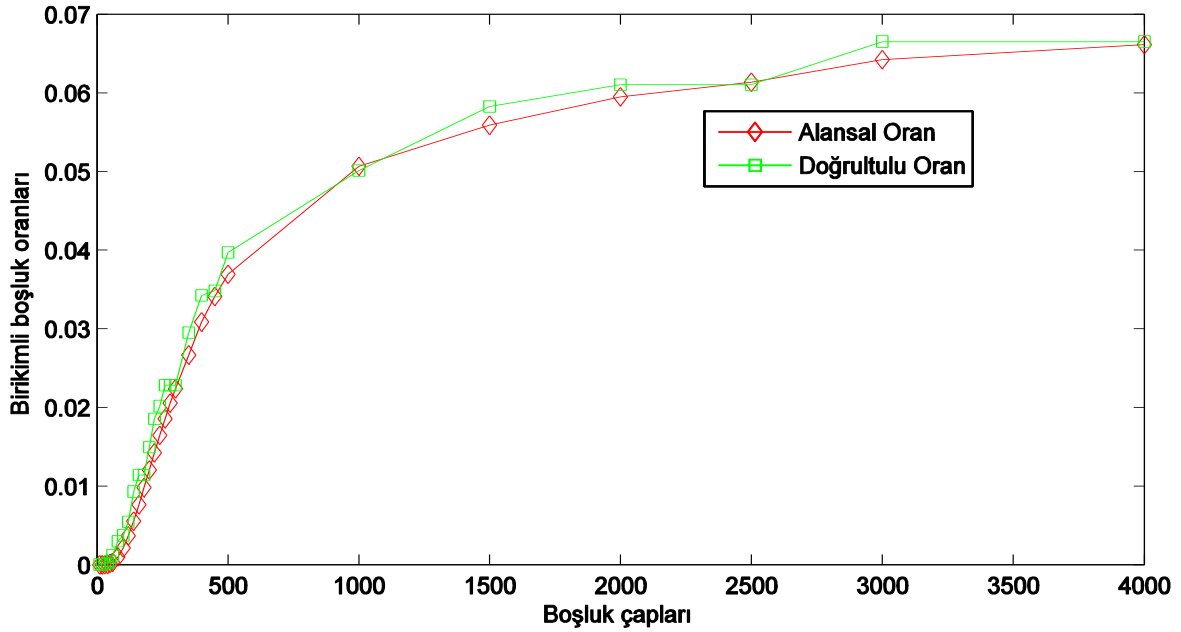
Şekil 54'te Numune 3'ten elde edilen ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. $1500\mu m$ 'den küçük olan çaplarda ölçüm doğrusu yönteminde, önerilen yöntemle göre daha büyük değerler elde edilmiştir $1500\mu m$ 'den büyük bazı değerlerde önerilen yöntem, ölçüm doğrusuna göre daha büyük değerler elde ederken, bazı değerlerde ise ölçüm doğrusu yöntemi önerilen yöntemle göre daha büyük değerler elde etmiştir.



Şekil 54. Numune 3 için ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yöntemden elde edilen birikimli boşluk oranlarının grafiksel karşılaştırılması

Şekil 55'te Numune 4'ten elde edilen ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. $1000\mu m$ 'den küçük olan çaplarda ölçüm doğrusu yönteminde, önerilen yöntemle göre daha büyük değerler elde edilmiştir $1000\mu m$ 'den büyük değerlerde ise ölçüm doğrusu yöntemi, önerilen yöntemle göre daha büyük değerler elde etmiştir.

Dört numunenin analizi sonucunda elde edilen grafiksel karşılaştırmalarda ölçüm doğrusu yöntemine göre elde edilen oranlarda ani sıçramalar olduğu görülmüştür. İstatistiki açıdan, büyük sayılar kanununa göre bu şekilde ani sıçramaların olmaması gerekir. Bu nedenle, önerilen yöntem ile elde edilen oranların dağılımları, ölçüm doğrusu yöntemine göre elde edilen oranların dağılımına göre daha düzgün bir biçimde artmaktadır.



Şekil 55. Numune 4 için ölçüm doğrusu yöntemi ve önerilen yöntemden elde edilen birikimli boşluk oranlarının grafiksel karşılaştırılması

3.2. Yapay Model Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yapay modeldeki boşluk oranının hacimsel oran, alansal kesit ve ölçüm doğrusu yöntemine göre karşılaştırılmasında dört hipotez kurulmuştur ve bu oranlar t-testi ile değerlendirilmiştir.

Birinci hipotezde $R \leq 300\mu m$ çap üst sınırına göre ortalama hacimsel oran ile ortalama alansal oran karşılaştırılmıştır ve 0.4697 gibi yüksek bir p değeri elde edilerek hipotez kabul edilmiştir. Bu sonuca göre alansal oranın %95 güven düzeyi ile hacimsel oranı karşıladığı söylenebilir.

İkinci hipotezde $R \leq 300\mu m$ çap üst sınırına göre ortalama hacimsel oran ile ortalama doğrultulu oran karşılaştırılmıştır ve 1.1947×10^{-28} gibi düşük bir p değeri elde edilerek hipotez reddedilmiştir. Bu sonuca göre doğrultulu oranın %95 güven düzeyi ile hacimsel oranı karşılamadığı söylenir.

Üçüncü hipotezde $R \leq 4000\mu m$ çap üst sınırına göre ortalama hacimsel oran ile ortalama alansal oran karşılaştırılmıştır ve 0.4993 gibi yüksek bir p değeri elde edilerek hipotez kabul edilmiştir. Bu sonuca göre alansal oranın %95 güven düzeyi ile hacimsel oranı karşıladığı söylenebilir.

Dördüncü hipotez $R \leq 4000\mu m$ çap üst sınırına göre ortalama hacimsel oran ile ortalama doğrultulu oran karşılaştırılmıştır ve 9.5274×10^{-32} gibi düşük bir p değeri elde edilerek hipotez reddedilmiştir. Bu sonuca göre doğrultulu oranın %95 güven düzeyi ile hacimsel oranı karşılamadığı söylenir.

Şekil 46 ve Şekil 47’de oranların grafiksel karşılaştırmalarında hacimsel oranlarla alansal oranların hem ortalama değerinde hem de standart sapma değerinde büyük oranda bir çakışma görülürken doğrultulu oranlar büyük oranda farklılık göstermektedir.

Öte yandan yapay model analizlerinde doğrulama parametreleri belirlenerek yöntemlerin yüzde başarıları ortaya konmuştur. Ölçüm doğrusu yöntemine göre mikro hava içeriği açısından doğrulama yüzdesi %95’i geçen model sayısı 3, toplam hava içeriği açısından doğrulama yüzdesi %95’i geçen model sayısı 7 olmuştur. Önerilen yönteme göre hem mikro hava içeriği hem de toplam hava içeriği açısından doğrulama yüzdesi %95’i geçen model sayısı 100 olmuştur. Bu ise önerilen yöntemin başarımını ortaya koyaktadır.

4. ÖNERİLER

Ülkemizde ve dünyada inşaat sektörü her zaman popüleritesini koruyacak iş alanlarından birisidir. Kalkınmakta olan ülkelerde katma değer oluşturabilecek olan bir sektörün ar-ge çalışmaları ile desteklenmesi önemli bir konudur. Bu çalışmada önerilen yöntem, sertleşmiş beton numunelerin analizinde hızlı ve güvenilir bir yöntem olarak kullanılabilir. Böylelikle iş gücü ve zaman kaybının yanı sıra güvenilir yapıların yapımında daha doğru bir yaklaşım kullanılabilir.

Günümüzde asfalt yollar yerine beton yolların yapılması düşünülmektedir. Beton yolların her türlü çevre koşullarına açık olmasından dolayı beton bileşenlerinin ne denli önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Dolayısıyla beton karışımlarında kimyasal katkı oranlarının değişik koşullara göre iyi ayarlanması giderek önem kazanan bir konudur. Önerilen yöntemin daha hızlı ve daha doğru olması nedeniyle beton boşluk oranının daha doğru hesaplanmasının ve dolayısıyla inşa edilen yapıların daha dayanıklı ve dayanımlı olmasına katkı sağlayacaktır.

5. KAYNAKLAR

- Baradan, B., 1996. Yapı Malzemesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Burger, W., and Burge, M. J., 2009. Principles of Digital Image Processing Core Algorithms, Springer, London, UK.
- Burger, W., and Burge, M. J., 2009. Principles of Digital Image Processing Fundamental Techniques, Springer, London, UK
- Elsen, J., 2001. Automated Air Void Analysis on Hardened Concrete: Results of A European Intercomparison Testing Program, Cement and Concrete Research, 31,7, 1027-1032.
- Erdoğan, T. Y., 2003. Beton, ODTÜ Yayıncılık, Ankara.
- Gonzalez, R. C., and Woods, R. E., 2002. Digital Image Processing, Prentice-Hall Publishing, New Jersey, USA.
- Gonzalez, R. C., Woods, R. E., and Eddins, S. L., 2004. Digital Image Processing Using MATLAB, Pearson Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Jähne, B., 2004. Practical Handbook on Image Processing for Scientific and Technical Applications, CRC Press.
- Jakobsen, U. H., Pade, C., Thaulow, N., Brown, D., Sahu, S., Magnusson, O., et al., 2006. Automated Air Void Analysis of Hardened Concrete - A Round Robin Study, Cement and Concrete Research, 36,8, 1444-1452.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., and Panarese, W. C., 2002. Design and Control of Concrete Mixtures, Portland Cement Association.
- Mehta, P. K., and Monteiro, P. J., 2005. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, McGraw-Hill Professional.
- Ng, L., 2010. Studying Air Properties in Hardened Portland Cement Concrete with Linear Traverse Method, PhD Thesis, University of Louisville.
- Nixon, M., and Aguado, A., 2008. Feature Extraction and Image Processing, Academic Press.
- Otsu, N., 1979. A threshold Selection Method From Gray-Level Histogram, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 9,1, 62-66.

- Park, J.-M., Looney, C. G., and Chen, H.-C., 2000. Fast Connected Component Labeling Algorithm Using a Divide and Conquer Tehnique, CATA 2000 Computers and Their Applications, 373-376.
- Peterson, K., 2001. Air Void Analysis of Hardened Concrete Via Flatbed Scanner, Master Thesis, Michigan Technological University, Civil Engineering.
- Powers, T. C., 1945. A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete, Journal Proceedings, 41,1, 245-272.
- Powers, T. C., 1954. Void Spacing as a Basis for Producing Air-Entrained Concrete. Journal Proceedings, 50,5, 741-760.
- Powers, T. C., 1968. The Properties of Fresh Concrete, New York: John Wiley and Sons Inc.
- Powers, T. C., 1978. "The Nature of Concrete." Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, American Society for Testing and Materials.
- Rosenfeld, A., and Pfaltz, J. L., 1966. Sequential Operations in Digital Picture Processing, Journal of the ACM, 13,4, 471-494.
- Russ, J. C., 2007. The Image Processing Handbook. CRC Presss.
- Scott, M., 1997. Determining the Air Void Parameters of Concrete Using Digital Image Analysis of Polarized Light Micrographs, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Song, Y., 2014. Analysis of Air-Void System in Hardened Concrete From a Three-Dimensional Perspective, University of Illinois, Illinois
- Sonka, M., Hlavac, V., and Boyle, R., 2007. Image Prcessing, Analysis, and Machine Vision, Cengage Learning.
- Stiltner, M. A., 2001. Linear Traverse and Modified Point Count Correlation Using Multiple Replicate, University of Louisville.
- Suzuki, K., Horiba, I., and Sugie, N., 2003. Linear-time Connected-Component Labeling Based on Sequential Local Operations, Computer Vision and Image Understanding, 89,1, 1-23.
- Şimşek, O., 2009. Beton ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık.
- Tattersall, G. H., 2003. Workability and Quality Control of Concrete, CRC Press, London, England.
- Ünsal, A., ve Şen, H., 2008. Beton ve Beton Malzemeleri Laboratuar Deneyleri, Kara Yolları Genel Müdürlüğü.

- Verbeck, G., 1978. "Pore Structure." Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, American Society for Testing and Materials.
- Yapa, R. D., and Harada, K., 2008. Connected Component Labeling Algorithms for Gray-Scale Images and Evaluation of Performance Using Digital Mammograms, International Journal of Computer Science and Network Security, 8,6, 33-41.
- Yim, H. J., Kim, J. H., Lee, B. Y., and Kwak, H.-G., 2013. Air Voids Size Distribution Determined by Ultrasonic Attenuation, Construction and Building Materials, 47, 502-510.

ÖZGEÇMİŞ

Eda ÖZKUL, 17 Ekim 1990 tarihinde Samsun'da doğdu. İlkokulu Canik 100. Yıl İlköğretim okulunda, ortaokulu ise Dikbıyık İlköğretim okulunda tamamladı. 2008 yılında İlkadım 19 Mayıs YDA lisesini bitirdi. 2008-2009 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri bölümünde lisans eğitimine başladı. 2012 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. Aralık 2013 tarihinde Karadeniz Teknik Üniversitesi İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Bölümü'ne araştırma görevlisi olarak atandı ve halen bu görevine devam etmektedir.