

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AGREGALARIN GEOMETRİK
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİNE
YÖNELİK YENİ GÖRÜNTÜ ANALİZ
YÖNTEMLERİ GELİŞTİRİLMESİ**

Ali TOPAL

Mayıs, 2008
İZMİR

**AGREGALARIN GEOMETRİK
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİNE
YÖNELİK YENİ GÖRÜNTÜ ANALİZ
YÖNTEMLERİ GELİŞTİRİLMESİ**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Anabilim Dalı

Ali TOPAL

Mayıs, 2008

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

Ali TOPAL, tarafından **Prof. Dr. Bülent BARADAN** yönetiminde hazırlanan
**“AGREGALARIN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİNE
YÖNELİK YENİ GÖRÜNTÜ ANALİZ YÖNTEMLERİ GELİŞTİRİLMESİ”**
başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi
olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bülent BARADAN

Yönetici

Prof. Dr. Tevfik AKSOY

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Öncelikle, tezin gelişim sürecinde yaptığı öneriler ve ilgisi nedeniyle, bu bilimsel çalışmayı yöneten, bilgi ve tecrübesiyle desteğini her zaman yanımda hissettiğim, danışmanım Sayın Prof. Dr. Bülent BARADAN’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımı titizlikle izleyen, değerli görüşlerinden yararlandığım Sayın Prof. Dr. Tevfik AKSOY ve Sayın Prof. Dr. Kambiz RAMYAR’a teşekkür ederim.

Zamansız yitirdiğimiz değerli hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet ULUÇAYLI’yı saygıyla anarım.

Görüntü alma, işleme ve analiz çalışmalarında bilgi ve tecrübelerine başvurduğum, disiplinler arası çalışmamıza destek veren İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektrik ve Elektronik Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Şevket GÜMÜŞTEKİN’e, D.E.Ü. Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Metehan MAKİNACI’ya ve Pamukkale Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Bölümü Öğretim Görevlisi Sayın Mahmut SİNECEN’e teşekkür ederim.

Tez izleme toplantılarına katılan, değerli görüş ve önerilerinden yararlandığım Sayın Prof. Dr. Akın ALTUN’a, Doç. Dr. Selçuk TÜRKEK’e, Yapı Malzemesi Anabilim Dalında görevli çalışma arkadaşlarıma ve İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Birlikte çalışmalarımızı yürüttüğümüz, fikir alışverişinde bulunduğumuz, manevi desteklerini hissettiğim mesai arkadaşlarım Yrd. Doç. Dr. Serhan TANYEL ve Yrd. Doç. Dr. Burak ŞENGÖZ’e teşekkür ederim.

Malzeme desteklerinin yanı sıra paylaştıkları bilgi ve tecrübeleri nedeni ile Dere Madencilik İnş. Yapı Malz. San. Tic. A.Ş. yönetim kurulu üyesi Sayın Mehmet TURAN’a, Ege Asfalt Maden İnşaat Nakliye San. Tic. A.Ş. yönetim kurulu üyesi

Sayın Faik PAKDİL'E, AkEge Çimento A.Ş teknik müdürü Sayın Mehmet KIZILCAAĞAÇLI'ya, Çimsa Çimento Sanayi A.Ş kontrol laboratuvarı çalışanlarına, ÇimBeton kalite kontrol laboratuvarı çalışanlarına, daha isimlerini sayamadığım, agregâ temininde desteklerini esirgemeyen tüm agregâ üreticisi firmalara teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi destekleri ile bana güç veren aileme, Boydaş ailesine ve ilgisi ile hep yanımda olan, anlayışına sığındığım, hayatı paylaştığım sevgili eşim Belkıs Müge TOPAL'a gönülden teşekkürlerimi sunarım.

Ali TOPAL

AGREGALARIN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK YENİ GÖRÜNTÜ ANALİZ YÖNTEMLERİ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZ

Agrega geometrik özellikleri ana kayacın mineralojisine, kırma işlemi ve kırma yöntemine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Şekil, köşelilik ve yüzey dokusu terimleri, agregaların karakterize edilmesinde sıklıkla kullanılan geometrik özelliklerdir. Bu özellikler, agreganın kullanıldığı asfalt ve beton vb. malzemelerin performansı üzerinde etkilidir. Bu tip malzemelerin tasarımı açısından uygun özelliklerde agrega seçimi önem kazanmaktadır. Uygun olmayan agregaların kullanılması örneğin, betonda dayanım kaybına ve kalıcılık açısından sorunlara neden olur. Bununla birlikte, agrega geometrik özelliklerini belirlemeye yönelik genel kabul görmüş bir yöntem de mevcut değildir. Günümüz geleneksel ölçüm yöntemleri sübjektif ve zaman alıcıdır. Bu nedenle doğrudan ölçüm yapabilecek objektif ve hızlı alternatif yöntemlere ihtiyaç vardır. Günümüzde, bilgisayar ve görüntüleme teknolojisinin gelişmesi, görüntü işleme ve analiz metodlarının ölçüm ve gözlem amacıyla çeşitli disiplinlerde kullanımını yaygınlaştırmıştır.

Tez çalışması kapsamında, görüntü işleme tekniklerinin hızlı ölçüm yöntemleri olarak beton agregalarına uygulanabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla aydınlatma paneli, lazer kameralı ve sanal kameralı sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemlerle, iri ve ince agrega tanelerinin geometrik özelliklerini belirlemeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Geliştirilen sistemler, görüntü alma ve işleme aşamaları boyunca en az veri kaybına neden olacak şekilde optimize edilmişlerdir. Aydınlatma panelli sistem, agregaların yuvarlaklık, konkavlık ve dış merkezlik gibi geometrik özelliklerini belirlemek amacıyla 2 boyutlu ve derinlik bilgileri içeren analizlerde kullanılmıştır. Analizler için C++ programlama dilinde Aggreganalysis adını verdiğimiz özel bir görüntü analiz programı yazılmış ve kullanıcı arayüzü tasarlanmıştır. MatLab® görüntü işleme araç kutusu, derinlik bilgisi içeren görüntülerdeki agrega tanelerini geometrik özelliklerine göre sınıflandırılmak amacıyla kullanılmıştır. Lazer kameralı sistemde ise agregalar, üzerlerine düşürülen lazer çizgisi görüntülerinin birleştirilmesi ile üç boyutlu modellenenilmektedir. Üç boyutlu görüntüleme için

MatLab® da kullanıcı arayüzü tasarlanmıştır. Bir kamera ve sanal kamera olarak kullanılan 4 özel ayna ile tasarımı yapılan Sanal kameralı sistemde ise, agrega tanelerinin 3. boyuta en yakın öznitelikleri 5 farklı yüzeyden alınan görüntülerle çok daha az donanım ve maliyetlerle sağlanabilecektir. Son olarak, agrega geometrik özelliklerinin taze ve sertleşmiş beton performansı üzerine etkisinin mertebesini belirlemek amacı ile bazı çimento harcı ve beton deneyleri yapılmıştır.

Anahtar sözcükler: Agrega, Şekil, Pürüzlülük, Dijital görüntü işleme, Görüntü analizi, Aydınlatma panelli sistem, Lazer esaslı görüntüleme sistemi, Sanal kameralı görüntüleme sistemi, Çimento harcı, Beton, Mekanik özellikler

DEVELOPMENT OF NEW DIGITAL IMAGE ANALYSIS METHODS FOR DETERMINATION OF THE GEOMETRICAL PROPERTIES OF AGGREGATES

ABSTRACT

Geometrical properties of aggregates depend on petrography of parent rock, type of the crusher and crushing process. Shape, angularity, and texture are the key geometrical properties which are frequently used to characterize aggregates. These properties have significant effects on the performance of construction materials such as asphalt and concrete. Therefore, selection process of aggregates for a specific job is very important. For example, selection of an improper aggregate may cause failure or deterioration of a concrete structure. Also, there is no established and accepted general test method for determination of the geometrical properties of aggregates. Current standard test methods are subjective, labor-intensive and time consuming. In the absence of an effective and objective test method for quantifying aggregate geometrical properties, there is an urgent need for determining the geometrical properties of aggregates directly. Recent technological advances in computer-based image analysis systems lead to wider use of these methods in different disciplines.

The present dissertation focuses on to development of new modules for accurate determining of geometrical properties of aggregates. Three different modules; illuminated panel, laser based imaging, and virtual imaging systems have been developed for the several shape characterization of the aggregates using various digital image analysis techniques. The developed systems have been optimized to minimize the mistakes during image capturing and processing. Aggreganalysis software tool with user friendly surface property which was coded in C++ programming language allows accurate determination of geometric properties of aggregates such as angularity, compactness, concavity and eccentricity. Illuminated panel system may be implemented in 2D and in 3D image analysis of aggregates including depth information. For the one in 3D, MatLab[®] Image processing toolbox can be used to classify the aggregates according to their geometrical properties. Laser based imaging system enables capturing aggregates in 3D form. A special software surface was coded in MatLab[®] to recognize the geometrical properties of the

aggregates. The developed virtual imaging system has advantages comparatively in capturing images in 3D with only one camcorder and with 4 special mirrors. The most important advantage of this economical virtual imaging system is to capture the real aggregate images in 3D with only one camcorder from 5 different surface angles. Finally, the magnitude of effects of the geometrical properties of aggregates has been determined on the mechanical properties of some mortar and concrete mixtures.

Keywords: Aggregate, Shape, Texture, Digital image processing, Image analyzing, Illuminated panel systems, Laser based imaging system, Virtual imaging system, Mortar, Concrete, Mechanical properties.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	v
ABSTRACT	vii
BÖLÜM BİR - GİRİŞ	1
1.1 Agrega Şekli ve Yüzey Dokusu	3
1.2 Amaç ve Kapsam	5
1.3 Çalışma Planı	9
BÖLÜM İKİ – LİTERATÜR İNCELEMESİ	11
2.1 Agrega Şekli ve Yüzey Yapısı Tanımlamaları	11
2.1.1 Agrega Tane Şekli Sınıflaması	13
2.1.2 Agrega Yüzey Yapısı Sınıflaması	20
2.2 Agrega Geometrik Düzensizliklerinin Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar.....	22
2.2.1 Mekanik Yöntemler	23
2.2.2 Agrega Şekli ve Yüzey Pürüzlülüğü ile İlgili Standart Deney Yöntemleri	25
2.2.2.1 Agrega Şekil ve Yüzey Dokusu Deney Yöntemleri	25
2.2.2.2 Agrega Boyut Dağılımı Deney Yöntemleri	36
2.2.2.3 Yöntemlerin Değerlendirilmesi	36
2.2.3 Görsel Yöntemler	38
2.2.3.1 İki Boyutlu Görüntü Analizlerini Temel Alan Çalışmalar	39
2.2.3.2 Üç Boyutlu Görüntü Analiz Çalışmaları	44
2.3 Agrega Geometrik Düzensizliklerinin Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi	46

2.3.1 İri Agrega Şekli ve Yüzey Pürüzlülüğünün Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi	48
2.3.2 İnce Agrega Şekli ve Yüzey Pürüzlülüğünün Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi	50
2.3.3 İnce Malzeme Şekli ve Yüzey Pürüzlülüğünün Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi	51
2.3.4 Tane Boyut Dağılımı Etkisi	51
2.4 Agrega Bağlayıcı Hamuru Arayüzeyi	54
2.4.1 Betonda Arayüzeyler	55
2.4.1.1 Betonda Agrega-Çimento Hamuru Arayüzeyinin Morfolojisi	56
2.4.1.2 Arayüzeyin Mekanik Davranıştaki İşlevi	60
2.5 Literatür Bilgilerinin Değerlendirilmesi	64

BÖLÜM ÜÇ - SAYISAL GÖRÜNTÜ ANALİZLERİ - AGREGA

UYGULAMALARI65

3.1 Bilgisayarla Görme.....	65
3.2 Görüntü Analizi.....	66
3.2.1 Görüntü Alma (Sayısallaştırma)	67
3.2.1.1 Sayısal Görüntü	69
3.2.2 Dijital Görüntü İşleme	72
3.2.2.1 Görüntü İşleme Algoritmaları	74
3.2.3 Görüntü Özniteliklerinin Ölçümü	77
3.2.4 Sonuçların Elde Edilmesi ve İstatistiksel Değerlendirmesi	77
3.3 Agregalarda Dijital Görüntü Analizi	78
3.3.1 Agregalarda Görüntü Alma	78
3.3.2 Agregalarda Görüntü İşleme ve Nesne Tanımlaması	79
3.3.2.1 Eşikleme	82
3.3.2.2 Dijital Görüntüde Sınırlar.....	82
3.3.2.3 Sınır Belirleme İşlemleri ve Gaussian Filtreleme.....	83
3.3.2.4 Matematiksel Morfoloji	85
3.3.2.5 Dönüm Noktası (Watershed) Dönüşümleri	87

3.3.2.6	Canny Yöntemi ile Tane Sınırları Segmentasyonu	89
3.3.2.7	Görüntü Restorasyonu	94
3.3.2.8	Ters Filtreleme	94
3.3.3	Görüntü Özneliklerinin Ölçümü	95
3.3.4	Sonuçların Elde Edilmesi ve İstatistiksel Değerlendirme	101
3.4	Otomasyon	102

BÖLÜM DÖRT - AGREGA KIRMA İŞLEMİ VE KIRICILAR103

4.1	Kırma İşlemi	103
4.2	Kırma Makinaları	104
4.2.1	Çeneli Kırıcılar	106
4.2.2	Jiroskobik Döner Kırıcılar	107
4.2.3	Konik Kırıcılar	108
4.2.4	Çekiçli Kırıcılar	109
4.2.5	Darbeleri Kırıcılar	110
4.2.6	Merdaneli Kırıcılar	111
4.3	Kırıcı Seçimi	112
4.3.1	Birincil Kırıcıların Karşılaştırılması	113
4.3.2	İkincil Kırıcıların Karşılaştırılması	114

BÖLÜM BEŞ - DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....119

5.1	Agrega Temini	122
5.1.1	İzmir İli ve Çevresi Agregası Ocakları	122
5.1.2	Farklı Bölgelerden Agregası Temini	126
5.2	İnce Agregası Şekli ve Yüzey Pürüzlülüğünün Standart Deney Yöntemleri ile Belirlenmesi	127
5.2.1	İnce Agregalarda Akış Katsayıları (TS EN 933-6)	129
5.2.2	İnce Agregalarda Sıkışmamış Boşluk Oranları (ASTM C1252)	132
5.2.3	Sıkıştırılmış Agregası Mukavemeti Deneyi (CAR Test)	135
5.2.4	Standart Deney Yöntemlerinin Karşılaştırılması	138

5.2.5	İnce Agregası Şekli ve Yüzey Pürüzlülüğü Dolaylı Deney Yöntemlerinin Karşılaştırılması	142
5.2.6	Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	144
5.3	İri Agregası Geometrik Özelliklerinin Standart Deney Yöntemleri ile Belirlenmesi	146
5.3.1	Kalker ve Bazalt Agregalarının Farklı Kıırma Yöntemleri ile Kırılması	146
5.3.2	Kusurlu Agregası Temini ve Özelliklerinin Belirlenmesi	152
5.3.3	Farklı Şekil Özelliklerinde Agregası Temini ve Özelliklerinin Belirlenmesi	152
5.3.4	Parlak ve Pürüzlü Yapay Agregası (Bilya) Temini ve Özelliklerinin Belirlenmesi	157
5.4	Görüntüleme Sistemlerinin Geliştirilmesi	158
5.4.1	Aydınlatma Panelli Görüntüleme ve Analiz Sistemi	161
5.4.1.1	Görüntü Kalibrasyonu	163
5.4.1.2	Görüntü Analiz Programı ve Analizler	165
5.4.1.3	Aydınlatma Panelinde Stereo Yöntemle Görüntü Analizi	175
5.4.1.4	Stereo Görüntüleme Sistemi	175
5.4.1.5	Stereo Görüntü Alımı, Görüntü İşleme ve Analizler	176
5.4.2	Lazer Kameralı Sistem (Üç Boyutlu Görüntü Analizi)	187
5.4.2.1	Donanım ve Sistem Kurulumu	188
5.4.2.2	Görüntü Alımı ve Analiz İşlemleri	189
5.4.2.3	Yazılım	191
5.4.2.4	Üç Boyutlu Modelleme	192
5.4.3	Sanal Kameralı Sistem	194
5.4.3.1	Görüntüleme Sistemi Kurulumu	196
5.4.3.2	Kamera Kalibrasyonu	199
5.4.3.3	Üç boyutlu nesne yüzeylerinin denetlenmesi	202
5.5	İnce Agregalarda Görüntü Analizleri	203
5.5.1	Aydınlatma Panelli Görüntüleme Sistemi ile Yapılan Analizler	204
5.5.1.1	Görüntü Alma	204
5.5.1.2	Görüntü İşleme	205

5.5.1.3	Qwin Görüntü Analiz Programı ile Agrega Şekil Özelliklerinin Belirlenmesi	205
5.5.1.4	Aggreganalysis Programı ile Görüntü Analizleri	212
5.6	İri Agregalarda Görüntü Analizleri	221
5.6.1	Aydınlatma Panelinde Görüntü Alma ve Analizler	221
5.6.2	Derinlik Bilgisi İçeren Stereo Görüntü Analizleri	227
5.6.2.1	Öznitelik Vektörü Seçimi.....	227
5.6.2.2	Farklı Geometrik Özelliklerdeki Agregaların Öznitelikleri	233
5.6.2.3	Farklı Kırıcı Tipleri ile Kırılmış Agregalarda Görüntü Analizleri	236
5.7	Sonuç ve Öneriler	241

BÖLÜM ALTI - ÇİMENTO HARCİ VE BETON DENEYLERİ246

6.1	Çimento Harcı Deneyleri	246
6.1.1	Karışımlarda Kullanılan Malzemeler	247
6.1.1.1	İnce Agregalar	247
6.1.1.2	Çimento	252
6.1.1.3	Karışım Suyu	253
6.1.2	Çimento Harcı Karışımlarının Hazırlanması	254
6.1.3	Çimento Harcı Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	255
6.1.4	Çimento Harcı Deney Sonuçları	257
6.2	Beton Deneyleri	265
6.2.1	Karışım Malzemeleri	266
6.2.1.1	Çimento	267
6.2.1.2	Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı	267
6.2.1.3	Karışım Suyu	267
6.2.2	Taze ve Sertleşmiş Beton Deneyleri	268
6.3	Farklı Kırıcı Tipleri ile Kırılan Agregalarla Hazırlanan Beton Karışımları	272
6.3.1	Karışım Malzemeleri	273
6.3.1.1	İri Agregalar	273
6.3.1.2	İnce Agregalar	274

6.3.2	Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Beton Karışımlarının Hazırlanması	275
6.3.3	Taze Beton Deneyleri	277
6.3.4	Sertleşmiş Beton Deneyleri	281
6.3.4.1	Basınç Dayanımı	281
6.3.4.2	Eğilme Dayanımı	282
6.3.4.3	Silindir Yarma Dayanımı	284
6.3.4.4	Elastisite Modülleri	285
6.3.5	Mineral Agrega Cinsi ve Kusurlu Malzeme Yüzdesi Açısından Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	286
6.3.6	Agrega Kırma Yöntemi Açısından Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	287
6.4	Farklı Yüzdelerde Kusurlu Agrega İçeren Beton Karışımları	290
6.4.1	Karışım Malzemeleri	290
6.4.1.1	İri ve İnce Agregalar	291
6.4.2	Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Beton Karışımlarının Hazırlanması	291
6.4.3	Taze Beton Deneyleri	293
6.4.4	Sertleşmiş Beton Deneyleri	294
6.4.4.1	Basınç Dayanımı	295
6.4.4.2	Eğilme Dayanımı	296
6.4.4.3	Silindir Yarma Dayanımı	297
6.4.4.4	Elastisite Modülü	298
6.5	Farklı Şekil Özelliklerindeki İri Agregalar Kullanılarak Hazırlanan Karışımlar	300
6.5.1	Karışım Malzemeleri	300
6.5.1.1	İri Agregalar	301
6.5.1.2	İnce Agregalar	303
6.5.1.3	Mineral Katkı (Silis dumanı)	305
6.5.1.4	Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Beton Karışımlarının Hazırlanması	305
6.5.2	Taze Beton Deneyleri	307

6.5.3	Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	310
6.5.3.1	Basınç Dayanımı	310
6.5.3.2	Eğilme Dayanımı	312
6.5.3.3	Silindir Yarma Dayanımı	314
6.5.3.4	Elastisite Modülü	316
6.6	Pürüzlü ve Parlak Yüzey Dokulu Bilya Örnekleri ile Hazırlanan Beton	
	Karışımları	318
6.6.1	Karışım Malzemeleri	319
6.6.1.1	İri Agregalar	319
6.6.1.2	İnce Agregalar	320
6.6.2	Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Karışımın Hazırlanması	320
6.6.3	Taze Beton Deneyleri	321
6.6.4	Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	322
6.6.4.1	Basınç Dayanımı.....	323
6.6.4.2	Eğilme Dayanımı	323
6.6.4.3	Silindir Yarma Dayanımı	324
6.6.4.4	Elastisite Modülü	326
6.7	Sonuçlar	326
BÖLÜM YEDİ - SONUÇ VE ÖNERİLER		329
KAYNAKLAR		334
EKLER		348
Ek-A Aggreganalysis Programı C++ kodları		
Ek-B Farklı Geometrik Özelliklerdeki Agregalar İçin Kanonik Diskriminat Fonksiyonu Analizi		

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Agregalar beton, asfalt, çimento ve kireç sektörlerinin ana malzemelerinden biridir. Bununla birlikte; temel tabakası, demiryolu balastı, drenaj sistemleri, zemin ıslahı, erozyon kontrol amaçlı istinat ve iksa duvarları, kaya dolgu baraj gövdesi, dalgakıran yapıları gibi inşaat sektörünün çeşitli uygulamalarında da yaygın olarak kullanılan bir malzemedir.

Kullanım alanlarının çeşitliliği göz önüne alındığında, ülkemiz gibi yüksek yapılaşma hızına sahip ülkelerde, kullanılan agrega hacminin çok büyük boyutlarda olduğunu tahmin etmek güç olmaz. Bu nedenle binalar, köprüler, havaalanları, barajlar gibi mühendislik yapılarının dayanımı ve kalıcılığı üzerinde agrega kalitesi ve özellikleri de önemli bir paya sahiptir.

Agreganın en yoğun kullanıldığı malzemelerden biri olan betonun agrega ile ilişkisini, kısaca açıklamak gerekirse:

Beton; agrega ve çimento hamuru ile bu iki bileşenin arayüzeyinden oluşan üç fazlı heterojen bir malzemedir. Agrega-çimento hamuru faz arayüzeyi, betonun en zayıf halkası olarak bilinir ve betonun kalitesi arayüzey özelliklerine oldukça duyarlıdır. Agrega-hamur arayüzeylerinde bağ çatlaklarının oluşması, betonun elastik olmayan davranışında önemli rol oynar. Toplam şekil değiştirmenin büyük bir bölümü bu arayüzeylerde oluşur ve en son göçme bağ çatlaklarının birleşmesi sonucu genellikle harçta oluşur. Ancak, agrega dayanımı bağlayıcı harç dayanımından daha düşükse, kırılma önce agregada gerçekleşecektir. Bu nedenle betonun yük taşıma mekanizması agrega özelliklerinden büyük ölçüde etkilenir.

Betonun hacimce yaklaşık %75-85'ini oluşturan agrega özellikleri, taze ve sertleşmiş betonun performansı ve maliyeti üzerinde dikkate değer etkilere sahiptir. Betonda agrega kullanılmasının sağladığı olumlu teknik özelliklerin başında; sertleşen betonun “hacim değişikliği” azaltması, sertleşmiş betonun “aşınmaya karşı dayanımını” arttırması, çevre etkilerine karşı “dayanıklılığını” arttırması ve

arttırması ve kendi dayanım gücünün yüksekliği nedeniyle betonun taşımakta olduğu yüklere karşı “dayanımı” sağlayabilmesi gelir. Diğer bir deyişle agregalar normal betonun taşıyıcı iskeletini oluşturur. Betonda kullanılan agreganın dayanıklılığı, tane şekli, tanelerin yüzey pürüzlülüğü, granülometrisi, en büyük tane boyutu, elastisite modülü, mineral yapısı, gözenekliliği, su geçirgenliği, termik genleşme katsayısı, ince malzeme oranı, temizliği gibi birçok özellik betonun mekanik özelliklerini, kalıcılığını ve hizmet kalitesini etkilemektedir.

Beton agregalarının geometrik özellikleri ile ilgili standart tanımlamalar, daha çok iri agregalarda kusurlu tane oranı ve bir veya birden fazla kırılmış yüzeye sahip agrega oranı ile sınırlıdır. Boyut, şekil, köşelilik ve yüzey dokusu gibi geometrik özellikler, agrega tanelerini tanımlamakta kullanılmaktadır. Agregaların bu özellikleri, taze betonun; işlenebilirlik, pompalanabilirlik, yerleşebilirlik, terleme ve segregasyona hassasiyet gibi özelliklerini etkiler. Sertleşmiş betonda ise; dayanım, yoğunluk, geçirgenlik, boşluk miktarı, büzülme ve sünme gibi özellikler agregaların bu özelliklerinden büyük ölçüde etkilenir. Ayrıca bütün bu özellikler betonun kalıcılığını belirleyen özellikler olup, uygun olmayan niteliklerde agrega seçimi nedeniyle kalıcılık problemleri ile karşılaşıldığı bilinmektedir.

Beton bileşenlerinin genelde sudan sonraki en ucuz bileşeni agregadır. Çimento ise karışımın en pahalı bileşenidir. Çimento hamuru, sertleşmiş betonda agregalar arasındaki boşlukları doldurarak, agregaları bir arada tutan bağlayıcı görevi görür. Ayrıca, taze beton karışımının işlenebilirliğini sağlar. Betonun çeşitli nedenlerle büzülmesi ve durabilitesi üzerinde de etkilidir. Limitler dahilinde kalacak sabit bir su/çimento (S/Ç) oranında, daha az çimento hamuru, daha kalıcı beton anlamına gelir. Agrega geometrik özellikleri, taze betonun işlenebilirliği ile su ve bağlayıcı hamuru ihtiyacı açısından da son derece önemlidir. Yüksek boşluk hacmine sahip karışımlar, istenilen işlenebilirlik değeri için daha fazla çimento hamuru gerektirir. Agregalar arasındaki boşluklar en aza indirilebilirse, bu boşlukları doldurması gereken çimento hamuru miktarı da azalacaktır. Araştırmalar göstermiştir ki, agregaların şekil, yüzey dokusu ve boyut dağılımı özellikleri ile karışımın boşluk hacmi doğrudan ilişkilidir. Kübik ve sürekli granülometrilik tanelere göre; yassı,

uzun ve kesikli granülometrilili agregat taneleri arasında daha büyük boşluk hacmi bulunur (De Larrard, 1999; Dewar, 1999).

Doğal agregat kullanılarak hazırlanan betonlar kolay işlenebilmektedir. Köşeli ve pürüzlü agregalar, yüzeylerinin daha düzensiz olmaları nedeniyle, yuvarlak ve pürüzsüz agregalara göre daha çok boşluk oluşumuna neden olurlar. Taneler arasındaki sürtünme etkisi ile taze betonun işlenebilirliğini azaltırlar. Karışımın işlenebilirliğinin düşmesi ile su ve/veya akışkanlaştırıcı katkı ihtiyacı artar. Karışıma fazla su eklenmesi dayanımda düşüşlere neden olacağından istenmeyen bir durumdur. Ancak, agregat köşeliliği ve yüzey pürüzlülüğü dolayısı ile yüzey alanı artıktıkça karışımın sadece su ihtiyacı değil, bağlayıcı hamuru gereksinimi de artacaktır. Bu açıdan değerlendirildiğinde, S/Ç oranının sabit kalması koşulu ile karışım suyu miktarındaki artış, dayanımda düşüşlere neden olmayacaktır. Bununla birlikte, agregaların mekanik kenetlenmesinin artması, üretim denetimiyle en yüksek doluluğu verecek granülometri eğrilerinin elde edilmesi ve dolayısı ile betonun yoğunluğu artar. Ayrıca kusurlu tane (yassı ve uzun taneler) oranının azaltılması ile zayıf bölge oluşumu ihtimalinin azalması ve bütün bunlara bağlı olarak geçirimsizlikte düşme beklenmelidir. Ancak bağlayıcı hamuru (dolayısı ile çimento) miktarının artması, ekonomik olarak üretim maliyetinin artmasına da neden olur. Bu nedenle, her bir özgün uygulama için en uygun özelliklere sahip agregat seçimi önem kazanmaktadır.

1.1 Agregat Şekli ve Yüzey Dokusu

Agregat şekli ve yüzey dokusu, mekanik kenetlenme etkisi ile bağ dayanımı açısından beton karışım tasarımında önemli karakteristiklerdir. Ancak, mevcut beton karışım hesap yöntemlerinde, agregat şekli ve yüzey dokusu özellikleri yeterince dikkate alınmamıştır. Yaygın olarak kullanılan karışım yöntemlerinden TS 802 “Beton karışımı hesap esasları”, karışımın su ihtiyacının hesaplanmasında, sadece hedef çökme (slump) değerini ve en büyük agregat tane boyutunu dikkate alır. Karışım hesabında agregat incelik modülü, özgül ağırlık ve birim hacim ağırlıklar karışım yoğunluğu hesabına katılmaktadır. Ancak, iki ince agregat örneği aynı incelik modülüne sahip olsalar bile, çok farklı boyut dağılımlarında ve yüzey

özelliklerinde olabilecekleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Doğal agregalara göre; kırmataş agregaların şekil, yüzey dokusu, tane boyutu dağılımı ve ince malzeme oranı gibi özellikleri göz önüne alındığında, durum çok daha karmaşık hale gelir. Beton karışım hesap yöntemleri, agregaları görsel olarak yuvarlak veya kırılmış olarak sınıflandırmakta, kullanılacak kimyasal katkıya da bağlı olmakla birlikte, karışımın su ihtiyacını basit olarak önermektedir. Bu yöntemler, yeterli işlenebilirlik için su ihtiyacının ve/veya kimyasal katkı miktarının hesaplanmasında, agrega geometrik özelliklerini dikkate almamaktadır. Bunun başlıca nedeni, agregaların gerçek şekil, yüzey pürüzlülüğü ve boyut dağılımı gibi geometrik özelliklerini belirleyecek tutarlı ve hızlı bir yöntemin olmamasıdır.

Beton agregaları ile ilgili eski standartlardan TS 706'da "agrega tanelerinin şekli olabildiği kadar toparlak (küresel, kübik) olmalıdır" ve kabul edilme kriteri olarak da TS 3814'e "Beton agregalarında tane şekli sınıfı tayini" atıf yapılarak, "şekilce kusurlu taneler (yassı ve uzun taneler) oranı 8 mm'nin üzerindeki agregalarda ağırlıkça %50'den çok olmamalıdır" şeklinde aşırı yüksek bir oran verilmiştir. Agreganın yüzey özellikleri ile ilgili ise herhangi bir kriter bulunmamaktadır. Ancak, iri agreganın yarısının kusurlu olması halinde betonun performansından söz edilemez. Avrupa Birliği'ne uyum sürecinde bu standart TS 706 EN 12620 "Beton Agregaları" olarak güncellenmiştir. Bu standartta agrega geometrik özellikleri ile ilgili olarak TS EN 933'e "Agregaların geometrik özellikleri için deneyler" uygunluk şartları aranmaktadır. TS EN 933, agrega geometrik özellikleri (akış katsayıları, yassılık indeksi, tane büyüklüğü dağılımı) ile ilgili mekanik deney yöntemlerini kapsamaktadır.

Agrega geometrik özellikleri ile ilgili diğer bazı standartlar; ASTM D4791 "İri agregalarda yassı ve uzun tane oranı için deney yöntemi", ASTM D5821 "İri agregalarda kırılmış tane yüzdesi" ve BS 812 "İri agregalar için yassılık indeksi"dir. İri agregalarda yassı ve uzun taneler, basit uzunluk ölçüm aletleri ile belirlenmektedir. Agregalarda tek tek yapılan ölçümlerin uzun zaman alması nedeniyle, az sayıda örnek üzerinde çalışılmaktadır. Beton agregaları için bu tanımlamalar yetersiz olup, iri ve ince agregalar için daha kapsamlı tanımlamaların yapılması gerekmektedir.

Son yıllarda, özellikle Üniversitelerin yol malzemeleri laboratuvarlarında, agrega geometrik özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. Bu araştırmalar sonucu bazıları standart yöntem haline gelmiştir. Bunlar arasında ASTM C1252 “İnce agregaların şekil ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı sıkışmamış boşluk oranı deney yöntemi”, AFNOR P18-564 “İnce agrega köşeliliği ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı akma oranı” ve bu standartın Avrupa Birliği’nce kabul edilen ve iri ve ince agregalar için tanımlanan EN 933-6 “Agrega geometrik özelliklerinin belirlenmesi için deney yöntemleri-Akış katsayıları” sayılabilir. Ülkemizde, Avrupa Birliğine uyum amacı ile EN 933-6 standardı, 2003 yılında TS EN 933-6 olarak kabul edilmiştir. Bu yöntemler iri ve/veya ince agrega şekil ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerini belirlemede kullanılan standart yöntemlerdir. Bu yöntemlere alternatif hızlı ölçüm yöntemleri olarak geliştirilmekte olan bazı önemli deneysel çalışmalardan Bölüm 2 “Literatür İncelemesi” de ayrıntılı olarak söz edilecektir.

Agregaların şekil ve yüzey dokusu gibi geometrik özelliklerinin daha etkin bir yöntemle belirlenmesi ile daha yüksek kaliteli beton üretimi mümkün olacaktır. Bu amaca yönelik olarak, ihtiyaca uygun özelliklerde agrega seçimi gündeme gelecektir. Bu durum, aynı zamanda agrega üretiminde eş zamanlı kontrol yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılacaktır. Hızlı ve güvenilir sonuçlar verecek yöntemlerin, kırılacak kayacın cinsine göre, kübik şekil özelliklerini verecek kırma yöntemi/kırıcı tipinin seçimi ve kalite kontrolünde de kullanılacağı düşünülmektedir. Agreganın şekli ve yüzey dokusu özelliklerinin daha iyi belirlenip matematiksel olarak ifade edilebilmesi, beton karışım hesaplarının daha gerçekçi yapılmasına da olanak sağlayacaktır.

1.2 Amaç ve Kapsam

Doğal agrega kaynakları giderek tükenmekte ve kullanımı kısıtlanmaktadır. Bu nedenle standartlara uygun, temiz, kaliteli agregaların temini gittikçe güçleşmektedir. Günümüzde tüketimi gün geçtikçe artan kırmataş malzemesini üreten firmaların kaliteli, istenen özellikte agrega üretimi konusunda bilgi ve deneyimleri kısıtlıdır. Çok azının standartlara uygunluk belgesi, uygun donanımı

ve nitelikli personeli bulunmaktadır. İstisnalar dışında agrega üreticilerinin 01.01.2007 tarihinde yürürlüğe giren Yapı Malzemeleri Yönetmeliği'ne göre zorunlu CE belgesi bulunmamaktadır. Bu durum, kontrolsüz üretilen agreganın kullanıldığı beton performansını etkilediği gibi, bilinçsiz üretim yöntemleri ve üretim atıkları sonucu çevreyi de tahribata uğratmaktadır.

Malzeme kalitesinin büyük oranda ilave maliyetlere neden olmadan artırılması, doğal kaynakların verimli bir şekilde kullanılması ve aynı kaynaklarla daha dayanıklı beton üretilmesi ihtiyacı, bu konuda yapılacak çalışmaların önemini ortaya koyar. Beton kalitesinin iyi olması, agrega-çimento hamuru arayüzeyinin yapısı ile doğrudan ilgilidir. Bağ mukavemetinin iyileştirilmesi, betonun mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilemekle beraber, çevresel faktörlere karşı da dayanıklılığını artırır. Bu nedenle çalışma kapsamında, agreganın üretim kalitesini denetleyecek bir yöntem geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu amaçla, öncelikle standart yöntemlerin ve gelişme aşamasında olan mevcut yöntemlerin bir değerlendirilmesi yapılarak eksik yönleri ortaya konulmuştur. Daha sonra, ince ve kaba agregaların geometrik özelliklerini belirlemek amacı ile 2 boyutlu ve 3 boyutlu görüntü alma sistemlerinin geliştirilmesi, alınan görüntülerin işlenmesi ve gerekli şekil ve doku (yüzey pürüzlülüğü) özniteliklerinin çıkarılması hedeflenmiştir.

Günümüzde, iri ve ince agrega geometrik özelliklerini belirlemek amacı ile kullanılan standart yöntemler, laboratuvar koşullarından ve bireysel hatalardan büyük ölçüde etkilenen dolaylı ölçüm yöntemleridir. Ayrıca zaman alıcı olan bu deney yöntemleri, agrega özelliklerini iyi bir şekilde tanımlayamamaktadır. İkinci bölümde ayrıntılı olarak açıklanan bu yöntemler, agreganın serbest düşme ile doldurduğu kaptaki boşluk hacmi veya bir huniden akış süresini esas alan yaklaşım yöntemleridir. Agreganın şekil ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerini ayrı ayrı ifade edemezler. Deneysel çalışmalar, agrega birim hacim ağırlığının (BHA) belirlenmesini gerektirmektedir. Ayrıca elek analizi, yıkama, kurutma işlemleri nedeniyle numune hazırlama süresi uzun ve zahmetlidir. İşlem sayısının fazla olması, bireysel hata yapma olasılığını da arttırmaktadır. Standart yöntemlerden

kaynaklanan bu eksiklikler, agrega geometrik özelliklerinin beton performansı üzerindeki etkilerinin tespit edilmesini de olanaksız kılmaktadır. Bu gibi olumsuzlukların giderilmesi açısından, görüntü analiz yöntemleri agrega geometrik özelliklerini belirlenmesi amacıyla kullanılabilir. Bilgi teknolojilerindeki ilerlemelere bağlı olarak, agregaların karakterize edilmesinde daha hızlı ve etkili yöntemlerin geliştirilmesi için umut verici çalışmalar yapılmaktadır.

Günümüzde kullanılan bilgisayar destekli görüntü analiz teknikleri, yeni işlemci ve yazılımların geliştirilmesi ile birlikte, giderek daha çok alanda uygulama imkanı bulmaktadır. Bu teknikler, agrega tane boyutu ve/veya geometrik düzensizliklerinin belirlenmesinde hızlı ölçüm yöntemleri olarak da güncellik kazanmaktadır. Pratik ve daha objektif değerlendirmeler yapabilmek amacıyla, farklı matematiksel modeller ve algoritmalar kullanan görüntü alma ve analiz yöntemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bu yöntemler Bölüm 2’de ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Ancak, agrega gibi geometrik olarak düzensiz olan tanelerin, şekil ve yüzey dokusu özelliklerini doğrudan matematiksel ifadelerle tanımlamak için geliştirilmiş, uluslararası kabul gören pratik bir yöntem ise henüz bulunmamaktadır.

Bu nedenle çalışmanın öncelikli amacı; iri ve ince agrega tane şekli, yüzey dokusu ve boyut dağılımı özelliklerini objektif olarak değerlendirecek, güvenilir, hızlı ve ekonomik bir yöntem geliştirmektir.

Çalışmanın kapsamı genel olarak aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

- Agregalarda farklı şekil ve yüzey dokusu çeşitliliğini sağlamak amacıyla, farklı kırıcı tipleri ile kırılmış kalker ve doğal agrega kaynaklarının araştırılması ve örnekleme yapılması,
- Agrega geometrik özelliklerinin görüntü analizleri ile belirlenmesi amacıyla öncelikle standart mekanik yöntemlerinin değerlendirilmesi, eksik ve olumsuz yönlerinin ortaya konması,

- Agregaların dokusal özelliklerinin incelenmesi ve bu özelliklerden çıkartılan özniteliklerin görüntü analizi yazılımına dahil edilmesi,
- İki boyutlu (2B) agrega görüntülerinden, tanelerin geometrik özelliklerinin (yuvarlaklık, dış merkezlik, konkavlık, köşelilik) değerlendirilmesine imkan tanıyan görüntü analiz yazılımının (C++ programlama dilinde) geliştirilmesi,
- Geliştirilen yazılımın kolay kullanılabilir olması amacıyla “kullanıcı arayüzü” geliştirilmesi,
- Geliştirilen arayüze; agrega geometrik özellikleri istatistiklerinin (ortalama, standart sapma, tane sayısı, en küçük ve en büyük değerler, eşik değer, eşik değer altında ve üstünde kalan yüzdeler vb.) otomatik olarak hesaplanması, histogramların çizilmesi, analiz sonuçları ve istatistiksel verilerin ayrı ayrı dosyalar olarak bilgisayar hafızasına kaydedilmesi vb. fonksiyonların eklenmesi.
- Derinlik bilgileri içeren üç boyutlu (3B) görüntü alımına imkan tanıyacak görüntüleme düzeneklerinin (Stereo sistem, Lazer kameralı sistem, Sanal aynalı sistem) geliştirilmesi,
- Şekil ve yüzey dokusu özellikleri için en iyi başarı oranını sağlayan “sınıflandırıcı program” ve “kullanıcı arayüzü” tasarımı,
- Geliştirilen sistemlerin ve literatürde son zamanlarda geliştirilen sistemlerin; güvenilirlik, donanım, maliyet, otomasyon, uygulama kolaylığı ve zaman açısından değerlendirilmesi,
- Agrega geometrik özelliklerinin çimento harcı ve betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin mertebesini araştırmak amacıyla, ince ve kaba agrega örneklerinin hazırlanması, standart mekanik deneyler ve görüntü analizlerinin yapılması,
- Çimento harcı ve beton deneylerinin yapılması, beton örneklerinden alınan parlak kesitlerde SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizi ve deney sonuçlarının değerlendirilmesi.

1.3 Çalışma Planı

Çalışma ilk bölüm olan “Giriş” ile birlikte toplam yedi bölümden oluşmaktadır:

İkinci Bölümde; literatür bilgileri ışığında öncelikle agregası şekli ve yüzey dokusu tanımlamaları yapılmıştır. Agregası geometrik düzensizliklerinin belirlenmesi ve bu düzensizliklerin taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisine yönelik olarak bugüne kadar yapılmış çalışmaların kısa özetleri verilmiştir. Daha sonra, agregası ince ve iri agregaların şekil ve yüzey pürüzlülüklerini belirlemede kullanılan standart deney yöntemleri değerlendirilerek, standartlarda eksik olduğu düşünülen yönler dikkat çekilmiştir. Betonda arayüzey yapısı ve agregası ile bağlayıcı hamuru arasındaki bağ kuvveti ve agregası geometrik özelliklerinin bu bağ üzerindeki fonksiyonu açıklanmaya çalışılmıştır.

Üçüncü Bölümde, gelişmekte olan görüntü analiz yöntemleri açıklanmıştır. Görüntü alma, işleme ve analiz adımları detayları ile verilerek inşaat mühendislerine uzak bir çalışma alanı olan görüntü analiz işlemlerinin daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır. Agregası geometrik düzensizliklerinin belirlenmesinde görüntü analizlerini esas alan niceliksel yöntemler ile ilgili çalışmalar değerlendirilerek, daha etkin ve ekonomik bir alternatif yöntem geliştirilmesi amacıyla yapılan çalışmalar detayları ile açıklanmıştır.

Dördüncü Bölümde, kırma işleminin evreleri, kırma yöntemleri ve kırıcılar hakkında kısa bilgiler verilmiştir. Kırılacak malzeme özellikleri, kapasite, toz oranı, enerji tüketimi vb. özelliklerine göre, kırıcı tipi seçiminde dikkat edilecek hususlar sıralanmıştır. Daha sonra, kusurlu malzeme oranı düşük ve kübik şekilli agregası üretimi amacıyla kullanılabilecek uygun kırma yöntemi ve kırıcı tipleri önerilmiştir.

Beşinci Bölümde, agregası geometrik özelliklerinin belirlenmesine yönelik olarak yapılan çalışmalar açıklanmıştır. Bu çalışmalar 2 ana başlık altında toplanmıştır:

- Öncelikle, deneysel çalışmalarda kullanılacak agregaların temini açısından yapılan araştırmalar, agrega örneklemelerinin yapılması ve mekanik deney sonuçları değerlendirilmiştir. Farklı kırıcılarla kırılan ince ve iri agrega örneklerinde kırma yönteminin etkisi, agrega şekli ve/veya yüzey pürüzlülüğünü belirlemede kullanılan standart yöntemlerle değerlendirilmiştir. Ayrıca, farklı mineralojik köklerdeki agregaların geometrik düzensizliklerindeki farklılıklar ortaya konmaya çalışılmıştır. Çalışmalarda, referans olarak kullanılacak köşeli, yuvarlak, yassı, uzun ve biçimsiz agregalarda yapılan analiz sonuçları, herhangi bir agrega için sınıflandırma ile kusurlu malzeme yüzdesinin belirlenmesi amacı ile kullanılmıştır.
- Agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerini belirleyebilmek amacı ile, zaman alıcı ve sonuçları tartışmalı olan mevcut standart yöntemlere alternatif olabilecek görüntü analiz yöntemleri üzerinde durulmuştur. İki ve üç boyutlu görüntü alma sistemlerinin kurulumu, görüntü analiz adımları ve elde edilen sonuçların istatistiksel analizi standart yöntemlerle belirlenen agrega geometrik özelliklerinin, görüntü analiz yöntemleri ile elde edilen sonuçlarla uyumlu olup olmadığı değerlendirilmiştir. Yöntemlerin birbirlerine göre üstünlükleri ortaya konmaya çalışılmıştır.

Altıncı Bölümde, görüntü analiz çalışmalarına ek olarak şekil ve yüzey pürüzlülükleri açısından sınıflandırılan az sayıda agrega örneği ile çimento harcı ve beton deneyleri yapılmıştır. Sistematiik olmayan deneylerden elde edilen sonuçlar, agrega geometrik düzensizliklerindeki değişimin, betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin mertebesi belirlemek amacıyla yapılmıştır.

Yedinci ve son bölümde, çalışmanın kısa bir özeti yapıldıktan sonra elde edilen genel sonuçlar irdelenmiş ve gelecekte yapılacak çalışmalar için öneriler verilmiştir.

BÖLÜM İKİ

LİTERATÜR İNCELEMESİ

Bu bölümde, agregâ geometrik özelliklerinin betonun mekanik özelliklerine etkisinin belirlenebilmesi amacı ile günümüze kadar yapılan çalışmalar aşağıda belirtilen konu başlıkları altında incelenmiştir:

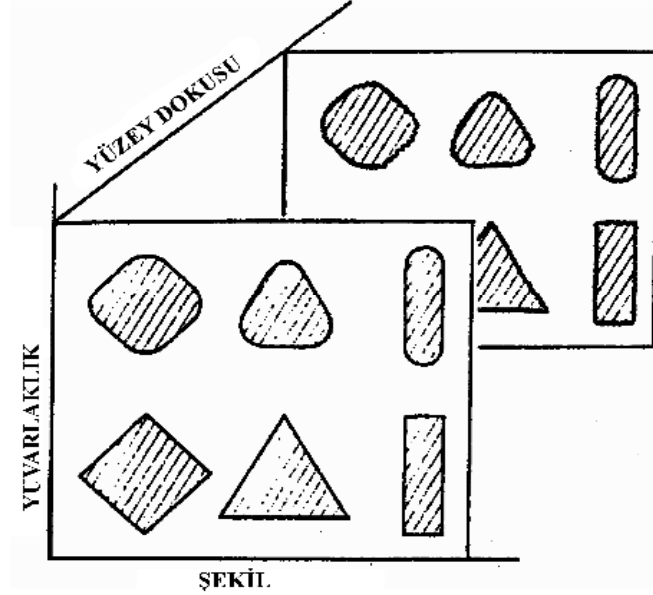
- Agregâ şekli ve yüzey yapısı tanımlamaları,
- Agregâ geometrik düzensizliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar,
- Agregâ şekli ve pürüzlülüğü ile ilgili standart deney yöntemleri,
- Agregâ geometrik düzensizliklerinin belirlenmesinde görüntü analiz yöntemlerinin kullanılması,
- Agregâ geometrik düzensizliklerinin taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisi,
- Agregâ-bağlayıcı hamuru arayüzeyi

2.1 Agregâ Şekli ve Yüzey Yapısı Tanımlamaları

Agregâ geometrisi çok karmaşıktır ve basit deneylerle tam olarak açıklanamazlar. Bir tanenin geometrisi çok karmaşık bir tanımlama gerektirir. Bu nedenle bazı sadeleştirmeler yapılmalıdır. Bu amaçla “**şekil**” tanımı iki farklı karakteristik olan küresellik ve yüzey yapısının birleşimi olarak ele alınır. Küresellik, tanenin üç ana boyutu; uzunluk (L), genişlik (W) ve yükseklik (H) arasındaki ilişkiye bağlıdır. Yüzey yapısı ise, tane yüzey dokusu ve pürüzlülüğünün göstergesidir (Brzezichi ve Kasperkiewicz, 1999).

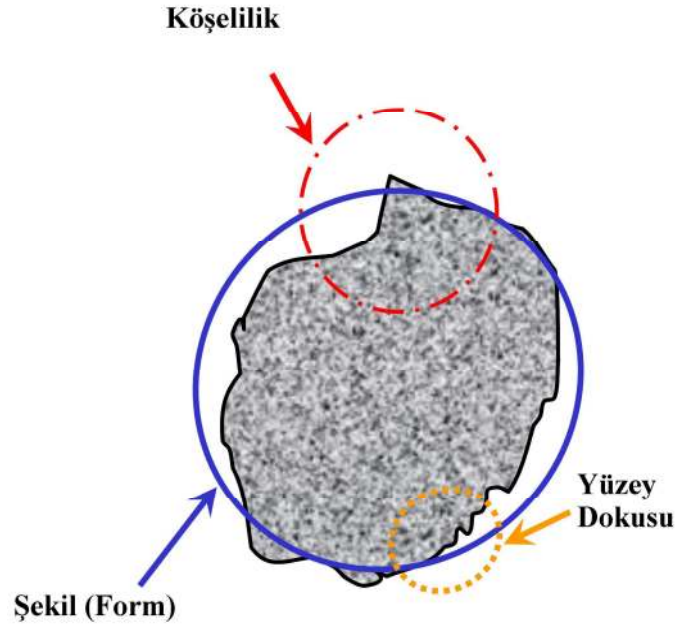
Agregaların şekil, köşelilik ve yüzey dokusu gibi fiziksel özelliklerini karakterize eden düzensizlikler genel olarak; şekil (form), köşelilik (veya yuvarlaklık), ve yüzey

dokusu olarak ele alınır (Şekil 2.1). Genel kabul gören bu düzensizlikler, birbirlerini etkilemeksizin geniş bir aralıkta değişebildiklerinden birbirlerinden bağımsızdırlar (Freeman ve Kuo, 1999). Genel olarak bu karakteristikler “geometrik düzensizlikler” olarak adlandırılır.



Şekil 2.1 Agregaların şekil (form), köşelilik (yuvarlaklık), ve yüzey dokusu özelliklerinin yalın olarak bağımsız doğrusal boyutlar yardımı ile gösterilmesi (Kuo ve Freeman, 2000).

Kuo ve Freeman (2000) tarafından Şekil 2.1’de bağımsız doğrusal boyutlar yardımı ile gösterilen şekil, yuvarlaklık ve yüzey yapısının bir agrega tanesi üzerindeki gösterimi ise Şekil 2.2’deki gibidir. Bu şekilden anlaşıldığı üzere; şekil tanenin bütünü temsil eder. Yuvarlaklık, tane köşelerinin açıları ile ilgilidir. Yüzey yapısı ise tanenin yüzey dokusu ve pürüzlülüğünün bir ölçüsüdür.

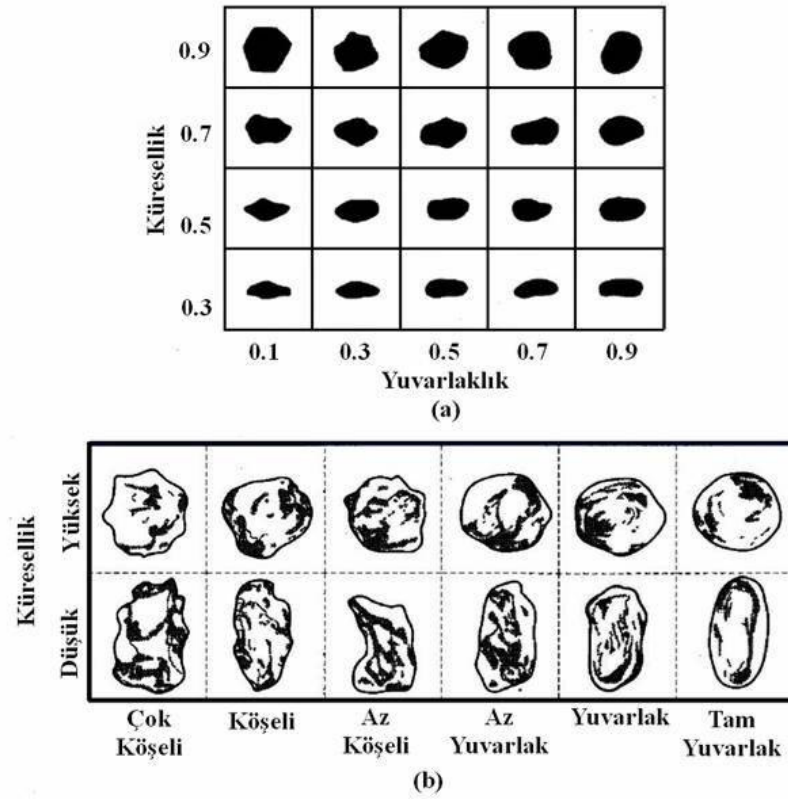


Şekil 2.2 Agregat tanesinin şekil (form), köşelilik ve yüzey dokusu özellikleri.

Literatürde agregat tane şekli ve yüzey yapısı ile ilgili birçok farklı tanımlama yapılmaktadır. Bunlar, bazen örnek şekiller ve karşılaştırma tabloları halinde, bazen de matematiksel ifadelerle açıklanmıştır.

2.1.1 Agregat Tane Şekli Sınıflaması

Granüler tanelerin şekilleri, örnek şekil ve karşılaştırma tabloları ile sınıflandırılmıştır. Bunlardan Powers (1953) ve Krumbein (1963)'a göre agregat tane şekli sınıfları Şekil 2.3'de görüldüğü gibidir (Ahn, 2000). Şekil 2.3 (a)'da agregat şekli tanelerin küresellik ve yuvarlaklığına göre, Şekil 2.3 (b)'de ise geometrik yapılarına göre sınıflandırılmıştır. Herhangi bir agregat tanesinin bu sınıflardan hangisine benzediği görsel olarak karşılaştırılmak sureti ile şekline karar verilir.



Şekil 2.3 Tane şekil tanımlamaları (Ahn, 2000).

Agrega şekli ile ilgili tanımlayıcı terimler, ASTM D2488 “Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure)”de Tablo 2.1’deki gibi verilmiştir. Agregaların diğer bir tane şekli sınıflandırması ise BS 812 Part 1 “Testing aggregates. Methods for determination of particle size and shape”de Tablo 2.2’deki gibi verilmiştir.

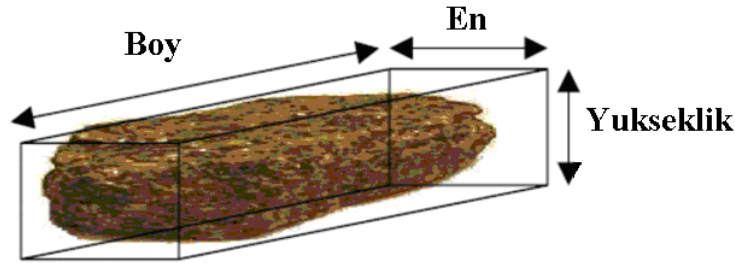
Tablo 2.1 Agregatane şekli tanımlayıcı terimleri (ASTM D2488 ; Neville, 1995)

Köşeli	Çok sayıda kırılmış yüzey, keskin hatlar
Az köşeli	Kübik
Az yuvarlak	Yüzey düzensizlikleri mevcut, keskin olmayan hatlar
Yuvarlak	Yüzey eğrilikleri mevcut
Tam yuvarlak	Kırılmış yüzey yok

Tablo 2.2 Agregatane şekli sınıfları (BS 812, 1975)

Tane Şekli	Açıklamalar	Örnekler
Yuvarlak	Su ve hava tesirinin oluşturduğu sürtünme nedeniyle yuvarlaklaşmışlardır.	Nehir ya da deniz kıyısı çakılları, çöl, deniz ve rüzgarların serpiştirdiği kumlar
Şekilsiz	Doğal şekilsizdirler veya sürtünme nedeniyle biraz şekillidirler.	Diğer çakıllar, kum veya adi çakmak taşları
Köşeli	Pürüzlü düzlemsel yüzeylerin kenarlarda kesiştiği bir yapıdır.	Kırılmış kayaçların bütün çeşitleri, yamaç molozu, camsı cüruf
Yassı	Agrega kalınlığının diğer iki boyutuna göre küçük olduğu agregalardır.	Tabakalı kayaç
Uzun (Prizmatik)	Genellikle köşeli ve bir boyutun diğer iki boyuttan fark edilebilir şekilde büyük olan agregalardır.	Tabakalı kayaç
Yassı ve Uzun	Tane uzunluğunun eninden ve enin bariz şekilde kalınlıktan daha büyük olduğu agregalardır.	Tabakalı kayaç

Galloway (1994) ise agregatane şeklini; küresellik, biçim ve yuvarlaklık olarak üç farklı karakteristik ile tanımlamaktadır. **Küresellik**, bir tanenin üç farklı aksının ya da boyutunun ne derece eşdeğer olduğunun bir ölçüsüdür. **Biçim**, tanenin uzun, orta ve kısa aks boyutları arasındaki oranları esas alan, üç boyutu arasındaki ilişkinin bir ölçüsüdür. Şekil 2.4 de görüldüğü üzere, tanenin başlıca boyutları boy (U), en (O), yükseklik (K) ise küresellik Denklem 2.1'deki gibidir.



Şekil 2.4 Agregatanesinin başlıca boyutları (Kim, 2002)

$$Küresellik = \sqrt[3]{\frac{K \times O}{U^2}} \quad (2.1)$$

Wadell (1935) küreselliği “tane ile eşdeğer hacme sahip küre çapının, taneyi çevreleyen en küçük kürenin çapına oranı” olarak tanımlamıştır. Krumbein (1991) bu

tanımı biraz geliştirerek; taneyi çevreleyen en küçük küre çapı yerine elipsoidin 3 farklı aks uzunluğunu esas almıştır.

Form, aynı zamanda “**şekil faktörü**” olarak da tanımlanır ve aynı küreselliğe sahip taneleri birbirinden ayırt etmekte kullanılır (Hudson, 1999; Mora ve Kwan, 2000). Aschenbrenner (1956)’e göre şekil faktörü; tanenin başlıca boyutları (uzun, orta, kısa) arasındaki ilişki ile tanımlanabilir (Denklem 2.2). Bu denkleme göre, küreselliğin 1’den büyük değerleri arttıkça uzunlaşan tane şeklini, 1’den küçük değerleri ise azaldıkça yassılaştıran tane şeklini ifade eder.

$$\text{Şekil.Faktörü} = \frac{UxK}{O^2} \quad (2.2)$$

Küresellik ve şekil faktörü tanımlamalarına rağmen, agrega şeklinin daha iyi tanımlanabilmesi için, “**Uzunluk faktörü**” (Denklem 2.3) ve “**Yassılık faktörü**” (Denklem 2.4) gibi iki değişken daha tanımlanmıştır (Aschenbrenner, 1956; Kuo, Rollings ve Lynch, 1998).

$$\text{Uzunluk Faktörü} = \frac{O}{U} \quad (2.3)$$

$$\text{Yassılık Faktörü} = \frac{K}{O} \quad (2.4)$$

Küresellik ve form ile ilgili yapılan tanımlarda, taneler nitel olarak **kübik**, **küresel**, **yassı** ve **uzun** olarak sınıflandırılabilir. Kwan ve Mora (2001)’ya göre, bunlardan başka **yuvarlaklık** ve **köşelilik** olmak üzere iki farklı karakteristik daha vardır.

Yuvarlaklık, tane çevresinin (Ç) karesinin, alanının (A) 4Π katına oranı olarak tanımlanır (Denklem 2.5) (Kwan ve Mora, 2001). Bu durumda tam bir dairenin yuvarlaklığı 1,00’e eşit olacaktır.

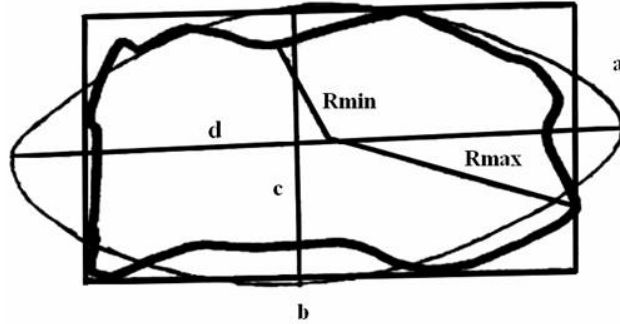
Yuvarlaklık, tane çevresinin uzunluğuna bağlı olduğundan, yüzey pürüzlülüğünden etkilenir. Aynı alana sahip iki agrega tanesi için, pürüzlülüğü fazla olanın yuvarlaklık oranı daha büyüktür ve 1,00'den uzaklaşır (Dilek, 2000).

$$\text{Yuvarlaklık} = \frac{C^2}{4 \pi A} \quad (2.5)$$

Kuo ve diğer. (1998) bu tanımda pay ve paydanın yerlerini değiştirerek form faktörü olarak tanımlamıştır.

Köşelilik, tanenin kenar ve köşelerinin keskinliği ile ilişkilidir. Köşelilik; sayısal olarak tanenin köşe ve kenarlarının ortalama eğrilik yarıçaplarının (r_i), tane içine yerleştirilebilecek en büyük dairenin yarıçapına (R) oranı ile tanımlanır (Denklem 2.6) (Kwan ve Mora, 2001). Burada N tane köşelerinin sayısıdır.

$$\text{Köşelilik} = \sum \frac{\left(\frac{r_i}{R} \right)}{N} \quad (2.6)$$



Şekil 2.5 Köşelilik ölçüleri (Dilek, 2000)

Agrega şekil karakteristikleri ile ilgili yapılan diğer bazı tanımlamalar;

Cephe oranı, en genel olarak ile iki boyutlu bir şeklin uzun ve kısa boyutlarının oranı olarak tanımlanmaktadır. Agregalar gibi biçimsiz taneler için ise; tane

çevresine çizilen eşdeğer alanlı elipsin en büyük aksının (d) en küçük aksına (c) oranıdır (Şekil 2.5) (Dilek, 2000).

$$\text{Cephe Oranı} = \frac{d}{c} \quad (2.7)$$

Kabalık (Rugosite), Dilek (2000) tarafından tanımlanmış olup; tane çevresinin, taneyi içine alan en küçük dikdörtgen çevresine olan oranı olarak tanımlanır. Rugosite, yüzey şekli ve pürüzlülüğünün bir ölçüsüdür. Kübik ya da dikdörtgen şekilli tanelerin, düzgün dikdörtgen görünüşlerinin çıkarılması için uygundur.

$$\text{Rugosite} = \frac{\text{Ç}}{2(a + b)} \quad (2.8)$$

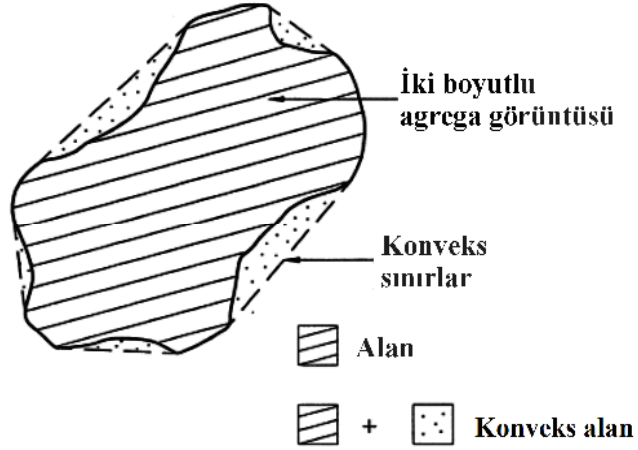
Yarıçaplar Oranı, Dilek (2000) tarafından tanımlanmış olup; tanenin merkezinden çevresine çizilebilen en büyük ve en küçük yarıçaplar arasındaki oran olarak tanımlanır. Yüksek dereceden düzgün olmayan bir tane, çok küçük bir yarıçapa sahip olacaktır ve yarıçaplar oranı da artacaktır.

$$\text{Yarıçaplar Oranı} = \frac{R_{maks}}{R_{min}} \quad (2.9)$$

Dikdörtgen Alanı (DA, %), Tane alanının taneyi çevreleyen en küçük dikdörtgen alanına oranı olarak tanımlanır.

$$\text{DA, \%} = \frac{A}{axb} \quad (2.10)$$

Konkavlık, tane alanının (A), taneyi çevreleyen konkav alanına (KA) oranı olarak tanımlanır (Şekil 2.6). Janoo (1998) konkavlığı pürüzlülük olarak isimlendirmektedir.



Şekil 2.6 Konkavlık

$$\text{Konkavlık} = \frac{A}{KA} \quad (2.11)$$

Agrega tane şekli ile ilgili tanımlamaların özeti Tablo 2.3’de verilmiştir. Bu tanımlardan görüldüğü üzere, tanelerin karakterize edilmesinde ilk 4 tanım, çok sayıda agreganın başlıca üç boyutunun ölçülmesi ile elde edilebilir. Ancak, laboratuvar ortamında çok sayıdaki tanenin manüel olarak ölçülmesi pratik değildir. Ayrıca, diğer şekil tanımları için çevre ve/veya alan ölçümleri, eğrilik yarıçapları gibi manüel olarak yapılması mümkün olmayan ölçümler olduğundan, tane şekli ile ilgili bu tanımların yapılabilmesi için hızlı ve güvenilir yöntemlere ihtiyaç olduğu açıktır.

Tablo 2.3 Görüntü analizleri için agrega şekil sınıfları

Geometrik özellik	Matematiksel tanım	Referans
Küresellik	$\sqrt[3]{\frac{Yükseklik \times En}{Boy^2}}$	Galloway (1994)
Şekil faktörü	$\frac{Boy \times Yükseklik}{En^2}$	Hudson (1999). Aschenbrenner (1956)
Uzunluk faktörü	$\frac{En}{Boy}$	Aschenbrenner (1956) Kuo ve diğer. (1998)
Yassılık faktörü	$\frac{Yükseklik}{En}$	Aschenbrenner (1956) Kuo ve diğer. (1998)
Yuvarlaklık	$\frac{Çevre^2}{4 \pi \times Alan}$	Kwan ve Mora (2001)
Form faktörü	$\frac{4 \pi \times Alan}{Çevre^2}$	Kuo ve diğer. (1998)
Köşelilik	$\sum \frac{\left(\frac{Ort.Eğr. r}{Rmaks} \right)}{N}$	Kwan ve Mora (2001)
Cephe oranı (Tane çevresine çizilen elipsin)	En küçük aks/En büyük aks	Dilek (2000)
Kabalık	$\frac{Çevre}{2 (dikdörtgen eni + boyu)}$	Dilek (2000)
Yarıçaplar Oranı,	$\frac{Enbüyük yarıçap}{Enküçük yarıçap}$	Dilek (2000)
Dikdörtgen Alan oranı	$Alan / Enküçük dikdörtgen alanı$	Dilek (2000)
Konkavlık	$Konkav Alan / Alan$	Garboczi (2002)
Konvekslik	$Alan / Konveks Alan$	Qwin® Image Analysis

2.1.2 Agrega Yüzey Yapısı Sınıflaması

Agrega yüzey yapısı, tane şeklinden bağımsız olarak, yüzey pürüzlülüğünün bir ölçüsüdür. Tanenin yüzey dokusu ya da pürüzlülüğü, agreganın mineralojik doğasında olan ve ana kayanın kırılmasından kaynaklanan özelliklerin bütünüdür. Agregayı oluşturan minerallerin dokusuna ve hava koşullarından etkilenmesine bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Dilek (2000)'e göre kabalık ve birim alandaki agrega yüzey alanı değerleri pürüzlülüğü belirlemekte kullanılabilir. Bununla birlikte, agrega tane şekli tanımlarından da görüleceği üzere, yuvarlaklık tane yüzey pürüzlülüğünden etkilenmektedir. Bu nedenle, şekil özellikleri aynı olan tanelerin pürüzlülükleri, yuvarlaklık değerlerine bağlı olarak sınıflandırılabilir. Ancak, agregalar gibi çok farklı şekil özelliklerinde olabilen taneler için farklı yüzey dokusu sınıflandırmaları gerekmektedir.

Tablo 2.4'de agregalar yüzey dokusu açısından sınıflandırılmışlardır (Uğurlu, 2002). Kaba bir yaklaşımla, yukarıdan aşağıya inildikçe çimento harcı ile mekanik bağlanmanın artacağı söylenebilir.

Son zamanlarda modern veri toplama ve işleme sistemleri hızlı bir gelişim süreci içerisinde. Görüntüler fotoğraf makineleri, video kameralar, lazer tarama cihazları, X-ray tomografi cihazları kullanılarak dijital hale getirilip, fraktal boyut analizi (Mora, Kwan ve Chan, 1998), Fourier analiz (Durney, 1983), Dalgacık dönüşümleri (Kim, 2002), küresel harmonik fonksiyonlar (Garboczi, 2002) gibi matematiksel algoritmalar kullanılarak işlenebilirler. Böylece, agrega tanelerinin şekil indeksi, köşelilik ve yüzey pürüzlülüğü gibi geometrik düzensizlikleri belirlenebilir. Tanelerin yüzey alanları sayısal stereoloji kullanılarak elde edilebilir (Barksdale, ve diğer., 1991).

Tablo 2.4 Agrega yüzey dokusu sınıflaması (BS 812, 1975)

Yüzey Dokusu	Özellikler	Örnekler
Camsı	Konkoidal kırılma sonucu yüzeyler camsı	Siyah çakmaktaşı, obsidiyen, camsı cüruf
Pürüzsüz (Düzgün)	Tabakalı kayaların kırılması sonucu ya da yüzeylerin doğal etkilerle aşınması sonucu ortaya çıkarlar.	Çakıl, çört, sleyt, mermer ve bazı riolitler
Taneli	Yüzeydeki keskin köşelerin kırılarak üniform şekilde yuvarlaklaşması sonucunda oluşmuş yüzeylerdir.	Kumtaşı, oolit
Pürüzlü	Yapısında zorlukla görebilen, orta ve ince mineral taneli kayaların kırılması sonucu ortaya çıkan yüzeylerdir.	Bazalt, felsit, porfir, kireçtaşı
Kristalin (Kristalli)	Yapısında kolayca görülebilen kristal tanecikleri vardır.	Granit, gabro, gnays
Peteksi	Yüzeyde gözle görülebilen boşluklar ve oyuklar vardır	Tuğla, sünger taşı, köpük, cüruf, klinker, genişletilmiş kil

Masad (2002)'a göre pürüzlülük, bir görüntüdeki piksel değerlerinin gri skaladaki bölgesel yoğunluk değişimleri ile tanımlanır. Bu nedenle Dalgacık Dönüşümü (Wavelet Transform), görüntüdeki dokusal değişimlerinin çoklu analizi için de kullanılmıştır. Orijinal görüntü, gittikçe azalan şekilde düşük çözünürlüklü görüntülere ayrıştırılmıştır. Sonuçta, hassas yoğunlukta değişim bilgileri içeren görüntüler elde edilerek, daha kaba ya da daha küçük dokular tanımlanabilmektedir.

Günümüzde, bu düzensizlikleri ayrı ayrı belirlemeye yarayan hızlı ve güvenilir bir yöntem mevcut değildir. Bununla birlikte, son yıllarda bu konuda yapılan çalışmalar yoğunluk kazanmıştır.

2.2 Agrega Geometrik Düzensizliklerinin Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar

Agrega geometrik düzensizliklerini belirlemeye yarayan yöntemler; mekanik (dolaylı) ve görsel (doğrudan) yöntemler olarak iki ana gruba ayrılmıştır.

2.2.1 Mekanik Yöntemler

Mekanik yöntemler, geometrik düzensizliklerin agregaların kütle özelliklerinin bir fonksiyonu olduğu ve genellikle agregaların boşluk karakteristiklerinin agrega tanelerinin yapısal karakteristiklerini ifade ettiği esas üzerine kurulmuştur (Hossain, Parker ve Kandhal, 2000).

Agregaların geometrik düzensizliklerini belirlemek üzere ilk çalışmalar karayolu araştırmacıları tarafından yapılmıştır. Üniversitelerin Ulaştırma anabilim dalları ve karayolu ile ilgili devlet kuruluşlarının, Fransa’da “Gyratory Shear Press – Yoğurmalı Pres” yönteminin ve Amerika’da Superpave “Superior Performing Asphalt Pavements – Üstün performanslı asfalt kaplamalar” tasarım sistemlerinin geliştirilmesi sırasında yaptıkları çalışmalar sonucu ortaya çıkan ve standart deney yöntemleri haline getirilen bu çalışmalar, halen gelişme sürecindedir.

Agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğü ile ilgili ilk standart yöntem, 1962 yılında ABD’de Huang tarafından geliştirilen ve 1981 yılında revize edilen ASTM D3398 “Index of aggregate particle shape and texture - Agregatane şekli ve dokusu indeksi” dir. Daha sonra Fransa’da LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) laboratuvarlarında geliştirilen AFNOR P18-564 “Determination of flow rate of fine aggregate – İnce agregaların akış oranının belirlenmesi” standart yöntemi geliştirilmiştir. Yöntem, belirli tane dağılımlarında ince agregaların hacmi belli bir huniden belirli bir yükseklikten akma hızının, tanelerin şekil ve yüzey pürüzlülüğü ile ilgili olduğu esasına dayanmaktadır.

ASTM D4791 “Standard test method for flat particles, elongated particles or flat and elongated particles” iri agregalar için yassı taneler, uzun taneler ve hem yassı hem uzun taneler belirlenmesinde kaliper yöntemini tarif etmektedir.

ASTM D5821 “Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate” iri agregalarda kırılmış tane yüzdesinin hesaplanması için standart deney yöntemini tanımlamaktadır. Bu standartla birlikte, agregalarda ilk defa kırılmış yüzey ve köşelilik kavramı ortaya çıkmıştır.

ICAR (International Center for Aggregate Research), ince agrega köşeliliği ve yüzey yapısı ile ilgili olarak, ince agrega tane şekli, yüzey dokusu ve boyut dağılımına bağlı olan “sıkışmamış boşluk yüzdesi tayini” deney yöntemini tanımlamıştır. Deney yönteminde ince agrega köşeliliği, agrega taneleri arasındaki sıkışmamış (ya da serbest sıkışmış) hava boşluğu yüzdesi ile tanımlanır. Yüksek hava boşluğu yüzdesi daha çok kırılmış yüzeyi belirtir (Masad ve Button, 2000). AASHTO TP33 ve AASHTO T304 standartlarında tanımlanan bu yöntem, daha sonra revize edilerek ASTM C1252 “Standart test method for uncompacted void content of fine aggregates influenced by particle shape, surface texture and grading” olarak kabul edilmiştir. Yöntem, SHRP (Strategic Highway Research Program) tarafından da önerilmektedir. Deney yöntemi, asfalt karışımlarında kullanılan ince agregaların, Superpave dizayn sistemine göre farklı kaplama tipleri için sahip olmaları gereken asgari sıkışmamış boşluk yüzdeleri (Consensus Properties) tanımlamaktadır. Ayrıca Ahlrich (1996), ASTM C1252’ye benzer şekilde iri agregalar için de benzer bir deney aleti geliştirmiştir. AASHTO TP 56 “Determining the Percent of Solids and Voids in Concrete Aggregate” (Modifiye ASTM C1252)’da tanımlanan bu yöntem, iri agregalarda şekil, yüzey dokusu ve boyut dağılımına bağlı olan sıkışmamış boşluk yüzdesi tayini deney yöntemini tanımlamaktadır. Bu yöntem, Hossain ve diğer. (2000) tarafından da önerilmektedir.

CAR test “Compacted aggregate resistance test” Sıkışmış agrega mukavemeti testi David W. Jahn (2003) tarafından ince agrega şekil ve yüzey pürüzlülüğünü belirlemek üzere mevcut yöntemlere alternatif olarak önerilmiştir. Zımbalama etkisi ile sıkıştırılmış agregaların kayma mukavemetinin belirlenmesi esasına dayanır. Bu şekilde agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğü dolaylı olarak belirlenmiş olur. Yüksek kayma mukavemeti agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğünün tekerlek izi oluşumuna karşı yeterli olduğunun göstergesidir. Yöntem bu hali ile zemin tabakalarına uygulanan California taşıma oranı deneyine (CBR) benzemektedir. Deney sonuçları, agregaların köşeliliği ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı aderans artışının, kullanıldıkları asfalt karışımlarının oluklanmaya karşı mukavemetini arttırdığını göstermektedir (Topal ve Şengöz, 2008).

Mekanik (Dolaylı) yöntemlerin en önemli problemi agregâ şekli, köşeliliği ve yüzey dokusu özelliklerini tek tek ifade edememeleri ve bu özellikler arasında doğrudan bir ilişki kuramamalarıdır. Bu nedenle, agregâ geometrik düzensizliklerinin asfalt betonu performansına etkisi ile ilgili çalışma sonuçları tartışmalıdır. Dolaylı yöntemlerin agregâ şekli, köşeliliği ve yüzey dokusu özelliklerini bağımsız olarak belirleyememeleri, zaman alıcı olmaları ve deney operatörüne göre sonuçların farklılık göstermesi gibi olumsuzlar nedeni ile daha güvenilir yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için TRB (Transportation Research Board) Komitesi 2001 yılında, FAA (Fine Aggregate Angularity) ince agregâ köşeliliğini belirlemek için yeni deney yöntemlerinin geliştirilmesini önermiştir. Bu amaçla büyük bütçeli projelere kaynak ayırmıştır. ICAR (International Center for Aggregate Research) bu çalışmalara destek vermiştir. Bu nedenle özellikle ABD’de agregâ şekli, köşeliliği ve yüzey dokusunun belirlenmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır.

2.2.2 Agregâ Şekli ve Yüzey Pürüzlülüğü ile İlgili Standart Deney Yöntemleri

Beton yapımında kullanılmak amacı ile doğal, imal edilmiş veya geri kazanılmış malzemelerin ve bu malzemelerin oluşturduğu karışımların işlenmesi sureti ile elde edilen agregâ ve filler malzemelerinin özellikleri TS EN 706 EN 12620 (2003) standartında tanımlanmıştır.

2.2.2.1 Agregâ Şekil ve Yüzey Dokusu Deney Yöntemleri

İnce ve iri agregaların şekil ve yüzey pürüzlülüklerini belirlemek amacı ile kullanılan standart deney yöntemler aşağıda liste halinde verilmiştir.

- İnce agregâ şekli ve yüzey pürüzlülüğü deney yöntemleri:
 - EN 933-6 (NF P18-564; TS EN 933-6): Agregâ geometrik özellikleri için deneyler: Akış katsayıları
 - ASTM C1252 (AASHTO TP33): İnce agregaların şekil ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı sıkışmamış boşluk oranları

- ASTM D3398: Agregâ şekil ve pürüzlülük indeksi
- İri agreganın şekil ve yüzey pürüzlülüğü deneyleri:
 - EN 933-6 (TS EN 933-6): Agregâ geometrik özellikleri için deneyler: Akış katsayıları
 - ASTM D3398: Agregâ şekil ve pürüzlülük indeksi
 - ASTM D4791: İri agregada yassı taneler, uzun taneler ve hem yassı hem uzun taneler (kaliper yöntemi)
 - ASTM D5821-01 İri agregalarda kırılmış tane yüzdesi
 - BS 812 (Part:105): Agregâ deneyleri. Agregalarda yassılık indeksi
 - AASHTO TP 56 (Modifiye ASTM C1252) İri agregalarda sıkışmamış boşluk oranı

Bu standart yöntemlerden başka, bazı Superpave araştırmacıları ASTM C1252'ye alternatif olarak ince agregalar için CAR test (Compacted aggregate resistance test) yöntemi önermektedir (Jahn, 2003). Yöntem halen geliştirilme sürecinde olup, deneysel çalışma sonuçları arazi performansları açısından değerlendirilmektedir.

Ülkemizde ise, Avrupa Birliğine uyum sürecinde European Norm (EN)'lar Türk standartları olarak kabul edilmektedir. Agregâ şekil ve yüzey pürüzlülüğü ile ilgili aşağıda görülen, **TS EN 933** "Agregâ geometrik özellikleri için deneyler" standartları Nisan, 1999 - Kasım, 2006 tarihleri arasında uygulamaya konulmuştur. Deney yöntemlerinin revizyon çalışmaları devam etmektedir.

- TS EN 933-1 (2006) "Agregâ geometrik özellikleri için deneyler: Bölüm 1; Tane büyüklüğü dağılımı tayini - Eleme metodu"
- TS EN 933-2 (1996) "Agregâ geometrik özellikleri için deneyler: Bölüm 2; Tane boyutu dağılımı tayini - Deney elekleri elek gözü açıklıklarının anma büyüklükleri"

- TS EN 933-3 (2006) “Agrega geometrik özellikleri için deneyler: Bölüm 3; Tane şekli tayini - Yassılık indeksi”
- TS EN 933-4 (2006) “Agrega geometrik özellikleri için deneyler: Bölüm 4; Tane şekli tayini - Şekil indeksi”
- TS EN 933-5 (2000) “Agrega geometrik özellikleri için deneyler: Bölüm 5; İri agregalarda ezilmiş ve kırılmış yüzeylerin yüzde tayini”
- TS EN 933-6 (2006) “Agrega geometrik özellikleri için deneyler: Bölüm 6; Yüzey özelliklerinin belirlenmesi: Akış katsayıları”
- TS EN 933-7 (2000) “Agrega geometrik özellikleri için deneyler: Bölüm 7; Kavkı içeriğinin tayini – Kaba agregada kavkı yüzdesi”
- TS EN 933-8 (2001) “Agrega geometrik özellikleri için deneyler: Bölüm 8: İnce tanelerin tayini- Kum eşdeğeri tayini”
- TS EN 933-9 (2001) “Agrega geometrik özellikleri için deneyler: Bölüm 9: İnce tanelerin tayini- Metilen mavisi deneyi”
- TS EN 933-10 (2002) “Agrega geometrik özellikleri için deneyler: Bölüm 10: İnce tanelerin tayini - İnce dolgu malzemelerinin tane büyüklüğüne göre sınıflandırılması (Hava jetiyle eleme).

Agrega şekli ve yüzey özellikleri ile ilgili olarak TS 706 EN 12620 (2003) “Beton Agregaları” da, agregaların şekli ile ilgili olarak, sadece iri agregalarda EN 933-3 ve EN 933-4’ün yeterli olduğu belirtilmektedir. Standartta, şekil indeksi ve yassılık indeksi için herhangi bir sınırlama olmadığı gibi, yüzey özellikleri ile ilgili de herhangi bir kriter bulunmamaktadır.

2.2.2.1.1 TS EN 933-6, Agreg Geometrik Özellikleri İçin Deneyler: Akış Katsayıları

TS EN 933-6 “Yüzey özelliklerinin değerlendirilmesi-Agregalarda akış katsayıları” ince ve iri agregaların akış katsayılarının ölçülmesi için deney

metotlarını tanımlamaktadır. Standart, inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan yapay ya da doğal agregalara uygulanır. Bir agreganın akış katsayısı belirli bir delikten sabit hacimdeki kumun saniye cinsinden biçimlemek kaydıyla akış zamanıdır. Akış katsayısı, agreganın şekli ve yüzey özelliklerinin bir fonksiyonudur (EN 933-6, 2002).

Deneyler No.5-No.200 (4 mm - 0,063 mm) ve No.10-No.200 (2 mm - 0,063 mm) boyut aralığındaki ince agregalarda uygulanır (Şekil 2.7). Bu iki farklı agreganın boyut aralığı için sırası ile 16 mm ve 12 mm ağız açıklıklarına sahip huni kullanılır. Standart deney aletine agreganın özgül ağırlığına bağlı olarak konulacak agreganın miktarı belirlenir. Numune serbest düşme ile alete doldurulur. Daha sonra huni ağzı açılarak agreganın serbest akışa bırakılır. Agreganın tamamen boşaldığı an 1/10 s hassasiyetinde ölçülür. Deney en az 5 kez tekrarlanır ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak en yakın saniye değerine yuvarlanır. Daha yüksek akış süresi, daha yüksek köşelilik ve yüzey pürüzlülüğü anlamına gelir. Kaba agregalar (4 mm – 20 mm) için de farklı bir deney aparatı ile akış katsayısı zaman cinsinden belirlenebilmektedir.

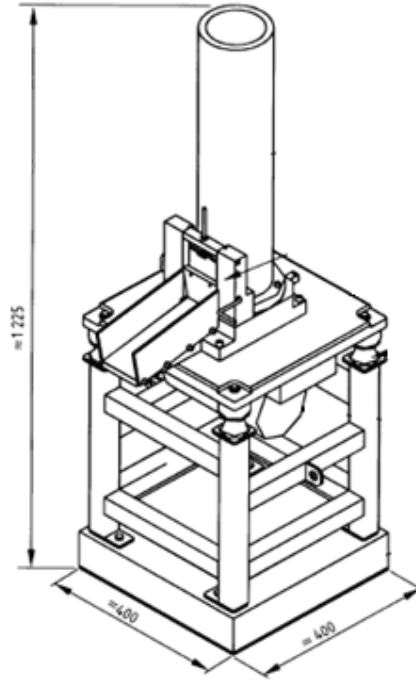


Şekil 2.7 İnce agregalar için akma ünitesi

İnce agregalar için akış katsayılarının belirlenmesi yöntemi ilk olarak LCPC laboratuvarlarında yapılan çalışmalar sonucu akış hunisi deney aletinin geliştirilmesi ile NF P18-564 standardında tanımlanmıştır. EN 933-6'da ise ince agregalarla birlikte iri agregalar için de deney yöntemi tanımlanmıştır (Şekil 2.8).

2.2.2.1.2 *ASTM C1252, Agregat Tane Şekli ve Yüzey Dokusunun Bir Ölçüsü
Olarak, İnce Agregalarda Sıkışmamış Boşluk Oranı Tayini*

ASTM C1252, AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) tarafından, sıcak karışım asfalt kaplamalarda kullanılacak ince agregalar için önerilen, AASHTO-TP33 geçici standartının revize edilmiş hali olan AASHTO-T304'den alınmıştır. Beton agregalarının tane şekli ve yüzey pürüzlülüğünün bir ölçüsü olarak kabul edilmiştir. İnce agregalarda sıkışmamış boşluk oranının tayini için standart deney yöntemini tanımlamaktadır.



Şekil 2.8 İri agregalar için titreşimli plaka ve akış ünitesi (TS EN 933-6, 2003)



Şekil 2.9 İnce agregalarda sıkışmamış boşluk oranı tayini akış ünitesi

Deneyler, standart granülometride (Metod A), tekil tane boyut aralıklarında (Metod B) ve ocaktan geldiği haldeki granülometride (Metod C) olmak üzere 3 farklı şekilde uygulanır (Tablo 2.5). Deneyler, standart deney aletinden, belirli yükseklikten, hacmi belli bir kaba serbest akışa bırakılan agrega numunesinin şekline ve yüzey dokusuna bağlı olarak değişecek olan sıkışmamış boşluk oranının belirlenmesi esasına göre yapılır (Şekil 2.9). Daha yüksek sıkışmamış boşluk yüzdesi, daha yüksek köşelilik ve yüzey pürüzlülüğü anlamına gelir. Deney sonucu elde edilen değerler Denklem (2.12)'de yerine konmak suretiyle sıkışmamış boşluk yüzdeleri hesaplanır.

$$U = \frac{V - (F / G)}{V} * 100 \quad (2.12)$$

Burada;

U= Sıkışmamış boşluk oranı, %

V= Beher kabın hacmi, cm³

F= Beherdeki ince taneli agrega ağırlığı, g

G= İnce agrega kuru BHA, g/cm³

Tablo 2.5 ASTM C1252 metotlarına göre agrega tane boyutları ve miktarları

Agrega boyut aralığı	Metod A	Metod B, g			Metod C
		B1	B2	B3	
2,36mm (No.8)-1,18 mm (No.16)	44	190	-	-	-
1,18 mm (No.16)- 0,60 mm (No.30)	57	-	190	-	-
0,60 mm (No.30)- 0,30 mm (No.50)	72	-	-	190	-
0,30 mm (No.50)- 0,075 mm (No.200)	17	-	-	-	-
4,75 mm (No.30)- 0,075 mm (No.200)	-	-	-	-	190
Toplam, g	190	190	190	190	190

Kandhal ve Parker (1998), yöntemin pratik olduğunu belirtmektedir. NCAT (National Center for Asphalt Technology)'de yapılan çalışmalarda performans açısından anlamlı sonuçlar alındığını belirtmiştir. Bununla birlikte Hudson (1999), yöntemde bazı modifikasyonlara gidilmesi gereğinin üzerinde durmuştur. Yöntemin en önemli problemi, diğer dolaylı yöntemlerde olduğu gibi agrega tane şekli ve yüzey dokusu özelliklerini ayrı ayrı değerlendirememesidir. Bazı kırmataş agregalar için, özellikle tekil boyut aralıklarında (Metod B), huni ağzının dar olması nedeni ile tıkanmalar meydana gelebilmektedir.

Ahlich (1996), ASTM C1252'ye benzer şekilde iri agregalar için de bir deney aleti (modifiye ASTM C1252) önermiştir (Şekil 2.10). Söz konusu deney aleti, Hossain ve diğer. (2000) tarafından yapılan çalışmalarda da kullanılmıştır. Deney yöntemi AASHTO TP 56 standartında tanımlanmıştır.



Şekil 2.10 İri agregalar için sıkışmamış boşluk oranı tayini deneyi akış ünitesi

2.2.2.1.3 *ASTM D3398, Agregası Şekli ve Yüzey Pürüzlülüğü İndeksi*

ASTM D3398’de agregası tane şekli ve yüzey pürüzlülüğü indeksi tanımlanmıştır. Deney, tek boyutlu agregası örneklerine uygulanır, 5 farklı çaptaki silindirik kaplar 3’er tabaka halinde ve her tabaka 10 kez demir tokmakla sıkıştırılır ve boşluk %’leri bulunur. Daha sonra deney her bir tabaka 50 kez tokmaklanarak tekrarlanır. Agregası şekli ve yüzey dokusu indeksi, değerler Denklem (2.13)’de yerine konmak sureti ile hesaplanır.

$$I_a = 1,25V_{10} - 0,25V_{50} - 32,0 \quad (2.13)$$

Burada;

I_a = Tane şekil ve yüzey dokusu indeksi

V_{10} = % Boşluk, her tabaka 10 kez sıkıştırılarak

V_{50} = % Boşluk, her tabaka 50 kez sıkıştırılarak

Khandal ve Parker (1998), yöntemde her bir agrega boyut aralığı için deneyin tekrarlanmasını gerektiğinden, ince agregalar için zaman alıcı olarak tanımlanmıştır. Deney sonuçlarının doğruluğu tartışmalıdır (Quiroga ve Fowler, 2004).

2.2.2.1.4 Sıkıştırılmış Agrega Mukavemeti Deneyi (CAR test)

Son yıllarda ABD’de agrega araştırmacıları, bazı kırmataş agregaların ASTM C1252 (AASHTO T304) kriterlerini karşılayamadıkları halde, asfalt betonu uygulamalarında oluklanmaya (rutting) karşı iyi performans verdiklerini tespit etmişlerdir. Bazı agregalar ise kriterleri sağlamalarına rağmen arazi performansları beklenildiği gibi iyi olmamıştır. Bu nedenle ASTM C1252’ye alternatif bir yöntem geliştirme fikri ortaya çıkmıştır. Agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğünü ifade etmekte daha etkin bir yöntem bulmak amacı ile yapılan araştırmalarda, CAR Test “Compacted Aggregate Resistant Test” sıkıştırılmış agrega mukavemeti deney yöntemi Jahn, (2003) tarafından önerilmiştir.

CAR test baskı (zımbalama) sonucu kayma gerilmeleri oluşturarak sıkışmış ince agregaların kayma mukavemetini ölçmek için geliştirilmiştir. CAR test standart Marshall ekipmanları ile birlikte basit bir yükleme başlığı kullanılarak yapılabilir (Şekil 2.11). Test yöntemi halen geliştirme süreci içinde olmasına rağmen genel olarak aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır (Zaniewski ve Rafferty, 2004):



Şekil 2.11 Marshall Stabilitate aletinde kullanılan CAR test yükleme başlığı

- Agreganın 2,36 mm elekten geçen kısmından 5000-6000 g malzeme alınması ve karışımlarda kullanıldığı gibi agreganın standart granülometriye getirilmesi,
- Agreganın 110 ± 5 °C'lik etüvde ardışık iki tartımda ağırlık farkı 0,1 g olana dek kurutulması,
- Kuru agregaya ağırlıkça %1,75-%3,5 oranları arasında su eklenerek karıştırılması ve malzemede en uygun sıkışmanın sağlanması için gerekli nem içeriğine getirilmesi,
- Malzemeden çeyrekleme yöntemi ile 1100 g malzeme alınması,
- 1100 g malzemenin 4 inç (~10cm) çapındaki Marshall kalıplarına ASTM D1559'a göre yerleştirilmesi ve 20 darbe ile şişleyerek ön sıkışma uygulanması,
- Kalıplara konulan agreganın yüzeyinin 4 inç (~10 cm) çapında selofan kağıt (ya da alüminyum folyo) ile örtülmesi ve Marshall kompaktöründe 50 darbe ile sıkıştırılması,
- Örneğin Marshall stabilite aletine yerleştirilmesi, yükleme başlığı ve deplasman ölçerin (LVDT) agreganın yüzeyine yerleştirilmesi
- Başlığın dakikada 2 inç (~5cm)'lik bir hızla yüklenmesi ile yük-deformasyon değerlerinin okunması.

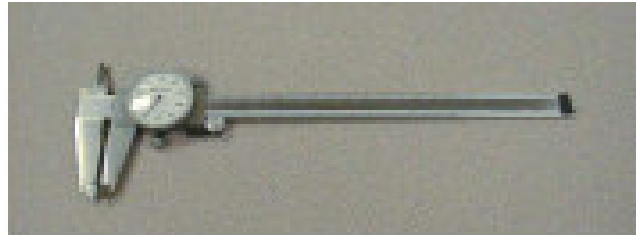
CAR test, deformasyonun 0,25 inç (~0,63 cm)'e ulaştığı veya malzeme dayanımının aletin yük taşıma kapasitesini aşması durumunda sona erer. Jahn, (2003) bazı kübik agregaların 2500 lb (1134 kgf)'u aşan kayma mukavemeti gösterdiğini bildirmiştir. Bu değer Marshall stabilite aleti kapasitesinin üst sınırıdır.

2.2.2.1.5 *ASTM D4791, İri Agregalarda Yassı ve Uzun Tane Test Yöntemi (Kaliper Yöntemi)*

İri agregalarda yassı ve uzun tane oranlarını belirlemek için standart bir yöntem tanımlar. 2005 yılında revize edilmiştir. Ancak ölçümler yine manuel olarak yapılmaktadır (Şekil 2.12).

2.2.2.1.6 *ASTM D5821, İri Agregalarda Kırılmış Tane Yüzdesi*

Son kez 2001 yılında revize edilen standart yöntem, iri agregalar için kırılmış yüzeye sahip agrega yüzdesini tanımlamaktadır. Deney yönteminde, en az bir veya iki kırılmış yüzeye sahip iri agregalar görsel olarak ayrılır. Kırılmış yüzeye sahip agrega ağırlığının, test edilen toplam agrega ağırlığına oranı kırılmış tane yüzdesini verir. Bu standartla birlikte agregalarda ilk defa kırılmış yüzey ve köşelilik kavramı ortaya çıkmıştır. Superpave dizayn sisteminde kırılmış yüzeye sahip agrega kullanımı tavsiye edilmektedir. Sıcak asfalt karışımlarında köşeli agregalar kayma gerilmelerine karşı, yeterli mukavemeti sağlayarak tekerlek izi oluşumunu (oluklanma) engellerler (Kennedy ve diğer., 1994).



(a)



(b)

Şekil 2.12 Boyut ölçme aletleri a) Kumpas b) Orantısız kaliper (Kim, 2002)

*2.2.2.1.7 BS 812 (Bölüm 105) İri Agregat Tane Şeklinin Belirlenmesi:
Yassılık İndeksi*

1990 yılında yürürlüğe giren standart yöntemde iri agregatlar için yassı tane indeksi tanımlanmaktadır. İri agreganın kalınlığı ortalama boyutunun 0,6 sından daha küçükse tane yassı olarak tanımlanır. Yassı agregat ağırlığının test edilen toplam agregat ağırlığına yüzdesi yassılık indeksi olarak isimlendirilir.

2.2.2.2 Agregat Boyut Dağılımı Deney Yöntemleri

İnce ve iri agregalarda boyut dağılımının belirlenmesi amacıyla kullanılan standart deney yöntemleri aşağıda liste halinde verilmiştir:

- TS 3530 EN 933-1, Agregatların geometrik özellikleri için deneyler, Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini- eleme metodu
- ASTM C136, Elek analizi
- ASTM C117, Sulu elek analizi

Elek analizi bir numunenin standart kontrol elekleri ile elenerek tane boyutlarına göre tasnif edilip ağırlık oranlarının belirtilmesidir. Standartlarda kare gözlü elekler tercih edilmektedir.

2.2.2.3 Yöntemlerin Değerlendirilmesi

Standartlar incelendiğinde, tane şekil ve yüzey pürüzlülükleri manuel olarak veya mekanik deney aletleri ile belirlendiği görülmektedir. Bu nedenle, deney sonuçları deney operatörüne ve laboratuvar şartlarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Deneylerin uzun sürede ve nispeten az sayıda agregat tanesi üzerinde yapılması, bütünü temsil etmek bakımından çoğu zaman yetersiz kalmaktadır.

Beton teknolojisi alanında yapılan çalışmalarda, agregatların genellikle doğal agregat/kırmataş şeklinde sınıflandırıldığı görülmektedir. Agregatlarının geometrik

düzensizlikleri ihmal edilmektedir. Bununla birlikte, son yıllarda geliştirilen agregat standart deney yöntemleri, mekanik yöntemlerle şekil ve yüzey özelliklerini belirlemede kullanılmaktadır. Ancak deneylerden elde edilen sonuçlar, yüzey özellikleri ile ilgili niteliksel veriler yerine, akış katsayısı ve sıkışmamış boşluk oranı gibi dolaylı yaklaşım yöntemleridir. Bu yöntemlerin en önemli problemi; agregaların şekil, köşelilik ve yüzey yapısı gibi geometrik özellikleri tek tek ifade edememeleri ve bu özellikler arasında doğrudan bir ilişki kuramamalarıdır. Agregat geometrik düzensizliklerini belirlemek üzere yürütülen çalışmalar halen bir gelişme sürecinde olup, yukarıda belirtilen mekanik yöntemler yanında dijital teknolojiye gelişmelere bağlı olarak görüntü analizlerini de kapsayan yeni yöntemlerin geliştirilmesine çalışılmaktadır.

Görüntü analizleri ile iri ve ince agregalarda geometrik düzensizlikleri belirlemek üzere çalışmalar devam etmektedir. Her yöntemin bazı üstünlükleri ve eksik yönleri olup, üzerinde karar kılınmış standart bir yöntem bulunmamaktadır. Bütün bu çalışmalarda ortak amaç; ince ve iri agregalarda şekil, köşelilik ve yüzey dokusu gibi geometrik özellikleri tanımlayabilecek basit, pratik ve standart bir deney yönteminin bulunmasıdır. Ancak böyle bir deney yönteminin bulunması ve standartlara girmesi ile agregaların yüzey düzensizliklerinin kullanıldıkları karışımların özellikleri üzerinde ne derecede etkili oldukları tam olarak tespit edilebilecektir. Sonuçlar, özellikle agregaların kullanılacağı Portland çimentosu betonu (PCC) ve Asfalt betonu (HMA) uygulamaları yanında, temel tabakaları, drenaj sistemleri ve balast vb. uygulamalar açısından da önemlidir.

Agregat tanelerinin karakteristik özelliklerini belirlemek üzere yapılan çalışmalar son yıllarda ilerleme kaydetse de üzerinde fikir birliğine varılmış bir yöntem ihtiyacı duyulmaktadır. Tane şeklinin deneysel ve analitik olarak tanımlanabilmesine yönelik bugüne kadar yapılan çalışmalar genellikle iki boyutlu görüntü analizlerini esas almaktadır. Literatürde üç boyutlu (3B) olduğu belirtilen bazı çalışmalar, agregat tanelerinin gerçek üç boyutlu özelliklerini ifade edememektedir.

Görüntü analiz yöntemi çalışmaları, genellikle agregaların bir veya birkaç geometrik özelliği (Granülometri, yassı ve uzun tane oranı, şekil, köşelilik,

pürüzlülük vb.) üzerinde yoğunlaşmıştır. Ancak, analiz sırasında daha kapsamlı tanımlamaların yapılabilmesi ve tekrarlanabilirliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Görüntü analiz yöntemleri, mekanik yöntemlere kıyasla çok daha kısa sürelerde daha yüksek doğrulukla agrega geometrik özelliklerini belirleyebilecek sistemlerdir.

Agrega geometrik özellikleri ile ilgili standart ölçüm yöntemleri ve görüntü analiz yöntemleri uygulandıkları agrega boyutunu göre Tablo 2.6’da görülmektedir.

2.2.3 Görsel Yöntemler

Gelişen teknolojiye bağlı olarak, görüntüleme ve analiz yöntemleri hızlı bir gelişme süreci içinde bulunmaktadır. Bu amaçla geliştirilen sayısal görüntü işlemcileri, birden fazla alanda bilgi toplanmasını sağlayan güçlü bilgisayar tabanlı araçlardır. Modern bir görsel analiz sisteminin yardımı ile her bir tanenin fiziksel özelliklerinin (çap, boy, en, doğrultu) kısa sürede ölçülebileceği düşüncesi, görüntüleme sistemleri için yeni bir kullanım alanının da ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Dijital görüntü analiz yöntemleri ile agregaları karakterize etmek amacıyla ABD’de çeşitli üniversitelerin yapı malzemeleri ve ulaştırma anabilim dallarında çok sayıda araştırma projeleri yapılmaktadır. Bu çalışmalar, başlangıçta iri agregaların 2 boyutlu (2B) görüntüleri üzerinde yapılan çalışmaları kapsamakta iken, son yıllarda derinlik bilgisi içeren ve 3 boyutlu (3B) görüntü analiz yöntemleri üzerinde de çalışılmaktadır.

Tablo 2.6 Mekanik ölçüm yöntemleri ve görüntü analiz yöntemleri

	Yöntem	Agrega Boyutu	Ölçüm
Mekanik Yöntemler	Akış katsayıları, TS EN 933-6	İnce ve iri	Dolaylı
	İnce agregalarda sıkışmamış boşluk oranı, ASTM C1252	İnce	Dolaylı
	İri agregalarda sıkışmamış boşluk oranı, AASHTO TP56 (Modifiye ASTM C1252)	İri	Dolaylı
	Sıkışmış agreganın mukavemeti, CAR test	İnce	Dolaylı
	Agrega tane şekli ve pürüzlülüğü indeksi, ASTM D3398	İnce ve iri	Dolaylı
	Yassı ve Uzun tane oranı, TS EN 933-3, ASTM D4791	İri	Doğrudan
	İri agregada kırılmış tane yüzdesi, TS EN 933-5 ASTM D5821	İri	Doğrudan
	İri agreganın tane şeklinin belirlenmesi-Yassılık indeksi BS 812, Bölüm 105	İri	Doğrudan
	VDG-40 Video Grader	İri	Doğrudan
Görüntüleme yöntemleri	Illinois üniversitesi agreganın görüntü analiz sistemi, UIAIA	İri	Doğrudan
	Lazer esaslı agreganın analiz sistemi, LASS	İri	Doğrudan
	Agreganın görüntüleme sistemi, AIMS	İri	Doğrudan
	Bilgisayarlı tane analiz cihazı, W.S.Tyler Comp.	İri	Doğrudan
	X-ray CT	İri	Doğrudan

2.2.3.1 İki Boyutlu Görüntü Analizlerini Temel Alan Çalışmalar

Görüntü analizi ile ilgili ilk çalışmalar, agregaların şekil, yüzey alanı ve pürüzlülük özelliklerini görsel olarak değerlendirmek yerine, dijital hale getirilmiş koordinat tablosu ve bir bilgisayar programı kullanarak hızlı bir şekilde değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu konuda yapılan ilk çalışmalarda, Georgia Institute of Technology araştırmacıları kusurlu tane yüzdesini belirlemeyi amaçlamışlardır (Wang, James, ve Frost, 1997). Sistem genel olarak; görüntüleme yapacak bir kamera, agregaları benzerlik açısından karşılaştırmak üzere hazırlanmış dijital koordinat tablosu ve bir bilgisayardan oluşmaktadır

Yapılan diğ er bir çalışmada, Virginia Department of Transportation (Virginia DOT) araştırmacıları, yassı ve uzun agrega yüzdesini belirleyebilmek amacıyla Fransa LCPC laboratuvarlarında geliştirilen Videogran lometre'yi (VDG-40) denemişlerdir (şekil 2.13). Bu konuda, Prowell ve Weingart (1999), ASTM D4791 yöntemi ile elde edilen yassı ve uzun tane oranının VDG-40 sonuçları ile %92 oranında uyumlu olduğunu ortaya koymuştur. VDG-40 agrega tane boyut dağılımını hızlı bir şekilde belirlemek amacı ile geliştirilmiştir (Browne, Rauch, Haas, ve Kim, 2003). Ancak, kullanım amacından farklı olarak, 2B agrega görüntülerinden yassı ve uzun tane oranının belirlenmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Virginia DOT araştırmacıları, agrega şekil özelliklerini belirlemeye yönelik alternatif yöntem geliştirme çalışmalarına devam etmektedir (McGhee, Troy, Deeds, ve Rorrer, 2005).



şekil 2.13 Videogran lometre, VDG-40 (LCPC, 2007)

Agrega şekli ve yüzey yapısı ile ilgili olarak University of Texas ve Texas Transportation Institute'de yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Araştırmacılar, agregaların 2B ve 3B görüntü analiz çalışmaları ve kullandıkları beton ve asfalt karışımlarındaki performansları ile ilgilenmektedir.

Washington State  niversitesi ve Texas Transportation Institute ortak çalışmasında; XYZ koordinatlarında birleştirilmiş görüntüleme sistemini esas alan "Unified Imaging" sisteminin geliştirilmesine çalışılmaktadır. Bu amaçla Masad ve arkadaşları ince agregaların form, köşelilik ve yüzey dokusu özelliklerini belirlemek

amacıyla çeşitli görüntü işleme yöntemleri kullanmıştır. Agregada pürüzlülüğünün belirlenmesi amacıyla gri seviyelerdeki agregada görüntülerinden, yoğunluk histogramları ve hızlı Fourier dönüşümleri kullanan algoritmalar geliştirmiştir (Masad, Button, ve Papagiannakis, 2000; Masad ve Fletcher, 2001).

Masad (2002), siyah beyaz bir video kamera ve bir mikroskop kullanarak, farklı çözünürlük ve farklı aydınlatma koşullarında agregaları görüntülemiştir. Şekil tanımlamasında form indeksini (FI) kullanmıştır (Denklem 2.14).

$$FI = \sum_{\theta=0}^{\theta=355} \frac{|R_{\theta+5} - R_{\theta}|}{R_{\theta}} \quad (2.14)$$

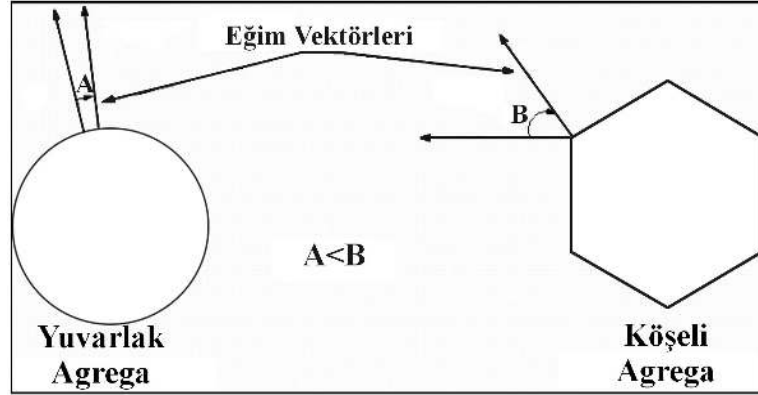
Burada;

R: Agregada tanesinin farklı doğrultulardaki yarıçapı,

θ : Doğrultu açısı'dır.

Masad'a (2002) göre bu değişken, tanenin her doğrultudaki boyut değişikliğini ifade etmesi nedeniyle, tanenin üç doğrultudaki (boy-yükseklik-en) boyutunu esas alan küresellik ve şekil faktörü tanımlamalarından daha iyi sonuç verecektir.

Masad köşeliliği analiz etmek üzere iki yöntem kullanmıştır. Bunlar eğim açısı yöntemi ve yarıçap yöntemidir. Eğim açısı yönteminde, eğim vektörlerinin doğrultusundaki değişiklik oranı ölçülür. Şekil 2.14'de, keskin köşeli tane örneğinde, köşe noktalarındaki eğim vektörlerinin doğrultu açısı, yuvarlak tane örneğine göre daha büyük olduğu görülmektedir. Bütün dış kenar boyunca, köşe noktalarındaki açı değerleri hesaplanıp toplamı alınırsa, agregada tanesi için köşelilik değeri elde edilir.



Şekil 2.14 Yuvarlak ve köşeli tanelerde eğim açısı vektörleri (Masad, 2002)

Yarıçap yöntemi, tane ile eşdeğer elipsin belirli bir doğrultudaki yarıçap değeri farklarının ölçülmesi esasına dayanır. Köşelilik indeksi Denklem 2.15’de tanımlanmıştır.

$$AI = \sum_{\theta=0}^{\theta=355} \frac{|R_{\theta} - R_{EE\theta}|}{R_{EE\theta}} \quad (2.15)$$

Burada;

R_{θ} = Tanenin θ açısı doğrultusundaki yarıçapı,

$R_{EE\theta}$ = Eşdeğer elipsin θ açısı doğrultusundaki yarıçapı,

University of Teksas’da yürütülen çalışmalarda, agregâ şekil özelliklerini belirlemek amacı ile “Aggregate Imaging System (AIMS)” geliştirmiştir (Şekil 2.15). AIMS, agregâ karakteristik özellikleri olan şekil ve köşelilik özelliklerini 8mm’den büyük agregalar için belirleyebilmektedir (Masad, 2002). Daha küçük boyutlu agregalar üzerinde görüntü analiz çalışmaları devam etmektedir.



Şekil 2.15 Agregat görüntüleme sistemi (AIMS) (Bathina, 2005; NCHRP 04-30A)

1990'lı yıllardan beri gelişme sürecinde olan “Bilgisayarlı tane analiz cihazı” Mentor, Ohio’da geliştirilmiştir (Şekil 2.16). Serbest düşmeye bırakılan agregaların bir ışık kaynağının önünden geçerken, saniyede 10 000 tarama yapabilen güçlü bir kamera ile görüntülerinin çekilmesi esasına dayanır. Agregat görüntüleri iki boyutlu olup bilgisayar hafızasında saklanır. Bu görüntüler, Windows tabanlı bir görüntü analiz programı ile analiz edilerek, tane boyut dağılımı ve bazı şekil özellikleri belirlenebilir. Yöntemin dezavantajı çok güçlü kameralar gerektirmesi ve görüntü işleme adımlarının çokluğu nedeniyle veri kayıplarının fazla olabilmesidir. Bu nedenle özellikle agregat tane şekil özelliklerinin belirlenmesinde kullanılması hatalı sonuçlara neden olabilir.



Şekil 2.16 Bilgisayarlı tane analiz cihazı.

2.2.3.2 Üç Boyutlu Görüntü Analiz Çalışmaları

University of Illinois de tane şekli ve hacmini esas alan, 3 farklı yüzeyden görüntü alan (3 kameralı) hareketli bant sistemi olan University of Illinois Aggregate Image Analyzer (UIAIA) geliştirilmiştir (Şekil 2.17). İri agrega taneleri taşıyıcı band üzerine teker teker yerleştirilir. Band saniyede 8 cm hızla ilerler ve agrega tanelerini kameraların önüne getirir. Agreganın görüntüsü ön, yan ve üste yerleştirilmiş her üç kamera ile çekilir. Görüntüler eşzamanlı olarak bilgisayar hafızasına kaydedilir. Yöntem, iri agregalarda yassı ve uzun tane oranı ve tane boyut dağılımı, köşelilik ve yüzey dokusu otomatik olarak belirlemeye imkan vermektedir (Tutumluer, Rao ve Stefanski, 2000; Rao, Tutumluer ve Stefanski, 2001). Araştırmacılar, geliştirilen sistemin 3 boyutlu (3B) görüntü analizi yapmaya imkan verdiğini belirtse de, en az 6 düzlemin birleştirilmesi ile gerçek 3 boyutun elde edilebileceği unutulmamalıdır.



Şekil 2.17 Illinois Üniversitesi Agregalı Görüntü Analiz Cihazı (UIAIA)
(Rao ve diğer., 2001)

Daha sonraki yıllarda, görüntüleme ve lazer kamera teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte, lazer esaslı agrega görüntüleme sistemi (LASS) geliştirilmiştir (Şekil 2.18). Lazer kamera, agrega taneleri üzerine bir lazer kaynağından gönderilen ışık demetinin bir CCD (Charge Coupled Device) kamera tarafından görüntülenmesi esasına dayanır. Alınan görüntüler, National Instrument, (Austin, Texas) tarafından geliştirilen ve ticari olarak da satılan LabView IMAQ Vision programında analiz

edilerek agrega geometrik düzensizlikleri belirlenmektedir. Çözünürlük X, Y ve Z koordinatlarında sırasıyla 0,3 mm, 0,1 mm ve 0,5 mm hassasiyetindedir.

Kim, Haas, Rauch, ve Browne, (2002a-b) lazer esaslı agrega görüntüleme sistemini (LASS) kullanarak, agregaların şekil ve yüzey pürüzlüğünü dalgacık dönüşümleri (Wavelet transform) esasına göre belirlemiştir. Diğer yöntemlere göre, lazer tarayıcılardan elde edilen verilerin, dalgacık tabanlı yaklaşımlar kullanılarak analiz edilmesi ile tanenin gerçek karakteristiklerinin çıkarılabileceğini ifade edilmektedir. Şekil, köşelilik ve yüzey pürüzlülüğü indeksleri farklı dalgacık dönüşümleri ile tanımlanmaktadır. Yüksek dereceden dalgacık dönüşümleri tanenin yüzey pürüzlülüğünün, daha düşük dereceden dalgacık dönüşümlerinin ise, tanenin şekil ve köşeliliğinin belirlenmesinde kullanışlı olduğu belirtilmektedir.



Şekil 2.18 Lazer kameralı agrega tarama sistemi (LASS) (Kim, 2002)

Biyoloji ve tıp alanında oldukça geniş kullanım alanı bulan, X-ray bilgisayarlı tomografi (X-ray CT) tekniği ile agrega şekli ve yüzey dokusu özelliklerini belirlemek üzere çalışmalar yapılmaktadır (Şekil 2.19). Wang ve diğer. (2002) bu tekniği kullanarak agregalarda hacim, özgül yüzey alanı ve küresellik bilgilerini elde edebilmiştir. Garboczi (2002), beton agregalarında, tane şekli ve yüzey özellikleri x-ray tomografi ve küresel harmonik fonksiyonlar kullanmak sureti ile 3 boyutlu olarak belirlemeye çalışmaktadır. X-ray CT'nin oldukça pahalı olması, az sayıda tanenin

bile istenilen çözünürlüğe bağlı olarak çok uzun zamanda taranması ve radyoaktif ışıma yapması gibi dezavantajlı yönleri bulunmaktadır.



Şekil 2.19 X-ray bilgisayarlı tomografi cihazı

Garboczi, Cheok ve Stone, (2006), lazer tarama ve sınıflandırma yöntemi (LADAR) kullanarak çizgisel olarak agrega yüzey koordinatlarının 3 boyutlu sayısal bilgilerinin elde edilebileceğini gösteren ön çalışmalar yapmıştır. Bu sayede lazer tarama ve sınıflandırma verilerinin X-ray CT'den elde edilen veriler yerine kullanılabileceği düşünülmektedir.

Sözü edilen bütün dijital görüntü analizi çalışmalarında ortak amaç; iri ve/veya ince agregaların şekil ve köşelilik özelliklerini tanımlayabilecek basit, pratik ve ekonomik bir deney yönteminin bulunmasıdır. Ancak böyle bir yöntemin geliştirilmesi ile agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerinin, beton performansı üzerinde ne derecede etkili olduğu tespit edilebilecektir.

2.3 Agrega Geometrik Düzensizliklerinin Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi

Araştırmalar göstermiştir ki, doğal agregalar doğanın aşındırıcı etkileri sonucu yuvarlak olma eğilimindedirler. Buna karşın kırmataş agregaları köşelidirler. Amerikan Ulusal Karayolları İdaresinin teknik tavsiyeler T-2040/89 (1989) bülteninde, asfalt karışımlarında doğal agrega kullanım oranı, toplam agrega

yüzdesinin %15-20'si ile sınırlandırılmasını tavsiye edilmektedir. İnce agreganın geometrik düzensizliklerini belirlemek amacıyla geliştirilen deney yöntemleri ile yapılan çalışmalar, bazı kırmataş agregaların sınır değerlerin (Superpave-Consensus Properties) altında kaldığını göstermiştir (Topal, 2001). Bu bakımdan, bağlayıcı ile iyi bir mekanik kenetlenme yapabilmesi açısından, asfalt karışımlarında doğal agreganın sınırlandırılarak, yerine kırmataş agregasının kullanımı her zaman yeterli olmadığı da anlaşılmıştır. Her kırmataş agregası aynı köşelilik değerine sahip değildir ve Superpave kriterlerini sağlamayan kırmataş agregaları da vardır.

Agregaların ve özellikle ince agregaların geometrik düzensizliklerinin, sıcak karışım asfalt (esnek) kaplamaların performans ve servis ömürleri üzerinde etkili olduğu kesin olarak ortaya konmuştur. Özellikle düzgün yüzey özelliklerine sahip doğal agregalar sıcak karışımlarda kullanıldığında, erken oluklanmaya (premature rutting) (Hossain, Parker, ve Kandhal, 1999; Kuo ve Freeman, 2000; Topal ve Şengöz, 2005) ve soyulmaya (stripping) (Wilson ve Klotz, 1998); neden oldukları çeşitli araştırmacılar tarafından doğrulanmıştır.

Agreganın geometrik düzensizliklerinin beton ve zemin mekaniği açısından da önemlidir. Kuo ve Freeman (2000) bir çalışmalarında agreganın geometrik düzensizliklerinin esnek kaplamalar yanında Portland çimentolu betonların ve özellikle beton yol (rijit) kaplamaların mekanik özellikleri üzerinde de dikkate değer etkilere sahip olabileceğini belirtmişlerdir.

Agreganın pürüzlülük değerini saptamak için uygulanması zor çeşitli deney yöntemleri olmasına rağmen yine de kesin sonuç elde edilememektedir. Yapılacak eğilme deneyleri sonunda hangi betonun eğilme mukavemeti daha büyükse, o betonun üretiminde kullanılan agreganın pürüzlülüğünün daha iyi olduğu sonucuna varılabilir. Yüzeyleri pürüzlü olan tanelerin çimento hamuruna olan aderansı parlak ve kaygan yüzeyli olanlardan daha fazladır. Aderansta meydana gelecek azalma, betonun özellikle çekme ve eğilme mukavemetinin azalmasına neden olur.

Agrega tanelerinin şekli, taze betonun işlenebilme özelliğini ve buna bağlı olarak betonun su ihtiyacını etkilemektedir. Doğal agregalarla yapılan betonlar kolay işlenebilmektedir. Kırmataş agregalar, yüzeylerinin daha düzensiz olmaları nedeniyle sürtünme etkisiyle taze betonun işlenebilirliğini azaltmaktadırlar. Normal dayanımlı betonlarda yuvarlak agregalar, seçilen bir işlenebilirlik ve dayanım için daha az su ve daha az çimento kullanımını gerektirir. Yüksek dayanımlı beton üretimi için ise daha yüksek içsel sürtünme ve bağlanma sağlaması nedeniyle, köşeli ve pürüzlü yüzeyle agregaların kullanımının daha uygun olacağı düşünülmektedir. Kaplan (1959) tarafından yapılan araştırmada; yuvarlak agregalara göre köşeli agregalarla yapılan betonların eğilme ve basınç dayanımlarında sırasıyla %31 ve %22 artış olduğu belirtilmektedir (Erdoğan, 2003).

2.3.1 İri Agregas Şekli ve Yüzey Pürüzlülüğünün Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi

İri agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğünün taze beton özelliklerine etkisi ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bunlardan;

Legg (1998)'e göre agregaların şekil ve yüzey pürüzlülüğü taze ve sertleşmiş betonun ince agrega ve hamur ihtiyacını etkiler. Yassı ve uzun taneler, karışımın işlenebilirliğini düşürür ve yerleştirilmesini güçleştirir. Galloway (1994), yassı tanelerin beton karışımlarında yerleşme şekilleri nedeniyle betonun dayanımını ve durabilitesini düşürdüğünü belirtmiştir. Özellikle beton yollar gibi saha kaplamalarında, yüzeye yakın yassı taneler betonun terleme suyunu tutarak, boşluk oluşumuna neden olur ve bu da yüzeyin bozulmasına neden olur.

Hudson (1999)'a göre, betonun yerleşme yeteneği agrega şeklinden etkilenir. Şekilsiz agregalarla üretilen karışımların daha fazla boşluk içerikleri nedeni ile daha fazla çimento hamuru gereksinimleri vardır. Sonuç olarak, yassı uzun taneler yerine kübik agregalar kullanılması durumunda, çimento hamuru ihtiyacında % 4-5 oranında azalma beklenebilir. Legg (1998) ve Popovics (1998)'e göre de, iri taneler kübik ya da küresel olduklarında, fazla işlenmeye gerek duymadan yerleşir.

Bu problemlerin giderilebilmesi için, bazı standartlar, yassı ve uzun tane oranının belirli limitler içinde tutulmasını önermektedir. Örneğin; İspanyol beton standartına göre yassı tanelerin oranı ağırlıkça %35'den fazla olmamalıdır. Denklem 2.16'da tanımlanan şekil katsayısı da 0.20 den az olmamalıdır.

$$\alpha = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_n}{\frac{\pi}{6} (d_1^3 + d_2^3 + \dots + d_n^3)} \quad (2.16)$$

Burada;

V_i = i tanesinin hacmi, (cm³)

d_i = tane boyutu, (cm)'dir

İngiliz standardı (BS 812) yassı ve uzun tane oranını %35-40 ile sınırlandırmıştır. Mehta ve Monteiro (1993) ise beton karışımlarında kullanılacak yassı ve uzun tane oranının agreganın ağırlıkça %15'inden fazla olmaması gerektiğini önermektedir. Mindess ve Young (1981) beton agregasındaki kusurlu tanelerin oranının %10-15'den fazla olmaması gerektiğini belirtmektedir.

İri agrega yüzey dokusu, agrega tanesinin çimento hamuru ile arasındaki bağ dayanımını etkilediğinden, betonun dayanım ve büzülme özellikleri üzerinde etkilidir. Pürüzlü taneler, pürüzsüz tanelere göre daha iyi bağ dayanımı sağlar. Daha iyi mekanik bağ, daha yüksek dayanım ve daha düşük büzülme demektir.

Her ne kadar pürüzlü agregalar, istenilen bir işlenebilirlik seviyesi için daha fazla suya ihtiyaç duysa da, işlenebilir betonlar, düzgün granülometrilili ve kübik kırılmış agregalar kullanılarak elde edilebilir. Agreganın şekli ve köşeliliğinin beton dayanımı üzerindeki etkisi tartışılmaktadır. Shildstone (1990)'a göre, yuvarlak agregalara göre kübik ve köşeli agregalarla üretilen betonlar, daha yüksek dayanım verir.

Alexander (1989) agreganın şekli ve köşeliliğinin beton gibi kompozit malzemelerin yük altındaki gerilme dağılımlarını etkileyerek, dayanım üzerinde doğrudan etkili

olduğunu belirtmiştir. Kırılmadan önce ve kırılma esnasında çatlak oluşumu ve gelişiminin arayüzeydeki makro ve mikro pürüzlülükten etkilenir. Mehta ve Monteiro (1993) Alexander la aynı fikri paylaşmakta olup, aynı zamanda şekil ve yüzey pürüzlülüğünün arayüzeyin mikroçatlak oluşumunu etkileyerek, betonun gerilme-birim şekil değiştirme davranışını iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

2.3.2 İnce Agregası Şekli ve Yüzey Pürüzlülüğünün Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi

İnce agregası şekli ve yüzey pürüzlülüğünün taze betonun işlenebilirliği, sertleşmiş betonun dayanımı ve durabilitesi üzerinde etkileri ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bunlardan;

Johansen, Laanke ve Smeplass (1991)'e göre, kırmataş kökenli ince agregalar taze betonun terlemesini azaltır ve kayma mukavemetini artırır. Köşelilik, yuvarlak tanelere göre karışımın boşluk yüzdesini artırır. Boşluk yüzdesinin artması, su ihtiyacını arttırsa da, betonun basınç ve çekme dayanımının agregası köşeliliğine bağlı olduğu göstermektedir. Bu nedenle, köşeli ince agregası taneleri beton dayanımını artırır.

Shilstone (1999)'a göre, kübik ya da küresel taneler, yassı ve uzun tanelere göre daha düşük özgül yüzey alanına sahiptir. Bu nedenle, kübik ya da küresel tanelerle üretilen betonlar yeterli işlenebilirlik için daha az çimento hamuru gerektirir. Aynı zamanda taze betonun daha iyi pompalanmasını ve yerleştirilmesini sağlarlar. Bunun da sertleşmiş betonun performansına etkisi, dayanımda artış ve büzülmede azalma şeklinde görülür. Yassı ve uzun taneler işlenebilirliği negatif yönde etkiler, belirli bir su içerisinde daha az işlenebilir karışımların üretilmesine neden olur. Benzer şekilde, belirli bir işlenebilirlik düzeyi için, yassı ve uzun tanelerle üretilen betonlar daha fazla su ihtiyacı gösterir ki bu da sertleşmiş betonun dayanımını düşürür.

Galloway (1994) agregası yüzey pürüzlülüğünün, karışımın işlenebilirliği üzerindeki etkisinin, şekil ve granülometri kadar önemli olmadığını belirtmiştir. Ancak, pürüzlü agregalar, belirli bir işlenebilirlik için karışımın su ihtiyacını artırır.

Yüzey pürüzlülüğü, agrega ve çimento hamuru arasındaki bağ dayanımını arttırdığından, betonun dayanımını, özellikle de eğilme dayanımı artar.

Quiroga ve Fowler (2004)'a göre de ince agregaların şekli ve yüzey pürüzlülüğü özellikleri, kaba agregalara göre taze betonun işlenebilirliği, sertleşmiş betonun dayanımı ve durabilitesi üzerinde daha etkilidir.

Hudson (1999)'a göre ise yüzey pürüzlülüğü tanelerin yerleşmesini etkiler ve betondaki boşluk yüzdesini artırır. Yüzey pürüzlülüğünün beton davranışına olan etkisi, tane boyutu küçüldükçe artar. Doğal agregalar, kırmataş agregalara göre daha yuvarlak ve pürüzsüzdür. Bu nedenle, belirli bir işlenebilirlik için kırmataş agregalara göre daha az su ihtiyacı gösterirler. Bununla birlikte, köşeli ve pürüzlü agregalarla da, kübik ve düzgün granülometrilili olmaları durumunda işlenebilir karışımlar elde edilir. Ancak kübik değilse ve aşırı pürüzlü yüzeye sahiplerse, işlenebilirlik olumsuz etkilenir ve su ihtiyacı artar. Bu bakımdan agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğü tanımlamalarında da, dikkat edilmesi gereken alt ve üst limitlerin olduğu görülmektedir. Bu limit değerlerin bulunması, özellikle yüksek dayanımlı beton üretiminde göz önünde bulundurulması açısından gereklidir.

2.3.3 İnce Malzeme Şekli ve Yüzey Pürüzlülüğünün Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi

İnce malzeme (Filler <0,063 mm) şekli ve yüzey pürüzlülüğünün taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisi konusunda az sayıda çalışma yapılmıştır. Tanelerin küçük boyutları nedeni ile elektron mikroskopları, nitrojen geçirgenlik cihazı, lazer analiz cihazı gibi özel aletlere ihtiyaç vardır. Tanelerin tanımlanmasındaki güçlük nedeni ile filler şekli ve yüzey pürüzlülüğünün yanında granülometrinin etkisi hakkında da yeterli çalışma yapılmamıştır. Filler özelliklerinin, ince agrega özelliklerine benzer etkiler göstereceği düşünülebilir.

2.3.4 Tane Boyut Dağılımı Etkisi

Sabit bir hacim içerisindeki agrega tanelerinin değişik boyutlarda olması, aynı hacimde tek boyutlu agregalara kıyasla daha az boşluk bulunmasına, başka bir

deyişle doluluk oranının artmasına neden olmaktadır. Bilindiği gibi, çimento hamuru, beton karışımında bulunan agregatanelerinin yüzeylerini kaplamakta ve aralarındaki boşlukları doldurmaktadır. Düzgün granülometrilili, yoğunluğu yüksek olan agregalarla yapılan beton, daha yüksek dayanıma sahip ve daha ekonomik bir beton olmaktadır.

Tane boyutu dağılımı, taze betonun işlenebilirliği, segregasyon eğilimi ve pompalanabilirliği üzerinde, sertleşmiş betonun ise yoğunluğu, boşluk yüzdesi ve dolayısı ile dayanıklılığı üzerinde etkilidir. Düzgün granülometrilili agregalarla, kesikli granülometrilili agregalara göre daha işlenebilir karışımlar elde edilir. Ancak kesikli granülometrilili agregalar daha yüksek çökme değeri verir. Düzgün granülometrilili agregalarla daha yoğun ve dolayısı ile permeabilitesi düşük beton üretilir (Mehta ve Monteiro, 1993). Aynı zamanda, karışımın bağlayıcı hamuru ihtiyacı daha az olacağından kuma, sünme ve büzülme de azalacaktır (Shilstone, 1999).

Taze betonun işlenebilirliğini etkileyen en önemli faktörlerden biri, beton üretiminde kullanılan su miktarıdır. Bununla birlikte, beton hacminin yaklaşık %70-80'ini oluşturması nedeni ile agregat özellikleri de işlenebilirliği doğrudan etkilemektedir. Örneğin, agregat granülometrisi iyi olmadığı takdirde, istenilen işlenebilmeyi sağlamak için beton karışımına daha çok su katmak gerekir. Bu durum, karışımın su/çimento oranını yükseltmekte, betonun dayanımının ve dayanıklılığının azalmasına neden olmaktadır. Su/çimento oranını sabit tutmak üzere su arttırıldığında çimento oranı da arttırılmakta, hem fazla miktardaki çimentonun etkisiyle sertleşmiş betonda daha fazla büzülme yol açılmakta, hem de ekonomik bir beton elde edilememektedir.

Agregat boyut aralıklarından herhangi birinin diğer aralığa göre fazla olması betonun işlenebilirliğini ve durabilitesini düşürür (Galloway, 1994; Shilstone, 1990). Bu nedenle kaba ve ince agregat granülometrisinin düzgün derecelenmiş olması gerekir. Örneğin, karışımında fazla ince agregat kullanılması, çimento ihtiyacını arttırır, pompalanabilirliği zorlaştırır, yerleşme problemleri doğurur (Shilstone, 1999), kusmayı ve geçirgenliği arttırır (Mindess ve Young, 1981). Eğer ince agregat çok

kaba granülometrilili ise, kuma ve segregasyon artar, daha zor işlenebilir bir karışım üretilmesine neden olur. Eğer ince agregada çok ince granülometrilili ise karışımın su ihtiyacı artacaktır (Galloway, 1994).

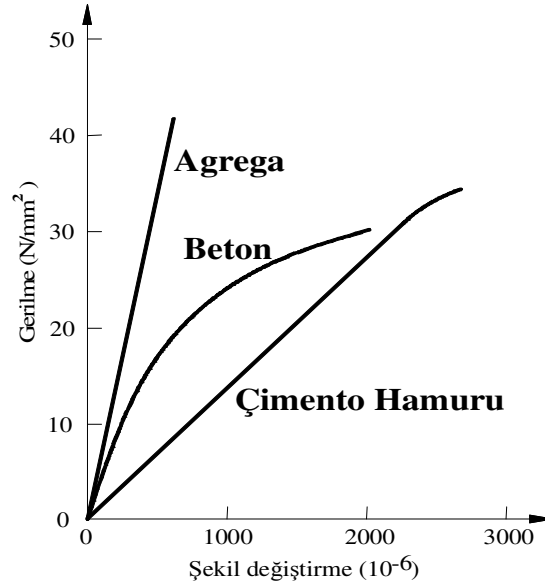
Beton yapımında mümkün olan en büyük agregada tane boyutunun kullanılması, beton karışımının su ihtiyacının azalması, sabit bir işlenebilirlik için ve sabit bir çimento miktarı ile yapılacak betonun su/çimento oranı azalmaktadır. Böylelikle daha yüksek dayanım elde edilebilmektedir. Ancak Mindess ve Young (1981) ve Neville (1995) normal betonlar için en büyük agregada tane boyutunun 25 mm ila 40 mm arasında olduğu belirtmiştir. Bu çelişki, maksimum tane boyutu çok büyük olan agregadaki tanelerin yüzey alanlarının oldukça az olması nedeni ile çimento hamuru ve agregada yüzeyi arasındaki aderans azalması şeklinde açıklanabilir (Erdoğan, 2003). Agregada tane şekli, köşeliliği ve pürüzlülüğü gibi fiziksel özellikleri de bu aderans kuvvetinin oluşumunda etkili faktörlerdir.

Uygun granülometri agreganın şekline ve pürüzlülüğüne de bağlıdır. Doğal agregalar için uygun olan granülometri, kırmataş agregalar için uygun olmayabilir (Hudson, 1999). Ayrıca agregada granülometrisi yapım tekniğine bağlı olarak da değişken olabilir. Örneğin, pompa ile yüksek katlara dökülecek ya da el ile yerleştirilecek betonun, mekanik olarak yerleşecek betona göre ince agregada oranının yüksek olmasında fayda vardır.

Granülometrinin dayanım üzerindeki etkisi tartışmalıdır. Bazı araştırmacılara göre düzgün ve kesikli granülometrilili agregalarla benzer dayanımlar elde edilebilir (Shilstone, 1990). Ancak granülometrinin betonun geçirimsizliği üzerinde etkili olduğu bilindiğinden ve geçirgenlik de betonun durabilitesini etkilediğinden, agregalar arasındaki boşluk oranı ne kadar az ise karışım da o kadar az geçirgen olacaktır. Bu nedenle agreganın düzgün granülometrilili olması betonun durabilitesi açısından gereklidir.

2.4 Agrega Bağlayıcı Hamuru Arayüzeyi

Beton, agregası ve çimento hamurundan oluşan iki fazlı bir kompozit malzeme olarak gözönüne alındığında, malzeme özellikleri sadece bileşenlerinin özelliklerine bağlı olmayıp, bu bileşenler arasındaki arayüzeylerden de etkilenir. Bu nedenle betonun yük taşıma mekanizması agregası özelliklerine, çimento hamurunun dayanımına ve arayüzeydeki bağ dayanımına bağlı olarak değişir (Rao ve Prasad, 2002; Ollivier, Maso, ve Bourdette, 1995). Burada arayüzey hakkında vurgulanması gereken bir noktası; 1 m^3 yerleşmiş taze beton hacminin, bu betonu oluşturan sıkışmış agregası hacminden biraz fazla olacaktır. Bu fark, karışımında agregaların ince bir çimento hamuru tabakasıyla kaplanmış olmaları nedeniyle, birbirlerine temas etmemelerinden kaynaklanır. Bu fark hacim olarak % 3 veya biraz daha fazladır. Bu gözleme dayanarak, betonun mekanik özelliklerinin sadece agregası ve bağlayıcı hamurun özelliklerine bağlı olmayacağı sonucu çıkarılabilir. Diğer önemli bir husus da, arayüzeyin betonun basınç altındaki kısa süreli şekil değiştirme davranışını önemli ölçüde etkilemesidir. Şekil 2.20'de görüldüğü gibi agreganın ve hidrate olmuş çimento hamurunun gerilme-şekil değiştirme eğrisi hemen hemen lineer-elastik gevrek bir cisim davranışı gibidir. Bununla beraber betonun davranışı bir eğri şeklindedir. Bu da arayüzeyin varlığını açıklar ve yük altında arayüzeydeki mikro çatlamanın göstergesidir. Bu mikro çatlaklar arayüzeyde giderek artan ölçüde gelişir, uygulanan yük doğrultusuyla çeşitli açılar yaparak yerel gerilme ve şekil değiştirme şiddetinde artışa neden olurlar. Böylece şekil değiştirmeler gerilmeye göre daha hızlı bir artış gösterir ve gerilme-şekil değiştirme eğrisi maksimum noktaya doğru bir eğrilik sergiler (Taşdemir, 1995).



Şekil 2.20 Agregat, sertleşmiş çimento hamuru ve betonun basınç altında gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Taşdemir, 1995; Neville, 1995)

2.4.1 Betonda Arayüzeyler

Betonda çok sayıda arayüzey oluşur. Bu arayüzeyler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Hidrate olmuş çimento hamuru ile agregat taneleri arasındaki arayüzeyler,
- Hidrate olmuş çimento hamurunda çeşitli ürünler arasındaki arayüzeyler,
- Hidrate olmuş çimento hamuru ile hidrate olmamış çimento taneleri arasındaki arayüzeyler,
- Hidrate olmuş çimento hamuru ile reaksiyona uğramamış puzolanik katkıları arasındaki arayüzeyler,
- Hidrate olmuş çimento hamuru veya harç ile lif takviyeli betondaki lifler arasındaki arayüzeyler,
- Beton ile çelik donatı arasındaki arayüzeyler, sayılabilir.

Arayüzey ile ilgili literatürde tartışmalara konu olan üç soru vardır:

- Betonun mekanik özellikleri saptanırken porozitenin bilinen etkileri de göz önüne alınırsa arayüzey bağ mukavemetinin önemi ne olur?
- Çeşitli arayüzey bölgeleri betonun mekanik özellikleri üzerinde hangi etkilere sahiptir?
- Betonun özelliklerini geliştirmek için arayüzey kontrol altına alıp değiştirmek olasıdır? (Taşdemir, 1995).

Arayüzey betonda en zayıf halka olarak göz önüne alınır. Betona uygun kimyasal katkıları ve/veya puzolanları katarak, bu arayüzeylerin morfolojilerinin ve mekanik özelliklerinin değiştirilebileceği bilinmektedir. Bununla birlikte, agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğünün arayüzey özelliklerine etkisi araştırılmaktadır.

2.4.1.1 Betonda Agrega-Çimento Hamuru Arayüzeyinin Morfolojisi

Çimento esaslı kompozitlerde bağlar mekanik kenetlenmeden veya fazlar arasındaki etkileşimli büyümeden ileri geldiği gibi, Van der Waals kuvvetlerinden, hidrojen bağlarından ve muhtemelen kimyasal reaksiyonlardan ileri gelebilir. Çimento hamuru ile agrega arasındaki etkileşimler bakımından üç ayrı mekanizmadan söz edilebilir:

i. Fiziksel etkileşim:

Yüzeyi çok iyi parlatılmış agregalar için çimento hamuru ile kimyasal etkileşim yoksa, çimento mukavemeti kuvvetli olsa da bağ mukavemeti ihmal edilebilir. Agrega çimento hamuru arayüzeyi sistemde en zayıf halka olur (Şekil 2.21 a).

Fiziko-kimyasal etkileşim:

Çimento hamuru ile kimyasal etkileşime sahip agregalarda, çimento hamuru ile agrega arasında kuvvetli bir bağ gelişebilir (Şekil 2.21 b).

Mekanik kenetlenme:

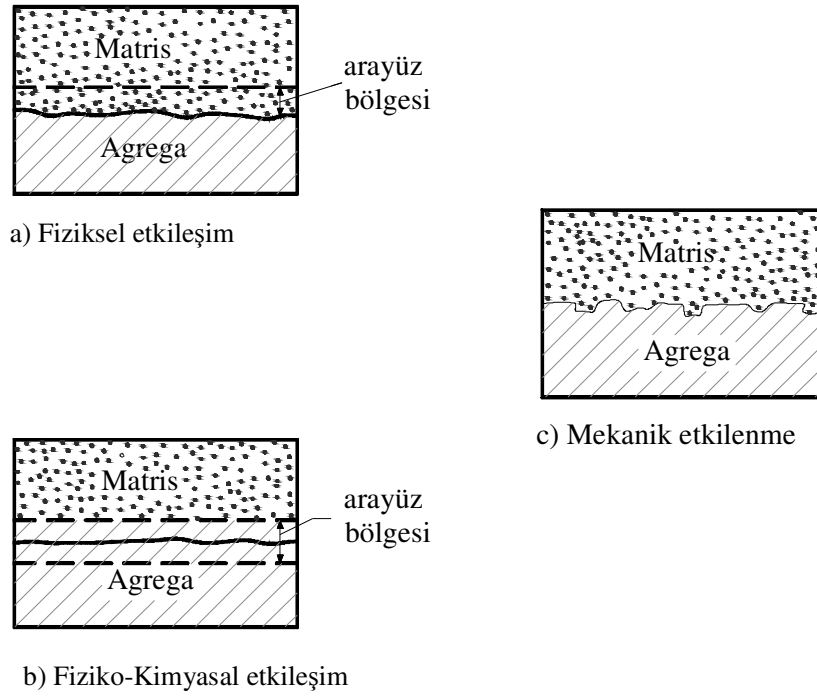
Boşluklu agregalar veya yüzeyi pürüzlü agregalar için, çimento hamuru veya çimento hidratasyon ürünleri agrega yüzeyindeki boşluklara girebilir. Burada, agrega ile çimento hamurunu bağlayan çoklu kancalar gibi davranırlar (Şekil 2.21 c).

Bu farklı mekanizmaların önemi açık değildir. Malzemelerin kimyasal tabiatına ve hidratasyon koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.

Betonda mukavemet, inert olduğu kabul edilen agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki arayüzey yapısından önemli ölçüde etkilenir. Arayüzeyin yapısı, agreganın boyut ve biçimine bağlıdır. Pürüzlü ve girintili çıkıntılı olan agregalar, pürüzsüz parlak olan agregalara göre daha iyi bir mekanik kenetlenmeye sahiptir.

Agrega-bağlayıcı hamuru arayüzeyinin zayıflığı aşağıda verilen olaylarla açıklanabilir:

- Arayüzeyde sürekli fazdakinden daha yüksek porozitenin oluşması,
- Hidratasyon ürünlerine ait daha büyük kristal tanelerinin bu bölgede şekillenmesi,
- Arayüzeyde çökelmiş CH (Kalsiyum hidroksit) kristallerinin birikmesi (Monteiro ve diğer., 1985).



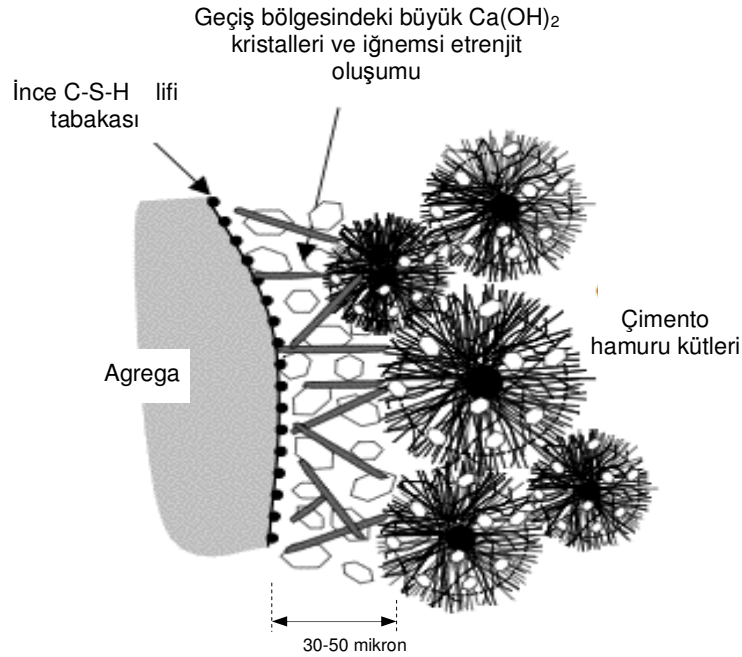
Şekil 2.21 Agrega ile çimento hamuru arasındaki arayüzey etkileşimlerinin şematik gösterilişi.

SEM (Scanning Elektron Microscope) ile yapılan çalışmalarda, arayüzeydeki mikroyapının ve hidrate ürünlerin kristal biçimi ile miktarı agregadan agregaya değişebilmektedir. Maso (1992), agregaya yakın çimento hamurunda iyonların farklı difüzyonuna bağlı olarak, farklı bir geçiş bölgesinin olduğunu göstermiştir.

Zimbelmann'a (1987) göre arayüzeyin mikroyapısı şu şekilde gelişir:

“Çimento, su ile karıştırıldıktan birkaç dakika sonra agregat yüzeyinde etrenjit iğneleri görülür. Agregat yüzeyine dik doğrultuda CH kristalleri etrenjit iğnelerini kaplar. CH kristal tabakasının kalınlığı 2-3 μm dir. Bu tabakadan sonra büyük hegzagonal biçimli CH panel kristalleri gelişmeye başlar. Bu panellerin boyutu 10 μm -30 μm kadardır. Geçiş bölgesi diğer hidratasyon ürünlerini de içerir ve kalınlığı yaklaşık 20 μm kadardır.”

Zimbelmann'ın (1987) yaptığı arayüzey bölgesinin modeli Şekil 2.22'de görülmektedir.



Şekil 2.22 Arayüzeyin mikro yapısı

Zimbelmann'a (1985) göre bağ dayanımında üç mekanizma vardır:

- Pürüzlü agreg a yüzeyi ile çimento hidratasyon ürünlerinin oluşturduğu mekanik bağ,
- Çimento hamuru ve agreg a bileşenleri arasında kimyasal reaksiyonla oluşan bağ,
- Agreg a yüzeyinde hidratasyon ürünlerinin büyümesi ile oluşan epitaksik bağ (CH kristalleri).

Epitaksik bağda agreg a yüzeyine çökelen hidratasyon ürününün (örneğin CH'in) kristal yapısı ile agreganın kristal yapısının kafes sistemleri birbirlerine uygunsa, bu yapılar bir süreklilik oluşturur ve mekanik aderansa ek olarak daha küçük ölçekte olan epitaksik aderans da gerçekleşir. Zimbelmann (1985), agreg a-çimento hamuru arasındaki bağın çeşitli agregalardan etkilenebileceğini belirtmektedir.

- Agreg a-çimento hamuru arayüzey kalınlığı;

- Agrega ve çimento tipine,
- Su/çimento oranına,
- Kompozitin yaşına
- Bağın türüne (fiziksel, fiziko-kimyasal ya da mekanik)
- Deney ve ölçüm metoduna bağlıdır.

Yukarıda sözü edilen araştırmacılar tarafından önerilmiş bütün modellerdeki farklılıklara karşın, genel olarak arayüzey kalınlığı 50 μm -150 μm arasında değişir. Bazı çimentolu kompozitlerde 1 μm bile olabilir (Taşdemir, 1995).

Betonda iki agrega tanesi arasına sıkışmış çimento hamurunun kalınlığı 80-150 μm dir. Bunun 25-100 μm 'si arayüzey bölgesidir. Bu kalınlık çimento hamuru kalınlığının %30-50'sidir. Bu da arayüzey bölgesinin toplam sistemde büyük bir oranda olduğunu ve iyi anlaşılması gerektiğini gösterir.

2.4.1.2 Arayüzeyin Mekanik Davranıştaki İşlevi

Sertleşmiş çimento hamuru ile agrega arasındaki arayüzeyin betonda en zayıf halka olduğu ortak bir görüştür. Bu görüşe uygun çok sayıda gözlem vardır. Bunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

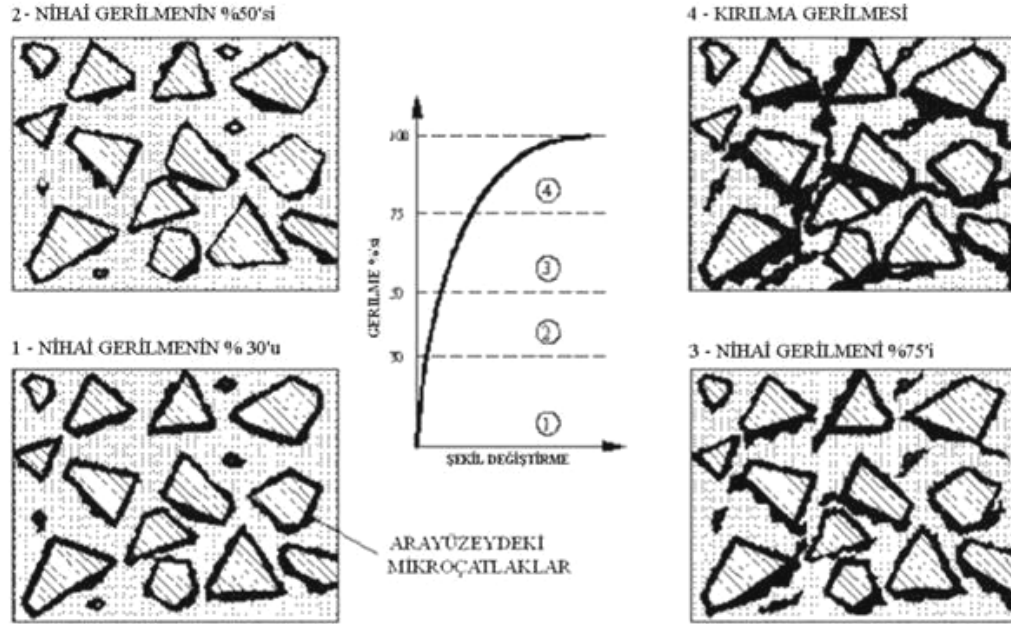
- Çimento hamuru-agrega arayüzeyi, çimento hamuruna göre çok daha düşük yoğunluklu bir yapıya sahiptir.
- Arayüzey bölgesi CH'in büyük boyutlu kristallerini içerir. Bunlar zayıflamaya neden olan düzlemlerdir.
- Agrega taneleri civarında terleme ile oluşan su, ilave zayıflığa neden olan düzlemleri yaratır.

Çimento hamuru-agrega bağ dayanımı araştırmaları, çekme, basınç veya eğilmede bağ dayanımı arttıkça, mukavemetin arttığını göstermiştir. Fakat bu artışlar orta düzeyde olup, mükemmel bağın olması ve olmamasına bağlı olarak %20-40 arasında değişir (Taşdemir, 1995).

Tokyay (1998), dere çakılı, granit, diabaz ve kireçtaşı kullanarak yüksek dayanımlı betonlar üretmiştir. Basınç dayanımı en düşük kayaç olan kireçtaşı ile yapılan betonlar en yüksek dayanıma ulaşmıştır. En düşük basınç dayanımını ise dere çakılı ile yapılan betonlarda görülmüştür. Dere çakılı ve granit ile yapılan betonlara ait histerisiz çevrimleri, kireçtaşı ve diabazla elde edilenlere göre daha geniş ve kalıcı deformasyon miktarları daha fazladır. Bu durum dere çakılı ve granitin daha zayıf, kireçtaşı ve diyabazın daha kuvvetli arayüzey oluşturduğuna işaret etmektedir (Tokyay, 1998). Bu çalışma bize agrega yüzey pürüzlülüğünün önemini göstermektedir.

Agrega-çimento hamurunun bağ dayanımı, sertleşmiş çimento hamurunun bağ dayanımından az olduğundan, beton dayanımı gelişiminde en zayıf halka olarak göz önüne alınabilir. Bağ çatlaklarındaki azalma, geçirimliliği de azaltacaktır. Bu nedenle iyi bir agrega-çimento hamuru aderansı, betonun durabilitesi açısından da önemlidir.

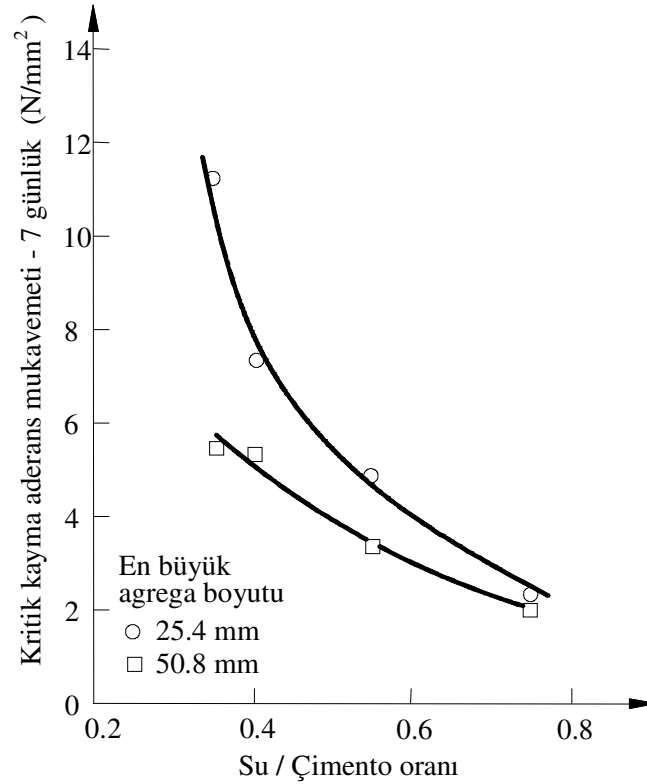
Betonun basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrisi incelendiğinde; basınç dayanımı; %30'un altında iken önceden var olan bağ çatlakları az miktarda açılmaya başlar, %30-50 arasında bağ çatlaklarında büyüme gözlenir, %50-75'i arasında bağ çatlaklarındaki büyümeye ek olarak matris çatlaklarında da artış olur, %75 ve üzerinde matris çatlaklarında hızlı büyüme ile basınç dayanımına erişilir (Şekil 2.23).



Şekil 2.23 Betonun gerilme-birim şekil değiştirme davranışı (Mehta ve Monteiro,1999)

Betonun basınç mukavemetini S/C oranı kontrol eder. Ayrıca S/C oranı agrega-sertleşmiş çimento hamuru arayüzeyini de etkiler. Örneğin S/C oranı arttıkça agrega ile hamur arasındaki aderans mukavemeti azalmaktadır. Şekil 2.24'de bu durum görülmektedir. Aynı zamanda agrega boyutunun da aderans mukavemetini etkilediği şekilden görülmektedir.

Bu bilgiler ışığında, beton dayanımını arttırabilmek için hem S/C oranını düşürerek arayüzeyi güçlendirmek, hem de agrega boyutunu küçülterek çatlak ağını arttırmak gereklidir.



Şekil 2.24 Kritik kayma aderans mukavemetinin betonun agrega boyutuna ve S/C oranına bağlılığı (Taşdemir, 1995)

Günümüzde, agrega-bağlayıcı hamuru arayüzeyi araştırmalarında gittikçe artan bir ilerleme olmuştur. Yapılan çalışmalar, önemli bir bilgi birikiminin oluşmasını sağlamıştır. Bu araştırmalar genellikle agrega-bağlayıcı hamuru arayüzeyinin mikroyapısı, mekanik davranışı ve bu bölgenin güçlendirilmesine yöneliktir. Çelik ve diğer. (1990), yaptıkları deneysel çalışmada, iri agregaların yüzeylerinin pürüzlü ve şekillerinin köşeli olmasının, belirli bir kıvamda ve su/çimento (S/Ç) oranında beton dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir. Benzer çalışmalarda; Çelik (1991), kırmataş agregalarla üretilen betonların doğal agrega ile üretilenlere oranla %30-35 daha fazla basınç dayanımı verdiğini göstermiştir. Midness ve Young (1981), doğal agrega yerine kırmataş agrega kullanılması durumunda, betonun eğilme ve çekme dayanımlarında %30 artış olabileceği belirtmektedir. Dinçer (1964), beton üretiminde doğal agrega yerine köşeli agrega kullanılması durumunda, düşük çimento içerikli örneklerde %35 ve yüksek çimento içerikli örneklerde %12 oranında

basınç dayanımı artışı tespit etmiştir. Bununla birlikte Uğurlu (2002), yüzey pürüzlülüğü ve tane şekli açısından bağlanmayı güçlendirecek en iyi agreganın kullanılması durumunda bile eğer S/Ç oranı yüksek ise agreganın beklenen etkiyi (bağ dayanımını) gösteremeyeceği söylemektedir.

2.5 Literatür Bilgilerinin Değerlendirilmesi

Agregaların geometrik özellikleri ile ilgili standart yöntemler, agrega tane şekli ve yüzey dokusu özelliklerini tek tek ifade edememekte ve bu özellikler arasında doğrudan bir ilişki kuramamaktadır. Deney sonuçları laboratuvar koşullarına ve operatöre bağlı olup, ölçümler zaman alıcıdır. Agregaların çeşitli tane özelliklerinin dijital görüntü analizlerinin de yardımı ile otomatikleşen sistemlerde ölçülebilmesi, bu olumsuzlukların giderilmesi açısından büyük öneme sahip olacaktır. Dijital görüntü analiz yöntemleri ile, agrega geometrik özellikleri mekanik yöntemlere kıyasla çok daha kısa sürelerde daha yüksek doğrulukla yapılabilecektir. Sonuçlar, özellikle agregaların kullanılacağı Portland çimentosu betonu ve asfalt karışımları yanında, temel tabakaları, drenaj sistemleri, balast vb. gibi diğer inşaat mühendisliği uygulamaları açısından da önemlidir.

Kırma tesislerinde işlenen agregalarda kusurlu tane kontrolü, hızlı ve güvenilir görüntü analiz işlemcilerin özelliklerinin geliştirilmesi ile mümkün olacaktır. Örneğin; agrega üretim tesislerinde bantlar üzerinde ilerleyen agregalardan alınacak dijital görüntülerin analizi ile kalite kontrolün daha ocaktan çıkmadan yapılması ve kırma işlemi değişkenlerine anında müdahale ile istenilen özelliklerde agrega üretimi mümkün olabilecektir.

Agrega geometrik düzensizliklerini belirlemek için günümüzde birçok görüntü analiz yöntemi geliştirilmesine rağmen, üzerinde karar kılınmış standart bir yöntem mevcut değildir. Yöntemlerin birbirine göre bazı üstünlükleri ve bazı eksiklikleri bulunmaktadır. Konunun daha çok elektronik ve bilgisayar mühendisliklerinin bilim alanına girmesi, bu yöntemlerin inşaat mühendisliği alanlarına uygulanması en büyük zorluğu oluşturmaktadır. Bu bakımdan bilim dalları arasında ortaklaşa çalışma yoluna gidilmesinin gerekliliği açıktır.

BÖLÜM ÜÇ

SAYISAL GÖRÜNTÜ ANALİZLERİ - AGREGA UYGULAMALARI

Bilgisayar ve görüntüleme teknolojileri hızlı bir gelişme sürecindedir. Bu gelişmeler, dijital görüntülerin alınması, verilerin işlenmesi ve ilgi alanlarındaki özniteliklerden sayısal bilgilerin elde edilmesine yönelik çeşitli uygulamaları da beraberinde getirmiştir. Kısaca “görüntü analizi” olarak isimlendirilecek bu yöntemler, farklı bilim dallarında uygulama alanı bulmaktadır.

Bu bölüm kapsamında öncelikle görme ve görüntü analiz aşamaları kısaca anlatılacaktır. Daha sonra, görüntü işleme ile agregalarda çeşitli tane segmentasyon yöntemleri hakkında bilgi verilecektir. Bu şekilde, inşaat mühendisliği için nispeten yabancı bir disiplindeki görüntü işleme ve analiz aşamalarının anlaşılması hedeflenmiştir.

3.1 Bilgisayarla Görme

Bilgisayarla görme, görüntü veya görüntü setleri üzerinden bilgilerin teorik ve algoritmik olarak bilgisayar tarafından çıkarılıp incelenmesini sağlayan bir bilimdir. Görüntü üzerindeki nesneler, nesnelerin konumu, yönlendirmeleri ve boyutları ile ilgili kavramları içerir (Baxes, 1994).

Görüntü işleme açısından ele alındığında insan gözünün algılama sistemi; görüntü yakalama, gruplama ve analiz konusunda bilinen en karmaşık sistemdir. Işığın çok kanallı ve pankromatik dalga boyları birer algılama sistemi olan gözler yardımı ile algılanır. Görülebilen spektrum tanımı; insan gözünün görebileceği elektromanyetik dalga boyu aralığını tanımlar. İnsan gözü ile görülebilen alana ait dalga boyları 400 nm ile 700 nm arasındadır (Gonzales ve Woods, 2007). İnsan gözünün çevresindeki nesneleri 3 boyutlu (3B) görmesinin nedeni, aslında sağ ve sol gözlerimizin farklı şeyleri görüyor olmasından kaynaklanmaktadır. İnsanlar, dinamik olarak paralel ve çok spekturumlu analog görüntü işlemeyi gözleri ve beyin yardımıyla sürekli olarak yapmaktadır. Gözlerimizle iki ayrı açıdan alınan görüntüler beyin yardımı ile birleştirilerek 3B görüntü oluşur. Bu şekilde, derinlik bilgisi (3. boyut bilgisi)

algılanır. Bilgisayarda görüntü işlemek için ise görüntünün bilgisayar ortamına uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Bu dönüştürme işlemine sayısallaştırma (digitizing) adı verilir. Bir resmin fotografik sunumunu, bir başka deyişle sayısal forma dönüştürülmesi çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilir. Dijital fotoğraf makineleri, kameralar veya tarayıcılarla sayısallaştırılan görüntüler iki boyutludur (2B). Üçüncü boyuta ait bilgiler ise stereo yöntem denilen iki veya daha fazla açıdan alınan görüntülerin bilgisayarda birleştirilmesi ile sağlanabilir. Bunun yanında, son yıllarda geliştirilen lazer kameralar da derinlik bilgisi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.

3.2 Görüntü Analizi

Renkli ya da gri seviyelerde görüntüler elde etmek ve doğal gelişmenin bir sonucu olarak görüntüleri analiz etme ihtiyacı, bu görüntülerden bazı ölçüm ya da yaklaşım yöntemleri ile veriler elde edilebileceğini göstermiştir. Görüntü analizleri resimsel sonuçlar üretmek yerine, bazı ölçüm işlemleri kullanarak genellikle orijinal görüntü karakteristiklerine dayanan sayısal ve grafiksel bilgilerin elde edilmesini sağlarlar. Bu şekilde nesnelerin görüntüleri sadece ‘resim’ olmaktan çok, saf nitel bilgilerdir.

Görüntü analizinin dört temel evresi vardır. Bunlar:

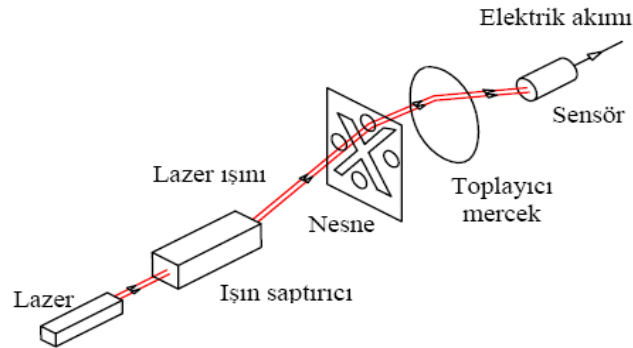
- Görüntü alma (sayısallaştırma)
- Görüntü işleme ve nesne tanımlaması
- Görüntü özneliklerinin ölçümü
- Sonuçların elde edilmesi ve istatistiksel değerlendirme

Bu evrelerin her biri, görüntü verilerinin istenilen amaç doğrultusunda kullanılabilmesi için uzmanlık ve bilgi gerektirir. Eğer veri işlemenin her bir evresinin etkileri tam olarak anlaşılmamışsa, ciddi olarak çarpıtılmış sonuçlara ulaşılabacaktır. Bu nedenle her bir aşamaya eşit önemin verilmesi gerekmektedir.

3.2.1 Görüntü Alma (Sayısallaştırma)

Görüntü alma, bir diğer tanımıyla sayısallaştırma, kameradaki görüntünün optik elektrik mekanizma ile elektriksel sinyallere dönüştürülmesi işlemidir. Görüntü alımının temel amacı, görüntü segmentasyonu ve öznelilik ölçüm işlemleri için filtrelenmiş bir görüntü üretmektir.

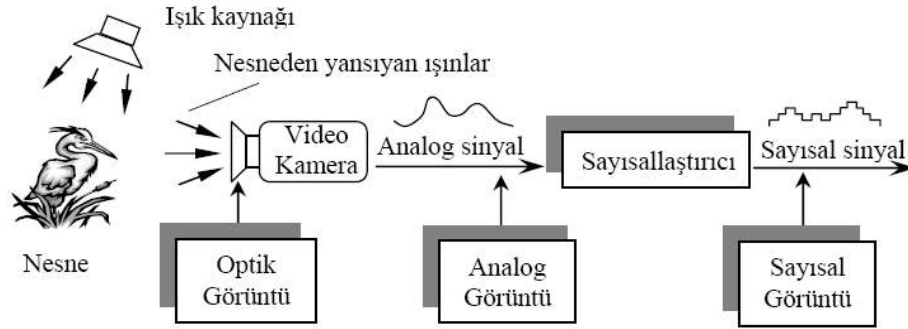
Sayısallaştırma işleminde temel aşamaların bir örneği Şekil 3.1’de görüldüğü gibidir. Mercekte oluşan görüntü kameranın sensörleri üzerine odaklanır. Bu ışık elemanları üzerinde ışığın durumuna göre elektrik sinyalleri üretilir. Bu sinyaller, bilgisayar ortamına görüntü aktarılmasında kullanılan analog sinyallerdir. Sinyalleri üreten sistemler vakum tüp, yarı iletken sensör gibi yapılardan oluşmaktadır (Yaman, Sarucan, Atak, ve Aktürk, 2001). Bu amaçla kullanılan diğer bir teknoloji ise katı hal kameralarıdır. Bu kameralar, Yük Bağlamalı Düzen (CCD - Charge Coupled Device) veya Tümler Metal Oksit Yarı İletken (CMOS- Complementary Metal Oxide Semiconductor) algılayıcılar kullanırlar.



Şekil 3.1 Sayısallaştırma işleminde temel aşamalar (Yaman ve diğer., 2001)

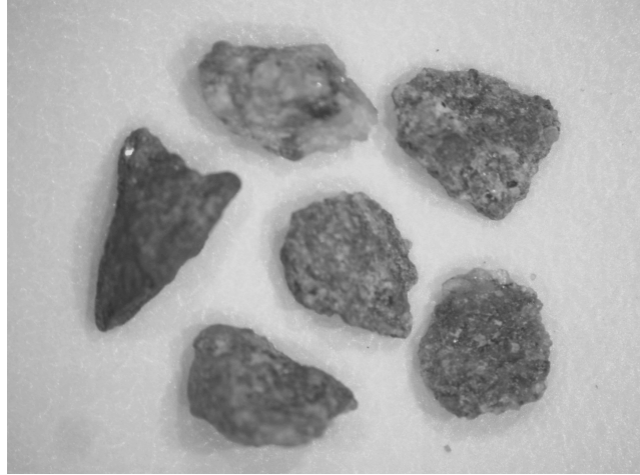
Şekil 3.2’de görüntü yakalama aşamaları kabaca şematize edilmiştir. Burada bir ışık kaynağı ile aydınlatılmış nesne mevcuttur. Nesneden yansıyan ışınlar optik formda kameraya aktarılır. Nesneyi tanımlayan bu ışınlar, kamerada elektrik sinyallerine dönüştürülür. Böylece görüntü analog forma çevrilmiş olur. Analog sinyaller bir sayısal dönüştürücüde sayısal sinyallere dönüştürülür. Son aşamada sayısal forma dönüştürülen görüntü artık bilgisayar ortamına aktarılarak işlenecek

hale getirilmiş olur. Bu işlem için görüntü sensörü ve bu sensörün üretmiş olduğu sinyalleri dijital forma dönüştürebilecek sistemlere ihtiyaç vardır. Sensörlerden elde edilmiş sinyaller hala analog formda ise, analog-sayısal dönüştürücüler ile sayısal hale getirilebilir (Yaman, ve diğer., 2001).



Şekil 3.2 Görüntünün optik formda alınması, analog forma dönüştürme ve dijital forma dönüştürme aşamaları (Yaman, ve diğer., 2001).

Bir kameranın temel amacı bir görüntüyü oluşturmaktır. Bu görüntü çoğunlukla büyütülmüş olup, kameranın çözünürlük kapasitesi tarafından kontrol edilir. Görüntü alma amacıyla kullanılan mikroskoplarda (optik, stereo, SEM), görüntünün netliği bakımından iyi ve kesintisiz aydınlatmaya, bunun yanında istenilen özelliklerin yeterli bir biçimde çözümlenebilmesi amacıyla uygun bir büyütme ve mükemmel odaklamaya ihtiyaç vardır. Bu kriterlerden herhangi birinin bulunmaması görüntü kalitesini kötüleştirecek, yorumlanmasını zor ya da anlamsız kılacaktır. Görüntü, normalde (daima olmasa da) kameranın optik eksenine ile aynı çizgide çakışmıştır ve üçlü mercek görüntüsünün ön tarafına düşürülmesi ile kamerada oluşmaktadır. Kamera görüntüyü dijital hale getirir ve resim bileşenleri ya da pikselleri düzenleyerek verileri bir görüntü dosyası olarak çalışma istasyonunun sürekli hafızasında saklar. Görüntü analizinde kullanılan görüntüler genellikle 8 bit gri seviyededir (bilgisayarda en düşük veri depolaması byte olarak yapılır. 1 Byte=8 Bit ve $2^8=256$). Diğer bir deyişle bir karakter 8 bit olarak temsil edilir. Bir gri seviyeli görüntüde 256 tane farklı gri ton değeri bulunabilir. Sıfır gri değeri siyaha, 255 gri değeri ise beyaza karşılık gelir. Bu değerler arasında ise gri seviyeler oluşur (Şekil 3.3).

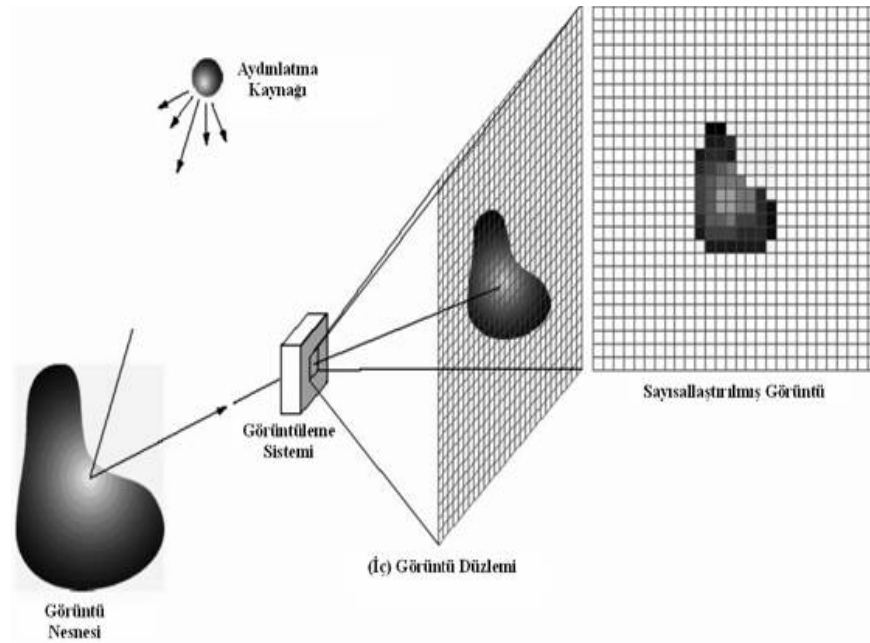


Şekil 3.3 Gri seviyelerde dijital görüntü

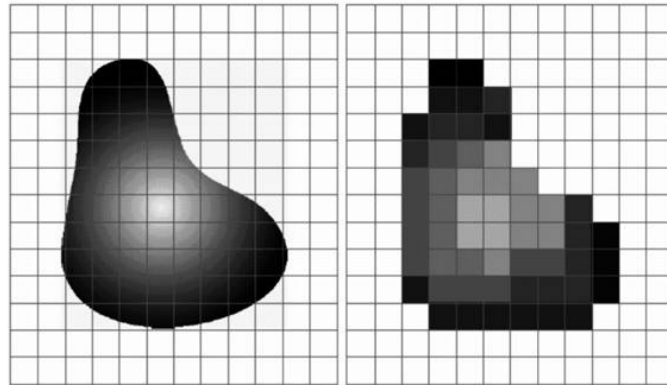
Kameradaki standart ayarlar görüntünün karşıtlık ve parlaklık ayarının yapılabilmesini sağlar. Bu nedenle gri seviye görüntüsü anlaşılabilirlik ve niteliklerin çözümlenmesi için optimize edilebilir. Görüntü daha sonra kullanım için hard diskte veya (dijital kameralarda hafıza kartlarında) saklanabilir.

3.2.1.1 Sayısal Görüntü

Sayısal bir resim, analog bir sinyalin sayısal bir sinyale dönüştürülmüş halidir. Bu dönüşüm, nesne tarafından yayılan enerjinin (analog sinyal) bir algılayıcı tarafından öngörülen elektromanyetik aralıkta algılanarak sayısal sinyal haline dönüştürülmesi ile gerçekleşir. Görüntü iki boyutlu bir işaret kayıdır. Fotoğraf gibi gözle görünen bir biçimde olabileceği gibi, manyetik bantta yazılı bir kayıt, ya da bilgisayar belleğinde duran sayısal değerler biçiminde de olabilir. Bir görüntü üzerindeki parlaklık, seviye ve konum olarak sürekli değişkendir. Buna karşılık bilgisayar hafızasında veriler ayrık sayılar biçiminde temsil edilirler. Bunun için bir resmin bilgisayar hafızasına girilebilmesi, onun belirli sayıda konum (ya da nokta) ve belirli sayıda parlaklık değeri ile ifade edilmesi ile mümkündür. Sayısallaştırma denen bu işlem resmin sürekli değişkenlerini ayrık değişkenlere dönüştürmek olarak tanımlanabilir (Şekil 3.4 - 3.5).

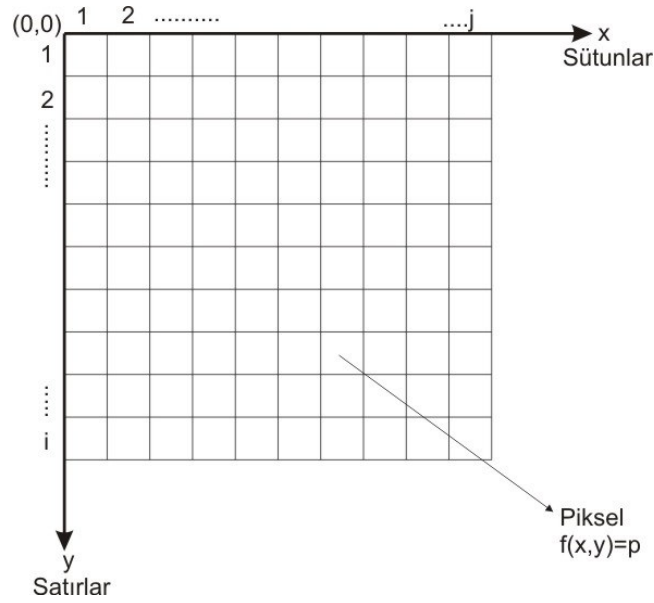


Şekil 3.4 Sayısal görüntünün oluşturulması



Şekil 3.5 Sensör dizisinde sürekli görüntünün oluşturulması

Matematiksel açıdan sayısal bir görüntü iki boyutlu bir vektör dizisidir. Diğer bir deyişle, her elemanı vektör olan bir matris olarak ifade edilebilir. Görüntünün iki bağımsız değişkeni x ve y geometrik boyutları oluşturur (Şekil 3.6). Matris elemanlarının değerleri de her $f(x,y)$ noktasındaki parlaklık değişim değerlerini gösterir. Matematiksel notasyon olarak sayısal resim Denklem 3.1'deki gibi gösterilir. Görüntü üzerinde $f(x,y)$ fonksiyonunun herhangi bir değerinde gösterdiği alana piksel denir. Piksel bir sayısal görüntünün en küçük elemanıdır.

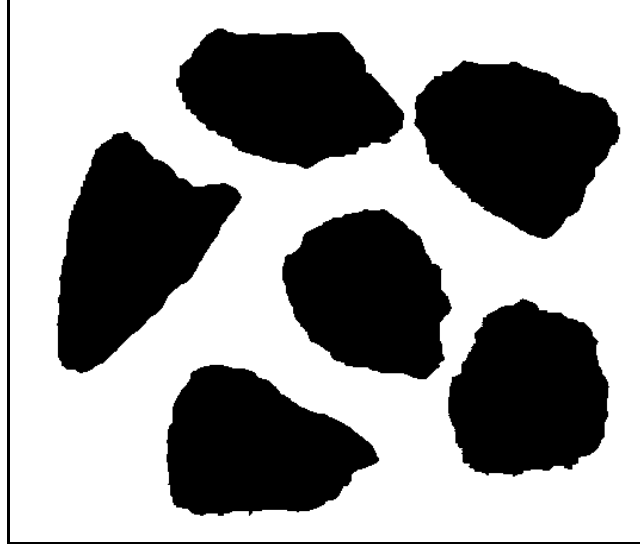


Şekil 3.6 Görüntünün sayısal gösterim modeli (Russ, 2002)

$$f(x, y) \approx \begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2)..... & f(1, j) \\ f(2,1) & f(2,2)..... & f(2, j) \\ . & . & . \\ . & . & . \\ f(i,1) & f(i,2)..... & f(i, j) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Sayısal görüntü işleme metotlarında görüntü üç farklı şekilde incelenmektedir. Yukarıda tanıtılan koordinat sisteminde piksellerin sayısal değerlerine göre 0/1 (binary image), gri seviye (gray scale) ve renkli (color image) olarak sınıflandırılırlar.

İkili (binary) bir görüntüde her bir piksel siyah ya da beyaz olarak oluşur. Burada sembolik olarak beyaz pikseller 1, siyah pikseller 0 değeri ile gösterilir (Russ, 2002). Bir resim gri seviyeden 0/1 görüntüye çevrilirken [0-255] aralığının orta değeri olan 128 değeri (eşik değeri olarak) alınır ve parlaklık değeri 128'den küçük olan pikseller 0'a; parlaklık değeri 128 den büyük olanlar 255'e çekilmek suretiyle resimde sadece siyah ve beyaz renklerinin kalması sağlanır. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi, görüntünün parlaklık değerleri sadece 0 ve 1 değerlerden oluşmaktadır. Elde edilen görüntü 2 bit derinliğe sahiptir.



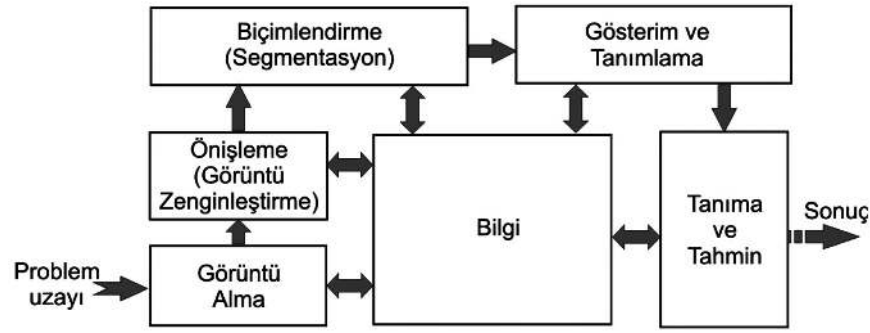
Şekil 3.7 Gri seviyedeki Şekil 3.3 görüntüsünün binary (0/1) dönüşümü

Görüntü işleme metotlarında eşikleme (Thresholding) adı verilen yöntemde ise eşik değeri kullanıcıya bırakılır. Diğer bir deyişle, görüntüyü işleyen kişinin belirleyeceği değer 128 olarak varsayılır ve resmin diğer değerleri görüntü işleyen kişinin belirlediği değere göre, 0-255 arasındaki bir sayıya, örneğin; 150'ye çekilir. Böylelikle 150 veya daha farklı bir değerinin altındaki değerler 0'a atanarak görüntü 0/1 hale çevrilebilir.

Renkli görüntüler de ölçümler için ayrıca hazırlanabilir, fakat onların renk çeşitliliği hassasiyetleri çok yüksektir. Gerçek-renk görüntüler (24 bit veya daha fazla) birkaç milyon renkteki bir olası dijital spektrumu kapsayabilir. Bunun anlamı, bu evrede veya bir sonraki ölçüm evresinin her ikisinde de pikseller, ilgilenilen bir bölge ile ilgili olmayabileceği gibi, bu bölgenin hariç tutulan pikselleri veya her ikisi birlikte de olabilir. Bu yüzden tasarımı yapılan işlemlerin bu sınıra ulaştığı an büyük bir dikkatle uygulamayı gerektirir.

3.2.2 Dijital Görüntü İşleme

Sayısal görüntü işleme çalışmalarında kullanılan birçok işlem basamakları vardır. En genel haliyle Şekil 3.8'de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 3.8 Görüntü işleme genel akım şeması (Gonzales ve Woods, 2007)

Görüntü zenginleştirme (image enhancement), en genel anlamda bir görüntünün belirleyici özelliklerinin geliştirilmesidir. Görüntü işleme kavramı oldukça geniş aralıkta değerlendirilebilen göreceli yeteneklere sahip bir alandır. Görüntü işleme disiplinde her bir çalışma eylemi, resimsel bilgilerin ortaya çıkarılmasına ve üzerinde işlem yapılmasına imkan tanır.

Görüntü zenginleştirme işlemleri, görüntü özelliklerinin iyileştirilmesi ya da görüntünün görünmeyen öğelerinin ortaya çıkarılmasında kullanılır. Sayısal görüntü işleme bir görüntünün ve özelliklerinin değiştirilmesi için kullanılan çok çeşitli teknikleri içerir. En basit düzeyde, görüntü işleme görüntüdeki piksellerin fiziksel olarak yerlerinin değiştirilmesi ile gerçekleştirilir (Sarp, 2003). Genellikle bu işlemler sonrasında özellikleri geliştirilmiş kalitede görüntüler elde edilir.

Bir görüntünün görünür özelliklerinin geliştirilmesi, nisbi bir kavramdır ve analiz yöntemine bağlı olduğu gibi, işlemi yapan kişinin iradesi ile de doğrudan ilişkilidir. Asıl amaç, görüntüdeki belli ilgi alanlarının görünümünü kolaylaştırmaktır. Görüntü özelliklerinin iyileştirilmesi nesnel veya öznel olarak iki farklı şekilde uygulanabilir. Nesnel uygulama görünür özellikleri daha ilgi çekici/hoş hale getirirken, öznel uygulamada esas amaç kaliteli görüntüler elde etmekten çok, görüntüdeki ilgi bölgelerinin ön plana çıkarılması işlemidir. Görüntü biçimlendirme bir resimdeki nesnenin sınırları, şekli veya o nesnenin alanı gibi ham bilgiler üretir. Eğer nesnelerin şekilleriyle ilgileniyorsa biçimlendirme o nesnenin kenarları, köşeleri ve sınırları hakkında bilgi verir.

Görüntü işleme, görüntü alımı sırasında meydana gelen hataların uzaklaştırılmasını içerecek şekilde, muhtemel görüntü geliştirme işlemlerini, gölge düzeltmeleri, karşıtlık/parlaklık optimizasyonunu, filtreleme, eşik/sınır belirleme, nitelik belirleme, nitelik yapılandırması, aritmetiksel ve mantıksal görüntü işlemlerini ve maskeleme gibi çok geniş bir alanı kapsar. Görüntü işleme operasyonları zıtlık (kontrast) ve uzaysal zenginleştirmeler olarak en temel iki alt sınıfa ayrılır:

- Kontrast ayarı, bir görüntünün parlaklığı, başka bir deyişle görüntü içerisindeki parlaklık dağılımı ile ilgilidir. Bu işlemle Siyah, Beyaz ve Gri bölgeler belirginleştirilir veya bastırılır.
- Uzaysal zenginleştirmeler, görüntü içerisindeki detayların belirginleştirilmesi işlemidir. Bu işlemler istenilen özellikler elde edilene kadar tekrarlanabilir.

Bu görüntü işlemlerinin temel amacı, bir sonraki evre için belirlenmiş rutin ölçümler için görüntü üretmek ya da hazırlamaktır. Bunun anlamı genellikle, yalnızca iki bit derinliğe sahip olarak üretilmiş siyah ve beyaz alanlar ve belirleyici özelliklerden oluşan bir 0/1 görüntü demektir.

İyileştirme işlemleri sonucunda, görüntünün karşıtlık (kontrast) ve parlaklık karakteristikleri geliştirilir, gürültüler azaltılır, netlik ayarı yapılır.

Farklı görüntü işleme algoritmaları geniş alt sınıflara ayrılarak incelenebilir. Farklı görevler ve problemler için farklı algoritmalar mevcuttur.

3.2.2.1 Görüntü İşleme Algoritmaları

Görüntü zenginleştirme (Image Enhancement) algoritmaları; özel bir uygulama için daha uygun bir sonuç üretmek amacıyla görüntüde yapılan işlemler olup, zenginleştirme algoritmaları olarak adlandırılır. Örneğin; görüntüdeki bulanıklığın giderilmesi veya keskinleştirme, kenarların belirginleştirilmesi, görüntüdeki zıtlığın

veya parlaklığın artırılması veya gürültünün kaldırılması gibi uygulamalardır (Sarp, 2003).

Görüntü zenginleştirmenin amacı, orijinal görüntünün analiz yapılabilmesi için uygun hale getirilmesidir ve bir ön işlemdir. Görüntü analiz çalışmaları farklı uygulamalar ve farklı amaçlar için yapılabilmesi nedeniyle görüntü zenginleştirme fonksiyonları da çeşitlilik gösterir. Örneğin X-Ray görüntüsünün iyileştirilmesi için kullanışlı olan bir görüntü zenginleştirme fonksiyonu, mikroskop fotoğrafları için gerekmebilir veya yetersiz kalabilir. Bu yaklaşımla görüntü zenginleştirme operasyonları üç başlık altında incelenmiştir:

- Noktasal görüntü zenginleştirme operasyonları; İyileştirilmiş piksel değeri ile orijinal piksel değeri aynı koordinatlara sahiptir.
- Bölgesel görüntü zenginleştirme operasyonları; İyileştirilmiş bölge koordinatı ile orijinal bölge değeri aynı koordinatlara sahiptir.
- Global görüntü zenginleştirme operasyonlarıdır; İyileştirilmiş piksel koordinat değeri orijinal piksel değerlerinin hepsine bağlı olarak hesaplanır.

Görüntüde piksel piksel değişiklik yapmak için nokta işlemleri kullanılır. Her piksel değeri bir önceki piksel'in değerine bağlı olan yeni bir piksel ile yer değiştirilir. En önemli nokta işlemleri; eşikleme, kontrast yayma ve histogram eşitleme olarak belirtilebilir.

Görüntü tamiri (Restoration) algoritmaları; bilinen bir nedenden dolayı zarar görmüş olan görüntüde düzeltme işlemlerinin yapılabilmesine yöneliktir. Örneğin, düzgün hareketten dolayı oluşan bulanıklığın kaldırılması, optik bozulmaların kaldırılması ve periyodik etkilenmelerin kaldırılması için geliştirilen algoritmalarıdır.

Görüntü segmentasyon algoritmaları; bir görüntüdeki elementlerin veya nesnelerin gruplandırılması, sınıflandırılması için kullanılır.

Görüntü sıkıştırma; sayısal bir görüntüyü sıkıştırmak için ihtiyaç duyulan bellek miktarını azaltmak amacıyla yapılan görüntü işleme teknikleridir.

Morfolojik ve sayısal filtreleme teknikleri; morfolojik işlemler genellikle görüntüdeki gürültüyü azaltmak, sınırları belirginleştirmek veya görüntüdeki iskeleti belirlemek gibi işlemler için kullanılır (Fisher ve diğer., 2006). Görüntü işlemede kullanılan filtreleme teknikleri ya yüksek ya da alçak frekansların geçişlerini engellemek amacıyla kullanılan tekniklerdir. Yüksek frekansların geçişini engellemek görüntüdeki bulanıklık veya düzleştirme (smoothing) işlemlerini gerçekleştirmek için yapılır. Alçak frekans geçişlerinin engellenmesi ise genellikle görüntüdeki kenarların belirginleştirilmesi veya zenginleştirme için yapılır (Goceri ve Boyen, 2006).

Filtreleme teknikleri ya frekans ya da uzaysal ortamda gerçekleştirilir. Uzaysal ortam görüntüdeki pikseller topluluğunu ifade eder ve uzaysal ortam metotları ise doğrudan bu pikseller üzerinde yapılan işlemleri belirtmektedir (Fisher ve diğer., 2006).

Görüntü işleme için uzaysal maskeler kullanıldığında bu işlem uzaysal filtreleme (spatial filtering) ve maskeler ise uzaysal filtreler (spatial filters) olarak adlandırılmaktadır.

Görüntü işleme için frekans ortamında yapılan filtreleme, Fourier Dönüşümü kullanılarak yapılmaktadır. Fourier dönüşümü bir görüntüyü sinus ve cosinus parçalarına ayırmak için kullanılan önemli bir görüntü işleme aracıdır.

Fourier açılımının en büyük dezavantajı, sadece frekans verisinin olması buna karşılık zaman bilgisini içermemesidir. Bu nedenle bir görüntüdeki bütün frekanslar gösterilebilir ancak bu frekans değerlerinin ne zaman elde edildiği belirtilemez. Bu problemi çözmek için geçmiş yıllarda zaman ve frekans bilgisini aynı anda gösteren çeşitli çözümler üretilmiştir. Bu probleme bulunan en son çözüm ise dalgacık dönüşüm tekniğinin kullanılmasıdır. Çok boyutlu görüntüler için ise dalgacık dönüşümü ayrı ayrı her boyutta gerçekleştirilir. Çünkü dalgacık dönüşümü, matris

değerlerinin birleşiminden dolayı dalgacık dönüşüm matris değerlerinin çarpımı şeklinde yazılabilmektedir (Polikar, 2006).

3.2.3 Görüntü Özniteliklerinin Ölçümü

Görüntü özelliklerinin zenginleştirme işlemleri ile belirlenmesinden sonra, ilgi bölgeleri renk derinliklerini esas alan sistem tarafından tanımlanabilir. Gri seviye ya da renkli görüntü ilgi bölgeleri seçilirse, yoğunluğa bağlı hesaplamalar da örneğin, ilgi bölgelerindeki gri ya da renkli gölge ortalaması yapılabilir. Bir ilgi bölgesinin tanımlanmasıyla, sistem daha önce tanımlanan kriterleri esas alarak, ilgi alanının toplam alan, çap, gölge faktörü, uzunluk ölçümleri (feret oranları), ortalama yönlendirmeler ve buna benzer diğer geometrik ve matematiksel değişkenler ölçülebilir. Ayrıca, yardımcı analiz yazılımları vasıtası ile matematiksel fonksiyonları kullanılarak hesaplamalar yapılabilir.

Agregalarda görüntü özniteliklerinin ölçümü ile ilgili yapılan bazı çalışmaların işlem adımları Bölüm 3.4’de anlatılmıştır.

3.2.4 Sonuçların Elde Edilmesi ve İstatistiksel Değerlendirme

Bir görüntü alanındaki ölçülen ilgi bölgelerinin her birinden elde edilen verilerin, çıktıları alınabilir, grafikler halinde sunulabilir ve/veya daha ileri analizler için bir veri tabanına dönüştürülebilir. Genellikle bazı analizlerin sonuçlarından araştırmada geri besleme sağlamak için sunular veya raporlar birleştirilebilir. Görüntü verilerinin dikkatle yorumlanması gerekir. Daima hatırlanması gereken bir durum; istatistik olarak, bir görüntüden analiz edilen küçük bir alanın, malzeme ya da yapının doğal hacmi dikkate alındığında, asıl yapıyı her zaman kesin olarak temsil edemeyeceğidir. Sonuç bulgulara erişilebilmesi için, bulunan sonuçların güvenilirliğinin her derecesinde birçok görüntünün analiz edilmesi gerekir.

Görüntüler doğada 2 boyutlu olsalar da kendi içlerinde malzemenin hacimsel yapısını temsil ederler. Son yıllarda gelişen teknikler, 2 boyutlu görüntü ile beraber düşey bir istifte 3. boyutu geliştirme yeteneğine sahiptir. Böylece, 2 boyutlu

görüntülerin bir Z ekseninde yapılanması ile, 3 boyutlu modellerinin oluşumuna imkan tanır.

3.3 Agregalarda Dijital Görüntü Analizi

Dijital görüntü analizi, agrega tanelerinin karakterize edilmesi amacıyla son yıllarda üzerinde yoğun bir şekilde çalışılan bir yöntemdir. Dijital görüntü analizinde agrega taneleri bir veya daha fazla dijital kamera vasıtası ile alınır. Dijital halde alınıp kaydedilmiş görüntülerden, bazı bilgisayar yazılımları ile tanelerin boyut dağılımı, şekil değişkenleri vb. özellikleri belirlenebilir. Agregaların bu özelliklerinin belirlenmesinde her bir tanenin diğerlerinden ayrılarak, tekil olarak ele alınıp değerlendirilmesi gereklidir. Ancak etkili bir segmentasyon tekniği olmadan, görüntüdeki tanelerin birbirlerinden ayrılması ve istenilen verilerin analizi her zaman mümkün olamamaktadır.

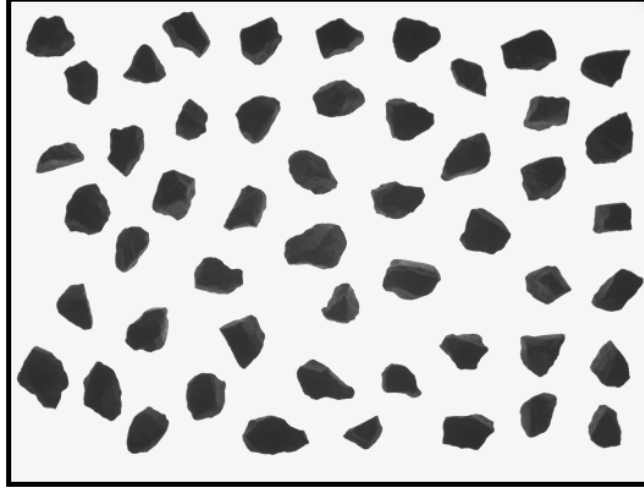
Görüntü işleme ya da diğer bir tanımla görüntü geliştirme işlemleri; gölge düzeltmeleri, karışıklık/parlaklık optimizasyonu, filtreleme, eşik/sınır belirleme, nitelik belirleme, nitelik yapılandırması, aritmetiksel ve mantıksal görüntü işlemleri ve maskeleme gibi geniş bir alanı kapsar.

Görüntü işlemenin temel amacı, gerekli ölçümler için görüntü üretmek ve/veya hazırlamaktır. Genellikle yalnızca iki bit derinliğe sahip olarak üretilmiş örneğin siyah ya da beyaz alanlar ve belirleyici özelliklerden oluşan bir “0/1” (binary) görüntü üzerinde yapılır.

3.3.1 Agregalarda Görüntü Alma

Agrega gibi tanelerden veya beton kesitlerden görüntüler bir CCD veya CMOS kamera ile alınabilir (Şekil 3.9). Görüntüler bir yüzeyden veya hareketli bant üzerinden doğrudan alınabilir. Hareketli bantlardan alınacak görüntülerde lens kapanma hızı çok yüksek, otomatik odaklamalı kameralar kullanmak ve yüksek ISO değerleri ile görüntü almak gereklidir. Görüntüler genellikle 8 bit gri seviyede analiz

edileceğinden, agregaların üzerinde bulunduğu yüzeyin siyah ya da ışığı yansıtmayacak ve agregaya ile karşılık sağlayacak bir renkte olması gerekir.



Şekil 3.9 Agregaların CCD Kamera ile alınmış 8 bit derinliğinde görüntüsü

3.3.2 Agregalarda Görüntü İşleme ve Nesne Tanımlaması

Görüntü işleme adımları görüntü segmentasyonu ile birlikte başlar. Bu işlemler, belli nesnelerin görünür özelliklerinin iyileştirilmesi ve diğer nesnelerden izole edilmesi işlemidir. Bu şekilde, nesnelerin şekilleri belirlenebilir ve diğer ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak sınıflandırılabilir. Agregalar gibi farklı geometrik özelliklerdeki tanelerin segmentasyonu üzerinde son zamanlarda yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Segmentasyonda amaç, agregaya tane boyutu ve şekil gibi değişkenlerin doğru bir biçimde belirlenebilmesi ve/veya sınıflandırılabilmesidir.

Tanelerin segmentasyonu değişik şekillerde yapılabilir. Görüntü alımından önce taneler birbirinden fiziksel olarak elle ayrılabilir. Ancak süreklilik gerektiren işlerde bu uygulama pratik olmamaktadır. Bunun yanında, serbest düşmeye bırakılan tanelerin doğal olarak birbirine temas etmeyeceği, dolayısı ile birbirlerini örtmeyeceği prensibini esas alan iki boyutlu görüntü analiz sistemleri de mevcuttur. Ancak bu görüntülerin alımında yüksek hızda çekim yapabilen kameralara ihtiyaç vardır.

Tane segmentasyonu, özellikle agrega taneleri gibi düzensiz nesnelerin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiği durumlarda özen gerektiren işlemleri içerir. Belirlenmesi gereken özelliklerin boyut, şekil ve hatta yüzey pürüzlülüğü olduğu uygulamalarda doğru segmentasyon sonuçlarının elde edilmesi için sistematik yaklaşımlar gereklidir. Segmentasyonun doğruluğunu arttırmak için gerekli olan yol ise mümkün olduğunca kullanışlı bilgileri içermesini sağlamaktır. Örneğin; eşyüksele eğrili harita tane şekil bilgilerini sağlarken, görüntünün gradient değerlerini içermez. Sınır belirleme işleri ise, daha çok tane gradient değerleri ile ilgili bilgi verip, tane şekli ile ilgili sağlam bilgiler alınması güçtür. Bu iki yöntemin optimizasyonu ile daha iyi segmentasyon sonuçları almak mümkün olabilecektir.

Etkili bir segmentasyon yönteminin geliştirilmesinde aşağıda belirtilen 4 kriterin uygulanması gerekir (Gonzales, Woods, ve Eddings, 2004):

- Aşırı segmentasyonun önlenmesi,
- Yetersiz segmentasyonun önlenmesi,
- Görüntü kayıplarının en aza indirgenmesi,
- Tanelerde hatalı sınır oluşumlarının engellenmesi.

Bu kriterlerden ilk üçü uygun minimal bölgelerin belirlenmesi ile ilgili olup, bir tane için ancak bir minimal bölge vardır. Örneğin; bir tane için birden fazla minimal bölgenin olması durumunda, bu durum doğrudan aşırı segmentasyonun varlığına işaretir. Diğer yandan, birden fazla tanenin varlığında yalnızca bir tane minimal bölge varsa, ya yetersiz segmentasyon yapılmış, ya da tane kaybı meydana gelmiş olabilir. Minimal bölge, azalan değerlere sahip olmayan pikseller olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte, bir dijital görüntü üzerinde katı matematiksel kurallar uygulandığında bile birden çok minimal bölge tane sınırları içerisinde meydana gelebilir. Bu durumun üstesinden gelmek için değişken boyutlarda araştırma alanlarının kullanılması gerekir.

Son yıllarda inşaat mühendisliği alanında, tanelerin bilgisayar teknolojisini kullanarak segmentasyonu amacıyla çok sayıda çalışma yapılmıştır. Kendi uygulama alanlarında başarılı sonuçlar alan çalışmalardan birkaçı aşağıda tanımlanmıştır:

Kemeny, Devgan, Hagaman ve Wu, (1993) agrega tanelerinin iki boyutlu görüntülerden otomatik olarak segmentasyonunu içeren bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem, birbirine temas eden tanelerin sınırları boyunca meydana gelen gri seviye değişimlerini esas alır. Gri seviyedeki ani değişimde fondaki seviye farklılığının önemi büyüktür. Fon, tanelerden çok farklı bir tonda olmalıdır (Örneğin; bazalt için beyaz fon, beyaz kireçtaşı için siyah fon). Taneler arasındaki fon bölgesinin şekli, geliştirilen algoritma ile fon bölgesindeki keskin ve düz içbükey bölgelerin tanelerin birbiri üstünde temasta olduğu, şeklindeki yaklaşımla analiz edilir. Bu yöntem, birbirleri ile temas halinde bulunan parçaların kenarları boyunca keskin içbükey bölgelerin olduğu kabulüne dayanır.

Wang ve diğer., (1997) 2 boyutlu 0/1 bir görüntüde temas halindeki parçaların ayrılması için bir algoritma geliştirmiştir. Algoritmada öncelikle “poligonal yaklaşım” ile belirleyici köşelerin elde edileceği bir dereceye kadar agrega taneleri sınırlarına uygulanır. Daha sonra, bu köşe noktalarının tane sınırlarını oluşturma ihtimallerini esas alan farklı kategoriler içerisinde sınıflandırılır. Sonuçta tanelerin segmentasyon sınırları çeşitli değişkenleri (örneğin: en kısa mesafe) içeren bir fonksiyon yardımı ile belirlenir.

Ghalib ve Hryciw (1999) ise dönüm noktaları dönüşümünü (watershed transformation) esas alan bir segmentasyon yöntemi geliştirmişlerdir. Ghalib ve Hryciw bu yöntemi dijital bir görüntüdeki kil tanelerinin segmentasyonunda kullanmıştır.

Kim (2002), iri agrega taneleri için Canny tane sınırı belirleme yöntemini kullanmıştır. Bu yöntem, ticari olarak da satılan birçok görüntü analiz programında segmentasyon amacı ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Agrega tanelerinin segmentasyonu için kullanılacak bu yöntemin detayları Bölüm 3.3.2.6’da verilmiştir.

3.3.2.1 Eşikleme

Eğer bir dijital görüntüde agrega taneleri birbirleri ile temas halinde olmayıp ayrık duruyorsa basit bir eşikleme yöntemi bile, tanelerin birbirinden ayrılması mümkündür. Sembolik olarak basit bir eşikleme algoritması Denklem 3.2’de verilmiştir (Gonzales ve diğer., 2004).

$$\text{IF } I(p) > \text{Threshold} \quad \text{THEN} \quad I(p)=1 \quad \text{ELSE} \quad I(p)=0 \quad (3.2)$$

Burada, $I(p)$; piksel p ’nin gri seviyedeki değeridir. **Threshold** (eşik) ise belirlenmiş bir gri seviye değeridir.

3.3.2.2 Dijital Görüntüde Sınırlar

Dijital görüntüler tipik olarak iki boyutlu belirli gri seviyedeki piksellerden oluştuğundan, sınırlar birbirinden belirli bir şekilde farklılık gösteren komşu pikseller olarak tanımlanır. Gri seviye farklılıklarını değerlendirmede, gri seviye değişim oranını gösteren Sonka, Hlavac ve Boyle (1999) tarafından tanımlanan Denklem 3.3’deki mertebeye operatörü kullanılabilir (Kim, 2002).

$$\nabla I(x, y) = \left(\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y} \right) \quad (3.3)$$

Burada x ve y ortogonal koordinatlar, I ise pikselin gri seviye değeridir. Bununla birlikte, dijital bir görüntü birbirinden bağımsız piksellerin birleşiminden meydana geldiğinden mertebeye operatörü yaklaşımı gereklidir (Denklem 3.4).

$$\begin{aligned} \nabla_x I(x, y) &= I(x+1, y) - I(x-1, y) \\ \nabla_y I(x, y) &= I(x, y+1) - I(x, y-1) \end{aligned} \quad (3.4)$$

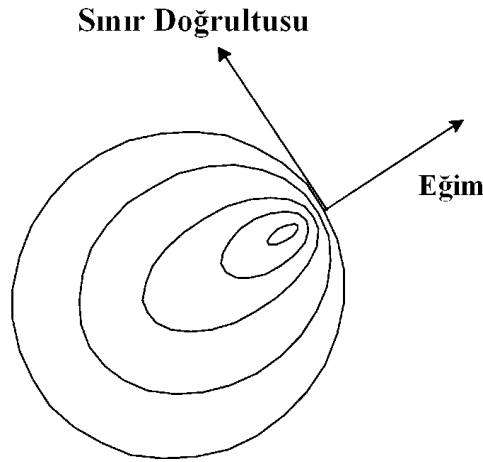
Böylelikle mertebeye operatörünün büyüklüğü Denklem 3.5’deki şekilde hesaplanabilir:

$$|\nabla I(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2} \quad (3.5)$$

Daha sonra, belirlenen bir eşik değerine göre her bir pikselin kenarın bir parçası olup olmadığı belirlenir. Mertebenin doğrultusu, sınır doğrultusuna diktir ve Denklem 3.6 ile hesaplanır:

$$n = \frac{\nabla I}{|\nabla I|} \quad (3.6)$$

Burada; n birim vektördür ve mertebenin doğrultusunu ifade eder. Şekil 3.10'da aynı gri seviye değerlerine sahip sınırların simgelandığı bir görüntü sunulmuştur. Bu görüntüde eğim (mertebe) doğrultusu ile sınır doğrultusu arasında 90°'lik açı olduğu görülmektedir.



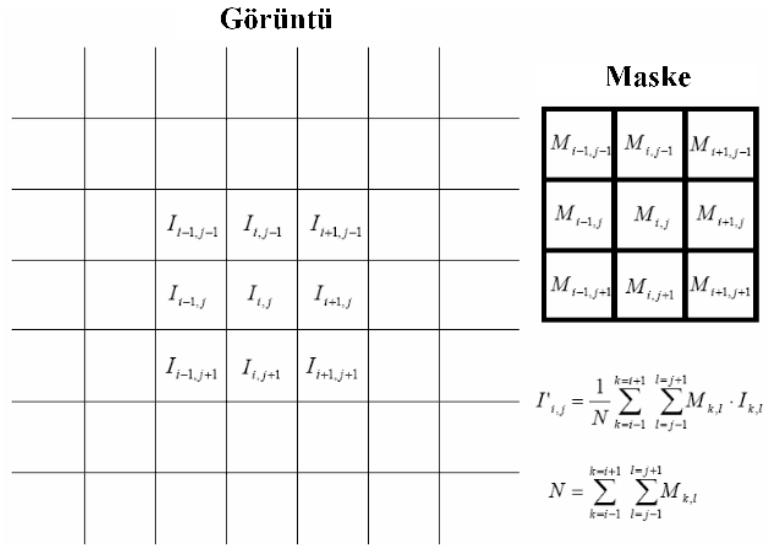
Şekil 3.10 Dijital görüntüde kenarlar (Russ, 2002)

3.3.2.3 Sınır Belirleme İşlemleri ve Gaussian Filtreleme

Sınırların belirlenmesi için uygulanan işlemler bütünü (convolution) Denklem 3.7'deki gibi ifade edilir.

$$I'(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} M(a, b) I(x-a, y-b) da db \quad (3.7)$$

Burada; I dönüştürülmüş bir görüntü, M sınır belirleme maskesi (filtre), I orijinal görüntüdür. Bu formül, orijinal görüntüdeki bütün piksel değerlerinin komşu piksellerin ağırlıklı toplamaları ile yer değiştirmelerini ifade eder. Sınır belirleme maskesinin her bir katsayısı işlem boyunca orijinal görüntüde karşılığı olan piksel değeri ile çarpılacaktır. Sınır belirleme maskesinin boyutu, komşu piksellerin boyutunu belirler. Şekil 3.11’de orijinal görüntünün dönüştürülmesinde kullanılan 3x3 bir sınır belirleme maskesi görülmektedir. Görüntüdeki her bir piksel $I_{i,j}$ ’nin $I'_{i,j}$ ’ye dönüştürülmesi işlemi sırasında yeni gri seviye değerleri alır.



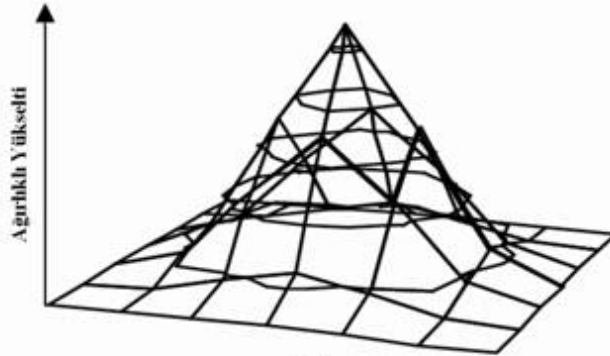
Şekil 3.11 İki boyutlu sınır belirleme işlemi (Kim, 2002)

Denklem 3.8’de gösterilen ve Sonka ve diğer., (1999) tarafından tanımlanan gaussian filtre de bir çeşit sınır belirleme filtresidir (Kim, 2002). Genellikle bir görüntüdeki parazitleri gidermek için kullanılır. Gaussian filtre (G) sınır belirleme maskesi katsayıları, Şekil 3.12’de görüldüğü gibi normal dağılıma sahiptir. Diğer bir deyişle bu yöntem, ilgilenilen bölgeye yakın pikselleri daha belirgin hale getirir.

$$G = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.8)$$

1	1	2	2	2	1	1
1	2	2	4	2	2	1
2	2	4	8	4	2	2
2	4	8	16	8	4	2
2	2	4	8	4	2	2
1	2	2	4	2	2	1
1	1	2	2	2	1	1

(a)



(b)

Şekil 3.12 (7x7) Gaussian filtresi (Kim, 2002)

(a) 2 Boyutlu temsili, (b) 3 Boyutlu temsili

3.3.2.4 Matematiksel Morfoloji

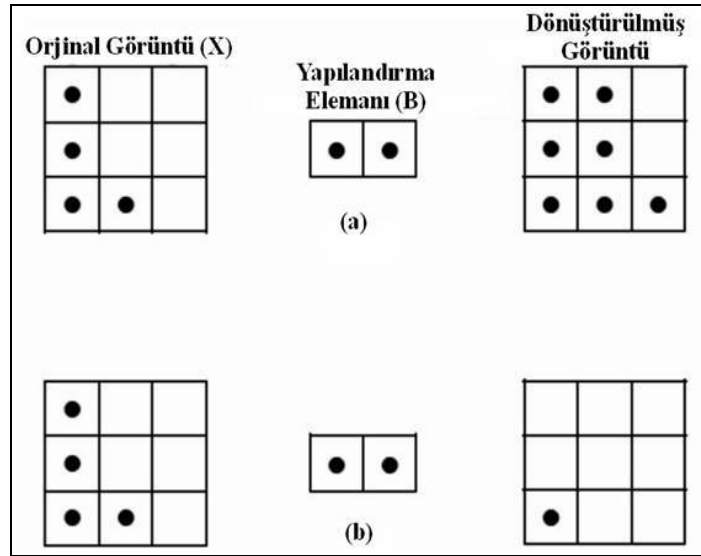
Dijital görüntü analizinde matematiksel morfoloji, görüntü üzerinde doğrusal olmayan cebirsel dönüşüm işlemlerini kapsamaktadır. İki temel morfolojik operasyon; görünüm özelliklerinin artırılması (dilation) ve azaltılmasıdır (erozyon). Binary (0/1) dilation piksel değerleri 0 ve 1 olan iki görüntünün vektör toplamıdır. Örneğin; Şekil 3.13’de görüldüğü gibi; X görüntüsü pikselleri (0,0), (1,0), (0,1), (0,2) ve B görüntüsünün pikselleri (0,0), (0,1) ise dönüşüm görüntüsü $X' = \{(0,0), (1,0), (2,0), (0,1), (1,1), (0,2), (1,2)\}$ olacaktır. Dilation operatörü aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır (Gonzales ve diğer., 2004).

$$X \oplus B = \{p | p = x + b, x \in X \cdot \text{and} \cdot b \in B\} \quad (3.9)$$

Burada; p yatay ve düşey koordinatlara sahip bir piksel, $\oplus$ dilation operatörü. Tersine erozyon operatörünün anlamı iki binary görüntünün vektörel olarak çıkarılmasıdır. Şekil 3.13’de görüldüğü gibi yukarıda belirtilen iki görüntüde erozyon operatörü ile dönüştürülmüş görüntü $\{(0,0)\}$ olmaktadır. Erozyon operatörünün matematiksel morfolojisi;

$$X \ominus B = \{p \in \mathcal{E}^2 | p + b = X, \text{for every } b \in B\} \quad (3.10)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada; $\ominus$ erozyon operatörüdür. Küçük görüntü B ’nin şekline bağlı olarak ana görüntü üzerinde farklı dönüşüm etkileri yaratılabilir.



Şekil 3.13 Matematiksel Morfoloji (Kim, 2002) (a) 0/1 dilation (b) 0/1 erozyon

Binary dilation ve erozyon operatörleri, dönüm noktası dönüşümlerini tanımlamada etkili bir şekilde kullanılmaktadır.

3.3.2.5 Dönüm Noktası (Watershed) Dönüşümleri

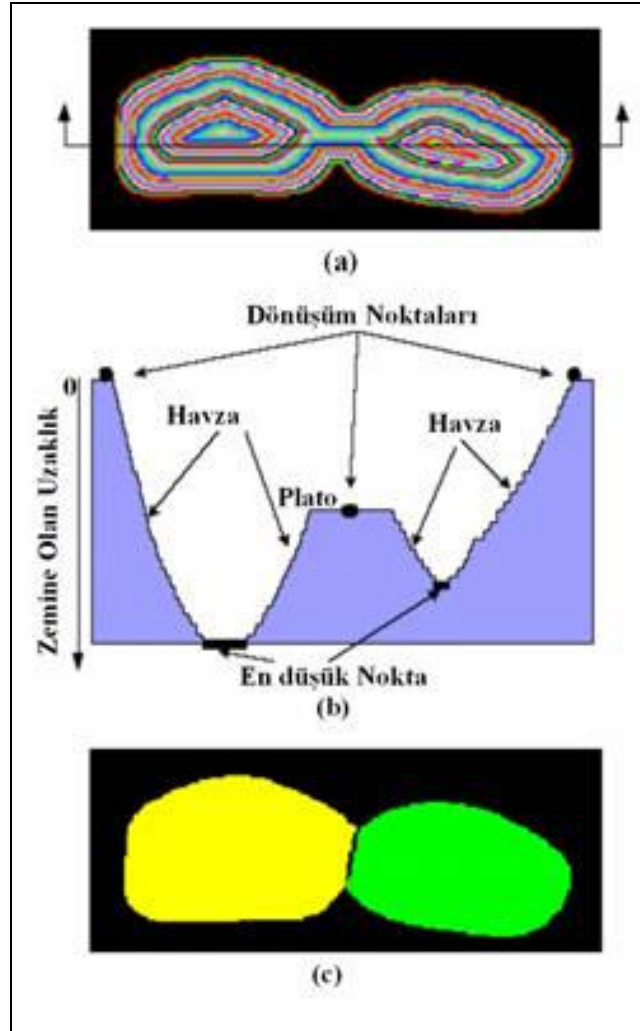
Dönüm noktası dönüşümlerinde dijital görüntüler topografik haritalar olarak ele alınır. Bu görüntülerde sırt (doruk) hatları, çukur (drenaj) bölgeleri olarak bölümlenir. Bu hali ile gri seviye görüntüleri üç boyutlu eşyüksekti haritalarına benzetilebilir (Huber ve Hebert, 1999). Dönüm noktası dönüşümlerinin ana fikri, eşyüksekti haritalarında olduğu gibi farklı yükseltideki bölge sınırlarını ifade eden değişim noktalarının belirlenmesidir.

Genel olarak, optik kameralardan elde edilen yoğun ışıklı görüntüler doğrudan dönüm noktası dönüşümlerinde kullanılamaz. Çünkü aydınlık görüntüler, farklı özellikteki bölgelerin belirlenmesinde yeterli kalitede topografik kabartmalar sağlayamaz. Bu nedenle yeterli yüzey bilgilerinin sağlanabilmesi için, mertebe ya da mesafe görüntüleri genel olarak kullanılır. Mertebe görüntüleri Denklem (3.3) ile dönüştürülürken, her bir pikselin bir ilgi bölgesine ne kadar uzaklıkta olduğunun tespiti yapılır. Örneğin; ilgi bölgesi bir daire ise ve görüntüdeki diğer bölgeler fon ise, ilgi bölgesinin sınırları (her piksel fona bitişik) 1 piksel değerine sahip olacaktır. İlgi bölgesinin merkezine en yakın olan pikseller daha yüksek değerler alacaktır. Bu mesafe dönüşümü, binary erozyon operatörü kullanıldığında en basit anlamda aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\forall p \in X, \quad D_x(p) = \min \{n | p \notin (X \ominus nB) \} \quad (3.11)$$

Burada; X ilgi bölgesi, D_x ilgi bölgesinin mesafe fonksiyonudur ve p pikselinin diğer bölgelerden olan mesafesini ifade eder, n sıfır ya da pozitif bir tam sayı, B birim çaplı yapısal eleman ve $X \ominus nB$ erozyon operatörü tarafından B yapısal elemanı ile n kez dönüştürülmüş görüntüdür. Diğer yandan mesafe dönüşümleri, p pikselini içermeyen yapısal eleman B ile en az sayıda ilgi bölgesi erozyon işlemleri ile sağlanır.

Şekil 3.14 (a)'da birbiri ile temas halindeki iki 0/1 görüntünün eşyüksekti haritası, Şekil 3.14 (b)'de (a)'daki görüntünün kesiti, coğrafi kavramları ve dönüm noktaları ile birlikte gösterilmektedir.



Şekil 3.14 Dönüm noktası dönüşümü (Kim, 2002)

(a) Eşyükselti haritası (b) Eşyükselti haritası enkesiti

(c) Segmentasyonu yapılmış görüntü

Minimum bölgeleri (regional minima), yükselmeyen bölgelerin aşağıdaki şekilde belirtilmesi ile tanımlanır.

$$\forall p_i, p_{i+1}, \quad I(p_i) \geq I(p_{i+1}) \quad (3.12)$$

Yani, minimum bölgeleri birbiri ile bitişik olan her iki piksel için, birinci pikselin derecesinin ikincisinden büyük ya da eşit olması durumudur. Minimum bölgesinin elde edilmesinden sonra, dönüm noktaları C++ programlama dilinde ifade edildiği gibi aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$\begin{aligned}
& \text{While } (h = h_{\max} \text{ to } h_{\min}) \{ \\
& \quad \text{While } (\text{until } \forall_p \text{ is filled where } \{ ID(p) == h \} \{ \\
& \quad \quad \forall Z_i \oplus B; \\
& \quad \text{Set } \forall_p \text{ as Watershed where } DZ_i(p) == 1; \} \quad (3.13)
\end{aligned}$$

Burada; h pikselin değeri, I_D dönüştürülmüş eşyükselti haritası, Z_i bir minimum bölgesine bağlanan bölge, $\oplus$ binary dilation operatörü, ve D_Z ilgi bölgesinin mesafe operatörüdür.

3.3.2.6 Canny Yöntemi ile Tane Sınırları Segmentasyonu

Yöntemde ilk adım, sınırların Canny yöntemi ile en yüksek eşik (TH) ve en düşük eşik (TL) değerlerinde oluşturulmasıyla Bölüm 4.3.2’de bahsedilen dördüncü kriterin sağlanmasıdır. Eşik değerleri çok farklı tutulursa, büyük olasılıkla yalnızca çok büyük ayrılmalar algılanacaktır. Bu büyük farklar birbirlerine temas halinde olan tanelerin içlerinde değil de sınırlarında olacağından, sınır görüntüsü, eşyükselti haritasına çevrilecek bir 0/1 görüntüdeki tanelerin sınırlarını çizmek için kullanılacaktır. Bu işlem şu şekilde gösterilebilir:

$$IF(Canny_H(p) = 255) \quad I_B(p) = 0 \quad (3.14)$$

Burada **Canny_H(p)**, Canny sınır belirleyicisi ile **TH** ve **TL** eşik değerleri kullanılarak, dönüştürülmüş sınır görüntüsündeki p pikselinin değerini, 255, 8 bit dijital görüntüdeki sınır pikselini, ve **I_B(p)** ise orijinal görüntünün eşiklenmesinden elde edilen I_B binary görüntüsündeki p pikselinin binary değerini göstermektedir (Canny, 1986).

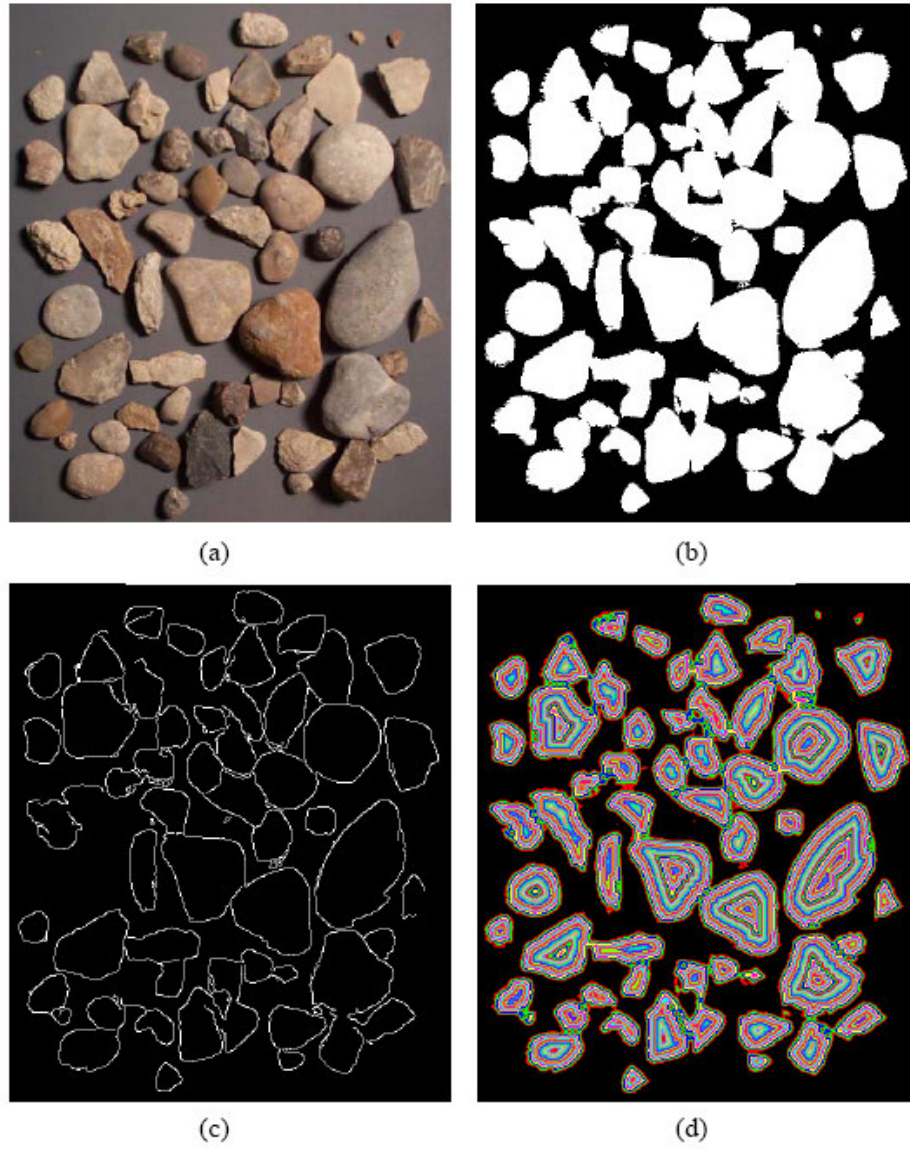
İkinci olarak aşırı segmentasyonu engellemek için, dönüm noktaları, Canny ile göreceli düşük TH ve TL eşik değerleri kullanılarak belirlenen sınırlarla karşılaştırılır. Bu düşük standart kullanıldığından, sınır görüntüsünde bütün tane

sınırlarının görüntülenmesi olasıdır. Böylece, belirli kısımlarda eğer dönüm noktaları ile Canny yardımıyla bulunan sınırlar arasında büyük bir fark oluşursa, dönüm noktaları fazla ayrılmaya neden olan yanlış sınırlar olarak alınabilir. Pratikte, bu işlem şu şekilde açıklanabilir:

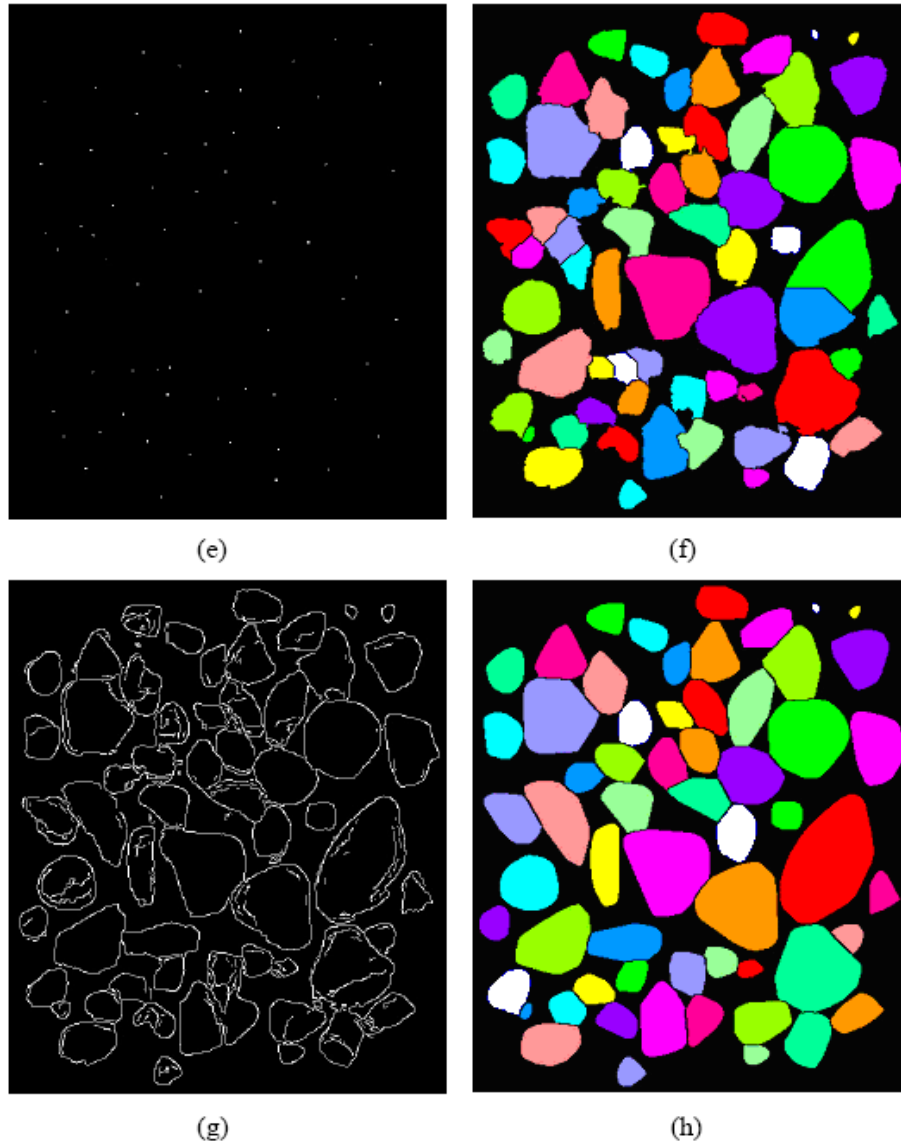
$$\begin{aligned}
 IF(\forall Canny_L(a,b)=0) \quad I_W(x,y) &= R \\
 \forall a \in [x-0.5xS, x+0.5xS] \\
 \forall b \in [y-0.5xS, y+0.5xS] & \quad (3.15)
 \end{aligned}$$

Burada; $Canny_L(a,b)$, (a,b) pikselinin, düşük TH ve TL eşik değerleri kullanılarak, Canny sınır belirleyicisi ile dönüştürülmüş değerini, 0 hiçbir sınır olmadığını, $I_W(x,y)$ dönüm noktasındaki pikselin değerini, R piksele yakın alanlarda bulunan herhangi bir tanenin değerini ve S arama penceresinin boyutlarını ya da başka bir deyişle, eğer dönüm noktasındaki bir piksele karşılık gelen *Canny* sınırına çok yakınsa, piksel gerçek sınırda olarak algılanabilir. Aksi halde, piksel herhangi yakın bir alana dahil edilir, bu da farklı alanların birleştirilmesi anlamına gelir (Canny, 1986).

Segmentasyon algoritmasının genel gelişimi Şekil 3.15’de gösterilmiştir. İlk önce, rastgele dağılan parçacıklar (Şekil 3.15 (a)) taranmış ve 0/1 görüntüye (3.14) denklemi kullanılarak (Şekil 3.15 (b)) eşiklenmiştir. Şekil 3.15 (b)’de görüldüğü gibi, bazı taneler tek bir tane olarak görünecek şekilde birleşmiştir. Parçacık sınırlarının 0/1 görüntüde kaba bir şekilde çizilebilmesi için, 5x5 Gaussian filtresi ve yüksek TH ve TL eşik değerleri kullanılarak *Canny* sınırları belirlenmiştir. Sınır belirlenme işleminden sonra 0/1 görüntü bir mesafe haritasına dönüştürülmüştür. Bu mesafe haritasındaki tane şekillerinin, 0/1 görüntüsündekilerden daha belirleyici olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.15 Segmentasyon adımları (Kim, 2002): (a) Orijinal tane resmi (b) Eşiklenmiş görüntü, (c) Canny sınırları yüksek TH ve TL (d) Eşyüksehti Haritası



Şekil 3.16 (Devamı) Segmentasyon adımları: (e) Minimal Bölgeler
 (f) Dönüm noktalı segmentasyonu yapılmış görüntü (g) Canny sınırları düşük TH ve TL
 (h) Segmentasyonu yapılmış görüntü

Segmentasyon amacıyla, ilgi piksel değerleri kendilerine komşu durumdaki piksel değerleri ile karşılaştırılırlar. Eğer piksel değerleri kendilerine komşu durumdaki piksel değerlerinden herhangi birinden daha büyükse o piksel minimal bölgededir denir. Eğer karşılaştırma yapılan bölgede birbirine komşu durumdaki piksellerin sayısı aşırı fazla ise yetersiz segmentasyon meydana gelebilir. Tersisi durumda ise yine karşılaştırmanın yapılacağı alan çok küçükse aşırı segmentasyon ihtimali artacaktır.

Araştırma yapılacak alanın boyutunun belirlenmesinde zirve piksel değerleri kullanılır. Bu yaklaşım sembolik olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}
 & IF(I_D(x, y) \geq \forall I_D(a, b)) \quad THEN \quad I_D(x, y) = 1 \quad ELSE \quad I_D(x, y) = 0 \\
 & \forall a \in [x - 0.5x(KxH + C), x + 0.5x(KxH + C)] \\
 & \forall b \in [y - 0.5x(KxH + C), y + 0.5x(KxH + C)]
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

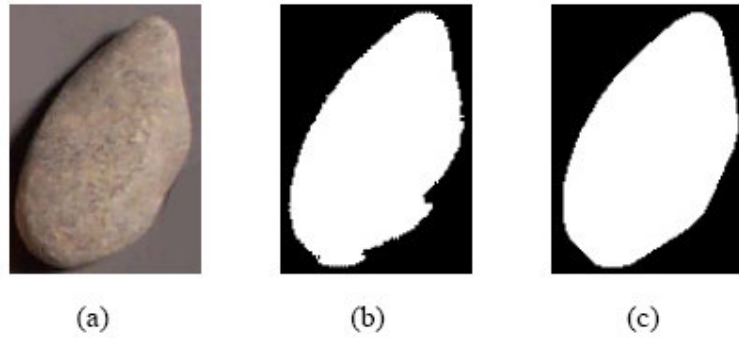
Burada; $I_D(x, y)$; (x,y) piksellerinin mesafesi, K ve C sabit, ve H ise (x,y) pikselinin yükseklik değeridir. $KxH+C$ boyutunda araştırma alanının kullanılması ile uygun minimal bölgelerin elde edilmesi mümkün olabilmektedir. Şekil 3.15’de uygun araştırma alanının seçilmesi ile, matematiksel minimal bölgenin ihmal edildiği gösterilmektedir.

Değişken boyutlu araştırma alan büyüklüğü seçimi esasına dayanan, minimal bölgelerin seçimi yönteminde basit ve etkili bir yöntemdir. Buna karşılık, doğruluktan uzak segmentasyon sonuçlarına ulaşmak da her zaman karşılaşılabilecek bir sorundur. Örneğin bir tane göreceli olarak yassı ise, araştırma alanının büyüklüğü olması gerekenden küçük olacağından, çok sayıda minimal bölge ile karşılaşılması olasıdır. Çünkü araştırma alanının büyüklüğü tanenin yüksekliğine bağlıdır. Diğer yandan taneler yoğun bir şekilde kümelenmişlerse ve segmentasyon işlemi sadece eşyüksekti eğrili haritalama yöntemini esas alıyorsa, tanelerin birbirlerinden başarılı bir şekilde ayrılması mümkün olmayabilir.

Görüntü analizinde karşılaşılan bu sorunlar, agrega tanelerinin analizinde farklı sınır belirleme algoritmalarının kullanılması gerektiğini göstermesi bakımından önemlidir.

3.3.2.7 Görüntü Restorasyonu

Görüntü restorasyonu, görüntü zenginleştirme işlemlerinde olduğu gibi görüntü kalitesinin artırılmasında kullanılır. Fakat tüm restorasyon işlemleri, bilinen ve daha önce orijinal görüntüden alınmış bilgileri esas aldığından tamamıyla güvenilirdir. Şekil 3.17’de agregalarda uygun olmayan aydınlatma koşullarında oluşabilecek bir durumun görüntü restorasyon tekniği ile giderilmesi aşamaları görülmektedir.



Şekil 3.17 Görüntü restorasyonu (Dilation-Erosion) (Kim, 2002):

(a) Orijinal resim; (b) Eşikleme ve 0/1 dönüşüm; (c) Aç-kapa işleminden sonraki 0/1 görüntü.

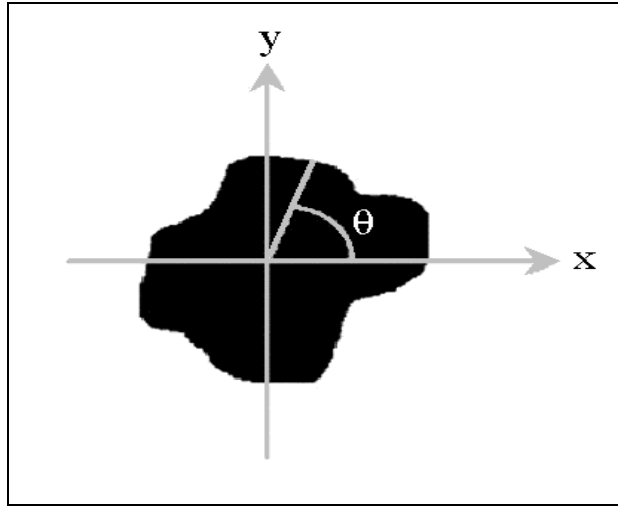
3.3.2.8 Ters Filtreleme

İyi odaklanmamış veya hareketli görüntülerde detaylar bulanık ve belirsiz görünür. Örneğin lensin odaklama sınırı dışında kalması durumu gibi, düzensizliğe neden olan bulanıklık fonksiyonu biliniyorsa, düzensizliği giderecek bir ters filtreleme yöntemi belirlenebilir. Bazen, düzensizliğin nedeni bilinmese bile, görüntünün kendisinden bu ipuçlarını belirlenebilir. Yine açılar ve ışık noktaları gibi bilinen görüntü özelliklerinin değerlendirilmesi ile gerçek görüntülere ulaşabilmek için ters bir filtreleme oluşturulması mümkündür.

Ters filtreleme, özellikle hareketli bantlardan alınacak agrega görüntüleri üzerinde görüntü analizleri ile güvenilir ölçümler yapılmasına imkan tanımaktadır.

3.3.3 Görüntü Özneliklerinin Ölçümü

Örnek olarak, görüntüleme cihazlarından biri ile alınan bir agreganın iki boyutlu 0/1 görüntüsü Şekil 3.18’de verilmiştir.

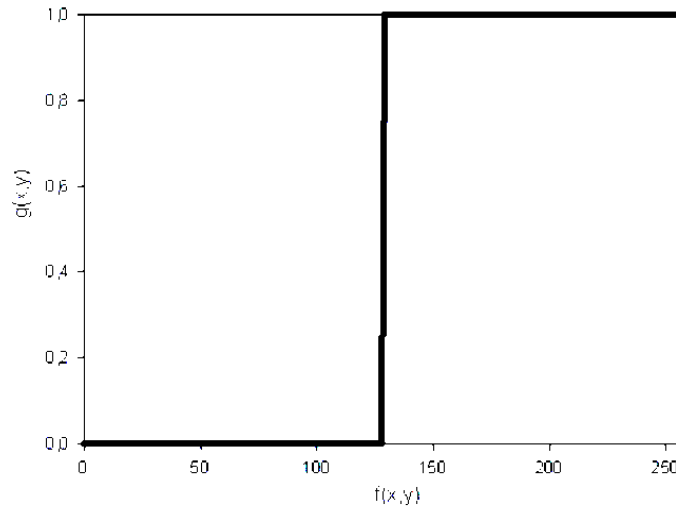


Şekil 3.18 Agreganın iki boyutlu modeli

Noktasal zenginleştirme fonksiyonları genel olarak Denklem 3.17’deki gibi tanımlanır. Şekil 3.19’deki değişim fonksiyonu kullanılarak, arka fon 1’ler (beyaz), nesne 0’lar (siyah) olarak agreganın görüntüsü zenginleştirilebilir.

$$g(x, y) = T[f(x, y)] \quad (3.17)$$

Bu şekilde agreganın şekli, plandaki ilgi alanlarında konumlanmış piksellerin toplamı ya da numaraların listelenmesi şeklinde bilgisayarda ifade edilebilir (Şekil 3.19). Bir agreganın tanesi için bir uzunluk, o uzunluğa ait her bir kare pikselin boyutlarının toplamı şeklinde elde edilebilir.



Şekil 3.19 Gri seviye görüntünün 0/1 görüntü değişim fonksiyonu

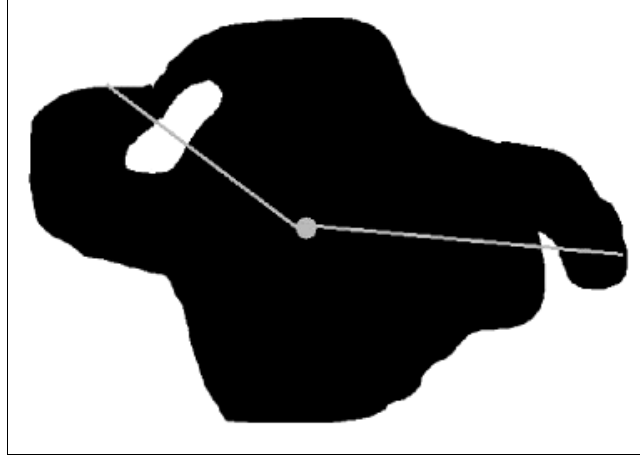
Fourier analizinde kullanılan θ açısı tanımlanmıştır. Koordinat eksenlerinin merkezi nesnenin kütle merkezindedir. Nesnenin kütle merkezi, aşağıdaki bağıntı (3.18) kullanılarak bulunmuştur.

$$\vec{r}_{CM} = \frac{\sum_i \vec{r}_i}{\sum_i 1} \quad (3.18)$$

Burada; $\sum_i$ nesneye ait bütün piksellerin toplamıdır. Durum vektörü (r_i) ise rasgele seçilmiş merkezden ilgili pikselin merkezine olan vektörel uzunluk olarak tanımlanır. Paydadaki sembol de “1” olup, payda yalın anlamı ile nesnenin toplam piksel sayısı cinsinden alanı şeklinde ifade edilir.

Nesnenin kütle merkezinden, dış sınır yüzeyine kadar istenilen sayıda ve/veya açıda geçirilen doğru parçaları ile nesne bölümlere ayrılır. Bu şekilde sayısal olarak nesnenin yüzeyi ortaya çıkar. Bu doğru parçalarının uzunlukları R_n ile gösterilir. Şekil 3.18’de görüldüğü şekli ile açılar $0-2\pi$ aralığında Gaussian çeyreklemeye yöntemi kullanılarak istenilen hassasiyette düzenlenebilir. Bu yüzey belirleme metodu ile piksellerle ifade edilen nesne yüzeyindeki küçük ölçekte dijital pürüzlülük sayısal olarak ifade edilecektir. Bu aşamada bazı enterpolasyon ya da düzeltme yöntemleri kullanılarak, istenilen seviyeye kadar dijital pürüzlülük giderilir.

Burada belirtmek gerekir ki, tane yüzeyinin belirlenmesinde kullanılan bu yöntemin geçerli olmayacağı bazı istisnai durumlar da vardır. Merkezden nesne yüzeyine kadar geçirilen doğru parçaları iki farklı yüzeyi kesmemelidir. Bu durum Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



Şekil 3.20 Kütile merkezinden nesne yüzeyine doğru geçirilen doğruların birden fazla yüzeyi kesmesi durumu.

Agrega şeklinin iki boyutlu ifadesinin matematiksel olarak tanımlanmasına imkan vermeyen bu durumlar porozite ve çıkıntı gibi istisnai durumlardır. Bu gibi durumlar, görüntü işleme aşamasında daha önce sözü edilen bir dizi aç-kapa (opening-closing) işlemleri ile de giderilebilir.

Gaussian dengelemesi, integraleri sayısallaştırmada kullanılan bir yöntemdir. Eğer f , $(-1, 1)$ aralığında bir fonksiyon ve N . Derecede Gaussian dengelemesi istenildiğinde ifade aşağıdaki şekilde gösterilir;

$$\int_{-1}^1 f(x)dx \approx \sum_{n=1}^N f_n w_n \quad (3.19)$$

Burada; fonksiyon x_n , $-1 < x_n < 1$, aralığında Gaussian dengelemesi yapılır. w_n bu aralıktaki Gaussian dengelemesinin ölçüsüdür. İntegrasyon limitleri a ve b olarak seçilir ve lineer dönüşüm uygulanırsa;

$$x'_n = \frac{1}{2}(b-a)x_n + \frac{1}{2}(b+a) \quad (3.20)$$

Fonksiyon bu yeni noktalar için değerlendirilecek olursa, Denklem (3.19)'daki toplam, aynı aralıktaki integrale karşılık gelir. Yüzey probleminde θ değerleri için limitler $a=0$ ve $b=2/\pi$ ise, bu dönüşüm $0 \leq n \leq N$ aralığında verilen bir değer için kullanılan θ_n değerlerini verir.

Şimdi $R(\theta) = (\theta_n, R_n)$ fonksiyonu, nesnenin kütle merkezinden yüzeyine bir θ_n açısı ile geçen doğrudur. θ_n açısı x ekseninden saat yönünün tersine doğru ölçülür. Bu fonksiyon her bir θ değeri için $\theta_{N+i} = \theta_i + 2\pi$ şeklinde periyodik olarak yapılandırılırsa, cosinüs ve sinüs fonksiyonları şeklinde ifade edilebilir.

$$R(\theta) = \sum_{j=0}^{\infty} [a_j \cos(j\theta) + b_j \sin(j\theta)] \quad (3.21)$$

Dikkat edilmelidir ki, b_0 değerleri sıfır olarak alınır, $\sin(0)$ benzer şekilde sıfıra eşit olur. Yine dikkat edilmesi gereken bir nokta da, Denklem (3.21)'in kompleks exponansiyel şeklinde yazılabileceğidir, ki bu sinüs ve cosinüs terimlerini birleştirir.

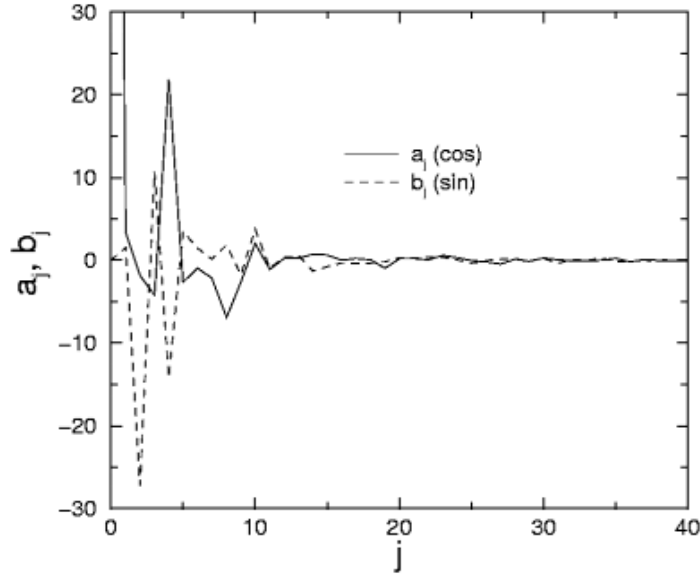
$$a_j = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} R(\theta) \cos(j\theta) d\theta$$

$$b_j = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} R(\theta) \sin(j\theta) d\theta \quad (3.22)$$

Bu integrallerde θ_n değerleri Gaussian çeyreklemeye yöntemine göre seçildiğinde çözümleri çok hızlı bir şekilde yapılabilir.

Şekil 3.21 a_j ve b_j değerleri ile Şekil 3.18'de gösterilen şekil için bulunan j değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir. Grafikten görülmektedir ki, j değerleri yükselirken katsayı değerleri düşme eğilimindedir. $j=20$ değeri için katsayılar ihmal edilebilir düzeye gelmektedir. Bu noktadan sonra, j nin daha yüksek değerleri için sadece nesne yüzeyine yakın, nesneye ait ve ait olmayan dijital pikseller birbirleri ile

karşılaştırılmaktadır. Bu pikseller nesne şekli açısından çok önemli olmamakla birlikte, yüzey pürüzlülüğü açısından bir anlam ifade etmektedir.

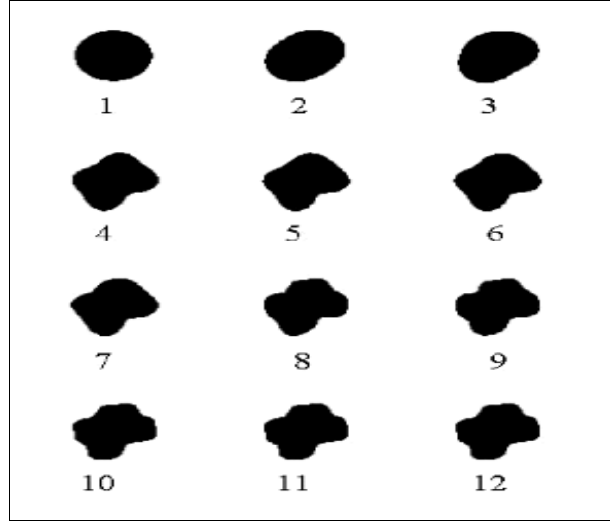


Şekil 3.21 “Şekil 3.20”deki nesnenin şekil tanımı için bulunan j indeksinin bir fonksiyonu olarak sinüs ve cosinüs değerleri.

Şekilden görülebileceği gibi, a_j 'ın yaklaşık 200 değeri için düşey düzlemde sonlanmaktadır. Bu yüzden daha küçük sinüs ve cosinüs değerleri gözlenebilir. Şekil 3.22’de farklı sayıda Fourier katsayıları için nesnenin çizilen şeklini göstermektedir.

$$R(\theta) \approx \sum_{j=0}^N [a_j \cos(j\theta) + b_j \sin(j\theta)] \quad (3.23)$$

Denklem 3.23’den de görülebileceği üzere a_0 katsayısı, nesnenin ortalama dairesel boyutunun bir ölçüsüdür. Diğer katsayıların ($j \geq 1$) ortalama dairesel yüzeyi gerçek şekle eşitlemeye çalıştığı düşünülebilir.

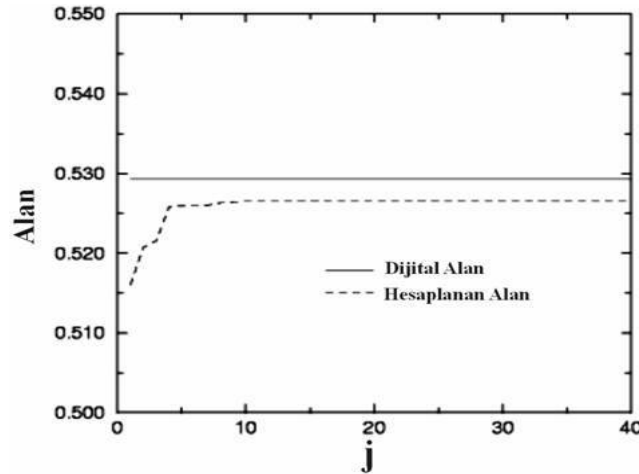


Şekil 3.22 “Şekil 3.20”deki agrega tanesinin farklı sayılarda sinüs ve cosinüs dönüşümü uygulandığında aldığı şekiller

Şekil 3.23 nesnenin hesaplanmış alanını ifade etmektedir. Seçilen A alanı için denklem, N katsayıları kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$A = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} [r(\theta)]^2 d\theta = \pi a_0^2 + \frac{\pi}{2} \sum_{j=1}^N (a_j^2 + b_j^2) \quad (3.24)$$

N=10 ya da daha fazla ise, asimptotik değerine ulaşır. Bu değer nesnenin gerçek dijital alanından sadece % 0,1 kadar küçüktür. Dijital alan her bir piksel alanı ile piksel sayısının çarpımından ibarettir. Bu durumda her bir pikselin alanı bir birim olarak kabul edilir. Nesnenin yüzeyi sadece sonlu sayıda noktadan analiz edilmektedir ve sonuçlar gerçek değerinden bir miktar farklıdır. Ancak yüzey noktaları sayısı daha yüksek dereceden bir Gaussian eğriliği kullanılarak yapılırsa, bu hata değeri de azalacaktır. Aynı zamanda bilgisayarın sayısal doğruluk sınırı da aşılmamış olacaktır. Bununla birlikte, piksellerle ifade edilen yüzeylerin tamamı ile ortaya konması istenmez. Muhtemelen bu detaylar gerçek değildir. Fakat kare pikselleri gerçek eğri yüzeyleri şeklinde ifade edebilen araçlar vardır. Bu nedenle, yüzey çözümlemesinin gerçekleştirileceği hassasiyet düzeyi için bir üst limit vardır.



Şekil 3.23 “Şekil 3.20”deki agrega şeklinin j indeksinin bir fonksiyonu olarak sayısallaştırılmış alanı

İki boyutlu görüntüler için tanımlanan bu yöntem; görüntü alımı, sayısal yüzey belirleme ve daha sonra Fourier analizi adımlarından oluşmaktadır.

Agrega tanelerinin şekli ve yüzey pürüzlülüğü ile ilgili matematiksel bağıntılar Bölüm 3’de verilmişti. Bu matematiksel bağıntılardaki uzunluklar, yukarıda bahsedilen fonksiyonlar yardımı ile belirlenebilir. Bu uzunluk değerleri bağıntılarda yerlerine konarak agrega geometrik özellikleri belirlenebilir.

3.3.4 Sonuçların Elde Edilmesi ve İstatistiksel Değerlendirme

Sonuçların elde edilmesi ve istatistiksel değerlendirme, görüntü analiz işleminin son aşamasıdır. İşlemler; nesnelerin şeklini, boyutunu, ortalama lokasyonlarını, yüzey yapıları, gri seviyeleri, renk gibi birçok değişkenin belirlenmesi işlemlerini içerir. Bir nesnenin sınıflandırılmasında kullanılan karakteristikler, uygulama ihtiyacına bağlı olarak çeşitlilik gösterebilir. Bunlar, en basit anlamda nesnenin kare, daire gibi genel şekli olabildiği gibi, değişik geometriler ve boyutsal ölçümler gibi çok karmaşık şekillerde de olabilir.

Görüntü analiz işlemleri, çeşitli istatistiksel bilgiler vermesi açısından da önemlidir. Bunların en önemlisi parlaklık histogramıdır (bir görüntüdeki gri seviyelerin dağılımı). Bu dağılım, bir görüntünün genel ve bölgesel karışıklık

niteliğini belirler. Bu yüzden karşılıklı zenginleştirmeleri, değişkenlerin belirlenmesinde kullanılır. Elde edilebilecek diğer görüntü istatistikleri ise; parlaklık ortalaması, mod ve tekrarlanma sıklığı gibi 0/1 görüntü zenginleştirme ve restorasyon işlemleri için ek bilgi sağlarlar.

3.4 Otomasyon

İstatistiksel açıdan güvenilirliğin sağlanması için analiz sonuçlarına ihtiyaç duyulduğundan çok sayıda görüntü almak ve analiz etmek gerekir. Görüntü alma evresinde bu işlem otomatik kameralar (frame grabber) tarafından yapılabilir. Bu sayede görüntüler, önceden belirlenen bir biçimde örneğin bir grid ağında veya rastgele yapılan karşılaştırmalar yapılarak toplanabilir. Görüntü işlemleri, alınan görüntüleri girdi olarak kabul edecek şekilde bir makro programa uyarlanabilir. Otomatikleşen bir tarzda makronun çalışmasının birçok avantajı vardır.

- Operatörün manüel olarak yapabileceğinden çok daha fazla sayıda görüntü, çok daha hızlı olarak işleme tabi tutulabilir.
- Operatör ihtiyacını ortadan kaldırdığından, görüntü analiz işlemlerinde operatör görüşünün neden olabileceği hatalardan korunulmuş olur.
- Programın çalışması sırasında operatör diğer işlerle uğraşabilir;
- Tüm görüntüler eşit işlemlerden geçirildiğinden, değişkenler sabit kalır.

Uygulanmamış program makrolarının eğitim süreci zamana bağlı olarak gelişir. Bu durum, görüntü işlemede kişileri kendi yollarını geliştirme eğiliminden uzak tutar. Bunun yanında otomasyon uygulanabildiği sürece son derece kullanışlıdır. Bu amaçla, yazılım kullanımının kolay ve program işleyiş yollarını makro program dosyalarında saklayabilecek bir şekilde kullanım kolaylığı olması gerekir.

BÖLÜM DÖRT

AGREGA KIRMA İŞLEMİ VE KIRICILAR

Agrega ocaklarında istenilen boyutlarda malzeme temini amacıyla, kaya blokları birbirini izleyen boyut küçültme (kıрма) işlemlerinden geçer. Boyut küçültme işlemlerinde, farklı kırma yöntemleri ile çalışan, değişik ebat ve kapasitelerde kırma makinaları kullanılmaktadır. Agregada temini amacı ile yapılan incelemelerde, birincil kırma işleminde genellikle çeneli kırıcılar ve nadiren darbeli kırıcıların tercih edildiği görülmüştür. Bununla birlikte, ikincil kırma amacı ile çok çeşitli kırma makinaları kullanılmaktadır. Örneğin, benzer mineralojik kökenli kireçtaşlarını kırmak için çeneli, çekiçli, konik, darbeli ve düşey milli kırıcılar kullanılmaktadır. Bu nedenle, öncelikle kırma işlemi ve kırma makinaları hakkında bilgi vermek faydalı olacaktır.

4.1 Kırma İşlemi

Ocakta elde edilen kayacın değerlendirilebilmesi için daha küçük tane boyutlarına indirilmesine kadar geçirdiği “boyut küçültme” evrelerinin tümüne “Kırma” denir. Kırma işlemi kademeli olarak yapılır ve kayalar farklı boyutlarda kırılır. Kırma işlemi tane küçültme oranlarına göre ;

- Birincil (primer) kırma : Kırmanın ilk safhasıdır (1-1,5 m – 100 mm),
- İkincil (sekonder) kırma : Kırmanın ikinci safhasıdır (100 mm – 10 mm),
- Tersiyer (ince) kırma : Kırmanın üçüncü safhasıdır (10 mm –1 mm).

Kırma işlemi tanelerin yüzey yapısını değiştirir. Yuvarlak şekilli taneler daha köşeli hale gelir, tane boyutu dağılımı değişir ve malzeme kalitesi yüzey pürüzlülüğünün artması nedeni ile artar. Kırma işleminin dört ana evresi vardır:

- Tane boyutunu küçültmek,
- Eleme işlemi ile küçülen parçaları bölümlere ayırmak,
- Toz malzemenin ve zararlı maddelerin yıkama ile ayrıştırılması,

- Malzemelerin depolama alanına taşınması.

Kırma işlemi, kayacın ocakta çıkarılması ile başlar. Çıkarılan kaya bloklarının besleyiciler aracılığıyla önce birincil kırıcılarda daha sonra da ikincil kırıcılarda kırma işlemine tabi tutulmasıyla devam eder. Kırma işlemi sırasında istenilen malzeme boyutlarına göre kırıcı çene veya ağız açıklıkları ayarlanabilir. Kırılan malzemenin istenilen boyutlarda tasnifi için eleklerden yararlanılır. Gerekli durumlarda, ikincil kırmadan sonra istenilen boyuta indirgenemeyen elek üzerindeki malzemeler, taşıyıcı bantlar yardımı ile geri beslenerek tekrar ikincil kırma işlemine tabi tutulur. Kırma tesisinde istenilen boyutlara indirgenen agregalar uygun bir şekilde depolanır.

Kırma tesisinde kullanılacak kırma makinalarının tür ve boyutunun seçiminde, bunların hangi tür ve boyuttaki eleme, taşıyıcı bant ve besleme makinaları ile desteklenmesi gereği açısından da önemlidir. Birincil kırıcılar, kırılacak olan malzemenin fiziksel özellikleri ve istenilen kırma kapasitesine göre seçilir. İkincil kırıcılar ise daha çok ekonomi, istenen ürün boyutu ve kullanım özellikleri açısından değerlendirilir.

4.2 Kırıcılar

Kırıcılar, katı bir malzemeyi bütün halinde tutan bağları ortadan kaldıracak doğrultuda kuvvet tatbik ederek malzemenin daha küçük parçalara ayrılmasını sağlar. Mekanik olarak üretilen güç, aletin yapısına bağlı olarak bir basınç, darbe veya kesme kuvvetine dönüşmekte ve bu kuvvetlere maruz bırakılan parçalar ufalanmaktadır. Kırıcının, malzemeye etki ettirdiği kuvvet onu bir giriş, bir kısa kolon gibi yükler. Böylece malzemedeki bu şekilde oluşan gerilmeler “çekme”, “basınç” ya da “kesme” gerilmeleridir. Kırma işleminde, taşın mekanik özellikleri; sertlik derecesi, homojenliği, çatlaklı olup olmaması, sürtünme katsayısı ve yoğunluğu gibi özellikleri etkilidir. Kırıcıların ve kırma devrelerinin doğru seçilmesi, kırılan ürünün kullanım amacına uygun özellikleri sağlaması bakımından gereklidir.

Kırıcılar yapı özelliklerine veya kırma yöntemine göre sınıflandırılır. Yapı özelliklerine göre; çeneli, konik, çekiçli, milli, merdaneli gibi isimler alırlar. Ufalama metodunun cinsine göre ise basınç, darbe, çarpma veya aşındırma yolu ile ufalayan makineler olarak ayrılabilirler. En genel sınıflandırma Tablo 4.1’de görüldüğü gibidir.

Tablo 4.1 Birincil ve ikincil kırmada kullanılan kırıcı tipleri

Birincil Kırıcılar	Çeneli kırıcılar
	Jiroskopik döner kırıcılar
İkincil Kırıcılar	Çeneli kırıcılar
	Çekiçli kırıcılar
	Darbeli kırıcılar
	Konik kırıcılar
	Jiroskopik döner kırıcılar
	Merdaneli kırıcılar

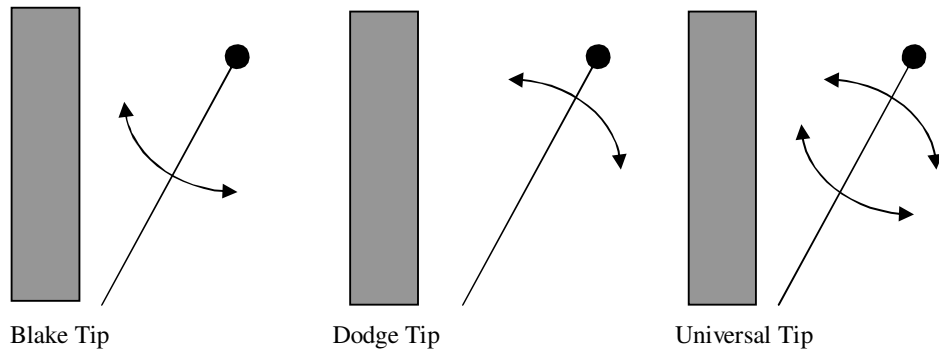
Aynı makineler hem birincil hem de ikincil kırma işlemleri için kullanılabilirler. Ancak birincil kırmada kırıcı boyutları ve kapasiteleri daha büyüktür. İkincil kırıcılar, birincil kırıcılardan daha küçük ve hafiftirler. Genel olarak birinci derece kırma makinelerinde kırılan ürünü kırma ve uygun bir boyuta indirmek için tasarlanmışlardır. Bu kırıcılara verilen malzeme genellikle 15 cm çapından daha küçüktür. Genel bir kural olarak ikincil kırıcılar aynı küçültme oranına sahip, birincil kırıcılardan daha fazla enerji harcarlar ve kırılacak ton kayaç başına aşınma daha fazladır (Wills, 1988).

Farklı özelliklerde agrega temini çalışmalarında, mineraloji yanında kırma yöntemi de bir parametre olarak düşünüldüğünden, kırma yöntemleri ve kırma makineleri hakkında bilgi vermek yararlı olacaktır. Bu nedenle, Tablo 5.1’deki anma sırasına göre kırıcılar aşağıda kısaca tanıtılmıştır:

4.2.1 Çeneli Kırıcılar

Çeneli kırıcılar, hem birincil hem de ikincil kırma amacıyla yaygın olarak kullanılan kırıcı tipidir. Esas olarak biri sabit diğeri hareketli iki çeneden oluşur. Kırma işlemi cihazın çene adı verilen iki plakası arasında gerçekleşir. Çalışma esnasında hareketli çene açılıp kapanarak malzemeye giriş ve kısa kolon gibi yük tatbik eder. Kırılan malzeme daha önce ayarlanmış çıkış ağzından yerçekimi etkisiyle boşalır (Wills, 1988). Çenenin gereğinden fazla hareketi kusurlu malzeme miktarını arttırmaktadır. Bu durumda malzeme kendi ağırlığı ile çeneler arasında aşağıya doğru gereken yolu alabilme fırsatı bulamamakta ve malzeme çene boyunca daha çok kırma kuvveti ile karşı karşıya kalmaktadır (Yıldız, 2007). Bu nedenle ince malzeme miktarı da fazla olmaktadır.

Çeneli kırıcı aralıklı olarak kırma yapar. Çalışma süresinin yaklaşık % 75’inde kırma yapacak şekilde tasarlanmışlardır. Hareketli çenenin mafsallanma şekline göre Blake, Dodge ve Üiversal olarak sınıflandırılırlar (Şekil 4.1). Genel olarak ocaklarda, hareketli çene yukarıdan mafsallı, ağız açıklığı sabit, çıkış açıklığı değişken Blake tipi kırıcılar kullanılır. Dodge kırıcılar ise laboratuvar tipi olarak kullanılır. Üiversal tip kırıcılar ise günümüzde artık kullanılmamaktadır.



Şekil 4.1 Çeneli kırıcılarda mafsallanma şekilleri (Wills, 1988)

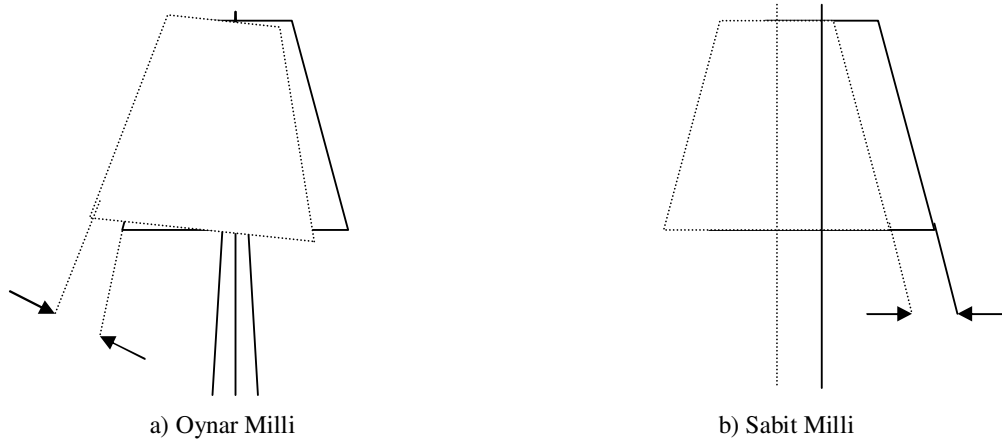
Çeneli kırma makinaları en fazla 1680 x 2130 mm ebatlarında üretilmektedir. Birincil kırmada kullanılan bu ebattaki bir çeneli kırıcının ağız açıklığı 200 mm olup, çapı 1,20 m’ye kadar olan kayaları saatte 725 ton kapasite ile kırabilmektedir. Kırma kapasiteleri 545 ton/h üzerindeki çeneli kırıcıların, jiroskobik döner kırıcılara

göre avantajları azalmaktadır. Kırma kapasiteleri 725 ton/h üzerinde ise döner kırıcılar çenelilere göre avantajlı olmaktadır (Wills, 1988). Çeneli kırıcılarda küçültme oranı genellikle $1/4 - 1/9$ arasında değişmektedir (Yıldız, 2007)

Çeneli kırıcıların az parçalı olmaları, montaj ve bakımlarının kolay olması nedenleri ile kullanımı oldukça yaygındır. Çeneli kırıcılar orta boy ve küçük tesislerde genellikle birinci kademe kırma işleminde kullanılmaktadır (Yıldız, 2007).

4.2.2 Jirokobik Döner Kırıcılar

Basit olarak ana mil kırıcı kafa ve gövdeden meydana gelirler. Kırıcının çalışma prensibi, sabit gövde ile hareketli konik gövde arasında kalan malzemenin basınç kuvveti ile kırılması prensibine dayanır. Malzeme kırıcının üst kısmından alta doğru daralan kırma alanına beslenir. Bu alanda konik gövde kayacı kısa kolon gibi yükler. Yüzeyler birbirine yaklaştığında malzeme kırılır, uzaklaştığında kırılan malzeme kırıcının çıkış ağzından serbest düşme ile uzaklaşır. Bu tip kırıcılar daha fazla kapasite ve kübik malzeme temin etmek için çeneli kırıcılardan sonra geliştirilmişlerdir. Bu kırıcıların çeşitli tipleri arasında en çok kullanılanlar Şekil 4.2’de görülen düşey oynar milli ve sabit milli olanlardır (Wills, 1988).



Şekil 4.2 Düşey milli Jirokopik Kırıcı Tipleri

Düşey milli kırıcılar, çeneli kırıcıların aksine, tam süre ile kırma yaptıklarından kapasiteleri 900 ton/h ve üzerindedir. Düşey milli kırıcılar giriş çapları ile tanımlanırlar ve en fazla 1,83 m çapında imal edilmektedirler. Bu büyüklükteki bir

kırıcı 1,37 m tane boyutuna kadar kayaçları 20 cm çıkış açıklığı ile 5000 ton/h kapasiteye kırabilir. Böyle bir kırıcının güç sarfıyatı 750 kW kadardır (Yıldız, 2007). Kırıcının genel avantajları şunlardır:

- a. Çok geniş ürün büyüklüğü ayar imkanına sahiptirler,
- b. Sert, aşındırıcı malzemeleri rahatlıkla kırabilirler,
- c. Nemli, yapışkan malzemeyi kırabilirler,
- d. Az yer kaplarlar.

4.2.3 Konik Kırıcılar

Konik kırıcılar oynar milli jiroskopik döner kırıcılara benzer. Jiroskopik döner kırıcılarda hareketli koni ile sabit konik yüzey eğimleri aynı doğrultuda olabildiği gibi, zıt doğrultuda da olabilir. Zıt doğrultulu yüzeyler genellikle birincil tiplerde söz konusudur. Yüzeylerin aynı doğrultuda olduğu ikincil ve tersiyer tiplere genel olarak konik kırıcılar denir. Jiroskopik döner kırıcılarda olduğu gibi ana mil, kırıcı kafa ve kesik koni şeklindeki gövdeden meydana gelir. Kırma hareketi, kırma bölgesinde tabakalı şekilde dizilen tanelerin darbe ve aşındırma yoluyla ufalanmasına dayanır (Wills, 1988).

Konik kırıcılar, yüksek hız ve kapasite sağlayan düz kırma bölgesi, küçültme oranı ile döner kırıcılardan ayrılır. Döner ve konik kırıcıların çalışma prensipleri de birbirine benzemektedir. İki kırıcı arasındaki belirgin fark, döner kırıcılarda içteki hareketli koninin daha uzun ve daha dik olmasıdır. Döner kırıcılardaki dış koni alttan üste doğru genişlemektedir. Konik kırıcılarda içteki koni kısadır ve dış koni ortadaki koninin üzerine aynı yönde daralmaktadır (Yıldız, 2007). Geniş bir ağız açıklığı gerekli olmadığından, üst gövde diğer döner kırıcılarda olduğu gibi yukarıdan aşağı daralan bir biçimde değil, genişleyen bir kesik koni şeklindedir. Kırılan malzeme için daha geniş bir boşalma alanı sağlar. Bu alan konik kırıcıya yüksek kapasite temin eder.

Konik kırıcılar, kırıcı kafa alt çapı ile tanımlanır. Bu çap 5–6 cm’den 3,1 m çapa kadar değişen açıklıklarda imal edilebilmektedir. Kafa alt çapı 3,1 m çaplı kırıcı 1,9

cm çıkış açıklığı ile 1100 ton/h malzeme kırabilmektedir. Aynı çıkış açıklığında döner kırıcılar ve merdaneli kırıcılardan iki kata kadar fazla kapasiteye sahiptirler. Bu kırıcılarda yüksek dönme hızları kullanılır (400–700 dev/dak). Bir devir için geçen zaman herhangi bir parçanın paralel bir aralıktan yerçekimi etkisi ile düşmesi için geçen zamandan kısa olduğu için, ince kırma zonunda parçaların birden fazla sıkıştırılması mümkün olur. Konik kırıcılar malzemeyi basınçtan ziyade darbe etkisi ile kırarlar. Küçültme oranları genelde $1/3 - 1/7$ arasındadır (Wills, 1988).

4.2.4 Çekiçli Kırıcılar

Bu kırıcılarda kırma parçası “çekiç” olarak isimlendirildiğinden bu isim ile anılırlar. Çekiçler, rotor kısmı dönen bir mülle kapalı diskler üzerine mafsallı olarak bağlanır. Yüksek hızla dönen bu çekiçler malzemeye çarpar ve sahip olduğu kinetik enerjinin bir kısmını malzemeye iletir. Bu enerji malzemede iç gerilmeler oluşturur, bu da parçanın kırılmasına neden olur. Kırılan parçalar birkaç devir daha dönen çekiçle temas ederler ve boyut birkaç kademe daha küçülür. Kırılan parçada genellikle artık gerilme kalmaz dolayısıyla çatlak vb. yoktur. Bu durum özellikle beton ve asfalt betonu üretiminde kullanılan agregalar açısından önemlidir.

Çekiçler 100 kg ve üzerinde ağırlıkta yapılabilmektedir. Bu tip kırıcılar 20 cm ile 200 cm’ye kadar boyutlarda besleme ile çalışabilmektedir. Rotor dönme hızı 500–3000 dev/dak arasında değişmektedir. Bu kırıcılar malzeme giriş açıklığı boyutları ile tanımlanır. Büyük çekiçli kırıcılar 200 cm’lik kayaç parçalarını 20cm’ye kadar ufalayabilmekte ve ebatlar için kapasiteleri yaklaşık 1500 ton/h civarında olmaktadır. Kapasiteleri 3000 ton/h olan çok büyük kırıcılar da imal edilebilmektedir (Wills, 1988).

Çekiçli kırıcıların en önemli avantajları şunlardır;

- a. Kırma için gerekli enerji ihtiyacı diğer kırıcılara orana daha düşüktür,
- b. Kapladıkları saha genellikle küçüktür,
- c. Aşınan parçalar kolaylıkla değişebilir,

- d. Çok değişik cins mineral malzemeleri kırabilirler. Ancak bazı sert mineraller fazla aşınmaya neden olduğundan, ekonomik olmayabilirler,
- e. Kırılan parçalar kübik yapıdadır,
- f. Kırılan parçada artık gerilme yoktur. Bu nedenle çatlaksız bir yapıya sahiptir.

Çekiçli tip kırıcıların dezavantajları ise şunlardır;

- a. Sert malzemeler kırıcı parçalarında aşırı aşınmaya neden olur,
- b. Nemli ve bazı yapışkan malzemeler kırıcı çekiçlere ve gövdeye yapıştığından, bu tip malzemeler için uygun değildir,
- c. Kırılan parça ebadı genellikle kolay ayarlanamaz,
- d. İkincil kırıcı olarak daha aşındırıcı malzemelerin kırılmasında kullanılırlar. Silis miktarı % 5'den fazla olan malzemeler için tavsiye edilmezler.

4.2.5 Darbeli Kırıcılar

Rotor kısmı dönen bir malle kamalı diskler üzerine herhangi bir tarzda bağlanmış sabit çekiçlerden oluşuyor ise bu tip kırıcılara “Darbeli Kırıcılar” adı verilir. Darbeli kırıcılarda kırma işlevi, kırıcı rotoru üzerindeki ve kırma odası içindeki düz çelik başlıklar ile gerçekleşir. Kırıcı malzeme giriş ağzından kırma odasına düşen malzeme rotorun çarpması ile parçalanır ve parçalar belirli bir hız kazanır. İlk darbe ile küçülen malzemelerin birbirlerine, kırma odası cidarlarındaki başlıklara ve diğer rotara çarpmasıyla, küçültme işlemi malzeme kırıcıyı terk edinceye kadar zincirleme bir reaksiyon şeklinde devam eder (Yıldız, 2007). Hem birincil hem de ikincil kırma kademesinde kullanılan bu aletlerde kırma işlemi basınçtan ziyade darbe zorlaması ile gerçekleşir. Serbestçe düşen kayaç parçasına döner çekiçler vasıtasıyla uygulanan darbe kuvveti, cevher içinde gerilmelere ve kısa sürede parçalanmaya neden olmakta ve bu kuvvetler parçaların kırıcı plakalara çarptırılmasıyla daha da artmaktadır (Wills, 1988). Bu özelliklerinden dolayı darbeli kırıcılar agrega ocaklarında tercih edilmektedir. Bu kırıcıların diğer bir avantajı kübik yapıda ürün vermeleridir. Kırılan

malzemelerde iç gerilme kalması söz konusu olmamaktadır. Darbeli kırıcılarda kırma oranı 1/4 ile 1/30 arasındadır.

4.2.6 Merdaneli Kırıcılar

Yatay ve paralel eksenler etrafında zıt yönlerde dönen iki silindirden ibarettir. Nadiren üç silindirli tipleri de imal edilmektedir. Kırılacak parça iki tambur arasına girerek basınç zorlaması ile kırılır. Malzeme bu silindir yüzeyi ile diğer yüzey arasında basınç gerilmesi etkisiyle kırılır. Bunun için kinetik enerjiye ihtiyaç göstermezler ve bu nedenle çarpmalı tip kırıcılara oranla daha düşük devirle dönerler. Çeşitli tiplerde imal edilmekle birlikte günümüzde en çok tamburlardan biri sabit diğeri ise kayabilen yataklar üzerinde dönen “yaylı tip” tercih edilmektedir. Modern merdaneli kırıcılar iki merdane milinden ayrı ayrı tahrikle çalışır. Silindirler birbirine aksi yönde ayrı motorlar vasıtası ile döndürülür. İkili veya üçlü setler halinde silindirlerden oluşan çok tamburlu (multi-roll) merdaneler de yapılmakla beraber modern tesislerde genellikle çift tamburlular kullanılmaktadır.

Merdaneli kırıcılar diğer kırıcılara nazaran daha az ince malzeme içeren ürün verirler ve küçültme oranları daha düşüktür (1/2–1/4). Daha az ince ürün vermelerinin nedeni, malzemenin kırıcıdan geçme süresinin az olması ile ilgilidir. Küçültme oranının düşük olmasının nedeni ise tamburların yay ve kavislerinin yapısı ile ilgilidir. Bu tip kırıcıların en büyük dezavantajı, uygun bir küçültme oranı elde etmek için besleme malzeme boyutu büyüdükçe daha büyük çaplı merdaneler yapılması gereğidir. Bu nedenle bütün kırıcılar içinde en pahalı olanıdır.

Merdaneli kırıcıların avantajları;

- a. Çeneli ve döner kırıcıları tıkama riski yüksek olan kırılgan, nemli, yapışkan, donmuş, az aşındırıcı malzemeleri kırmak için uygundurlar,
- b. Kırılan ürün boyutu kolaylıkla kontrol edilebilir,
- c. Enerji tüketimi diğer kırıcılarla karşılaştırıldığında daha azdır,

- d. 10 mm'den 3 mm'ye kadar malzemeleri diğer kırıcılardan daha ekonomik tarzda üretmek mümkündür.

Dezavantajları ;

- a. Boyut küçültme oranları küçüktür,
- b. Oluklu merdane kullanılıyorsa ürün yapraklı bir yapıya sahip olabilir,
- c. Diğer tip kırıcılara göre merdane çapı büyüdükçe maliyet artar

4.3 Kırıcı Seçimi

Kırma işleminde doğru makina ve uygun işlem devrelerinin seçilmesinin önemi büyüktür. Proje aşamasında doğru kırıcı tipinin seçilmesi için aşağıdaki hususların öncelikle değerlendirilmesi gerekir:

- Kırılacak malzemenin miktarı, boyutu, boyut dağılımı, nemi, diğer fiziksel ve kimyasal özellikleri,
- Kırma sonucu elde edilecek malzeme boyut dağılımı,
- İlk yatırım maliyetleri,
- İşletme maliyetleri,
- Bakım maliyetleri.

İşletme sürecinde kırıcı devrelerinin verimliliği, proje aşamasında kırıcıların doğru seçilmiş olmasına, öngörülen beslemenin yapılmasına, diğer işlem makinalarına, değişen çalışma koşullarına uyum sağlayabilmesine ve düzenli bir bakım programına bağlıdır.

Kırılacak her malzemenin kendine özgü kırılma özellikleri vardır. Bazı malzemeler kolay kırılırken, bazılarının kırılması için daha fazla enerji gerekmektedir. Kırma sonrası elde edilen ürünün fiziksel yapısı da

değişebilmektedir. Malzeme toz haline gelebileceği gibi büyük parçalar halinde de kalabilir. Ayrıca her malzemenin kırılırken belirli bir aşındırma özelliği de vardır.

Kırıcı seçiminde kırılacak malzemenin özellikleri en önemli belirleyicidir. Aynı malzemenin kırılma özelliklerinin belirli aralıklar içinde değişebilmesi de olasıdır. Yapılacak seçim için kırılacak malzemenin boyutu, hangi boyuta kırılacağı ve kırılacak malzeme miktarının bilinmesi gerekir. Kırıcı seçimi aşamasında, kırma kademeleri ile her kırma kademesinde ortalaya çıkabilecek olası etkenler birlikte değerlendirilerek karar verilmelidir.

4.3.1 Birincil Kırıcıların Karşılaştırılması

Birinci kademe kırma işleminde kullanılan çeneli ve döner kırıcılar karşılaştırıldığında;

- Döner kırıcılar, kapasitesi yüksek makinalardır. Genellikle 1.000 t/h ve üstünde kapasitelerde kullanıldıklarında ekonomik olmaktadır. Aynı ebatlı çeneli kırıcıların kapasiteleri daha düşüktür.
- Çeneli kırıcılar, bütün çene yüzeyleri ile çalıştığı zamanın yarısı kadar bir sürede kırma işlemi uygular. Döner kırıcılar, kırma yüzeyinin yarısı ile zamanın tamamında kırma işlemi yapmaktadır.
- Döner kırıcılar çeneli kırıcılara göre daha pahalıdır.
- Her iki kırıcının montajı için sağlam betonarme temellere gereksinim vardır. Ancak çeneli kırıcının çalışması durumunda yük dağılımı düzgün olmadığından montaj için gerekli betonarme temellerin daha sağlam olması gerekmektedir.
- Döner kırıcılarda montaj maliyeti aynı kapasitedeki çeneli kırıcılara göre 2/3 oranında daha düşüktür. Çünkü döner kırıcıların montajı çeneli kırıcılara göre daha kolaydır.
- Döner kırıcılar sert ve aşındırıcı malzemelerin kırılması için daha uygundur. Daha kübik şekilli malzeme elde edilir. Çeneli kırıcılar ise çamurlu, killi, ıslak ve yumuşak malzemelerin kırılmasına daha uygundur.

- Her iki kırıcıdan çıkan kırılmış malzemede, kırma işleminden kaynaklanan iç gerilmeler mevcuttur (Yıldız, 2007).

Birinci kademe kırmada genel olarak döner kırıcıların kullanılması önerilmektedir. Ancak, sert ve aşındırıcı malzeme kırmada kullanılan döner kırıcıların bakımları daha sık aralıklarla yapılmalıdır. Bu da işletme maliyetlerini yükseltmektedir. Bununla birlikte, uygun özellikte malzemeler kırıldığında döner kırıcıların düşük ilk yatırım maliyeti, yüksek kapasite, düşük ilk montaj maliyetleri, kübik şekilli ürün eldesi gibi önemli avantajları vardır.

4.3.2 İkincil Kırıcıların Karşılaştırılması

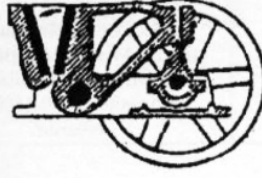
Darbeli kırıcıların kırma oranı, çeneli ve konik kırıcılara göre daha yüksektir. Kırma için daha az çalışma süresi gerektirir. Ancak darbeli kırıcılar aşınma indeksi büyük olan malzemelerin kırılmasında fazla aşınmaya neden olacağından genellikle ekonomik değildir. Sert ve aşındırıcı malzemelerin kırılmasında basınç kuvveti ile çalışan kırıcılar tercih edilir. Çeneli ve döner kırıcılarda kırılmış malzemelerde istenmeyen iç gerilmeler oluşacağından, beton ve asfalt agregası olarak kullanılacak malzemenin kırılmasında darbeli, çekiçli ve döner kırıcılar tercih edilir.

Darbeli ve çekiçli kırıcıların çalışma prensibi, rotordaki kinetik enerji kullanılarak kırma başlığı, sabit ya da hareketli çekiçlerin malzemeye çarparak malzemeyi zayıf ve süreksizlik yerlerinden ayırıp küçültmesi ilkesine dayanmaktadır. Bu nedenle kırılan malzemede gerilme ve çatlak olmaz.

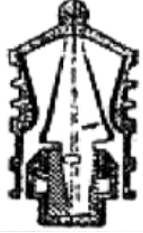
Kırıcı seçimi ile ilgili özet bilgiler Tablo 4.2 (a, b, c)'de verilmiştir.

Agrega kırmada sıklıkla kullanılan döner, çeneli ve darbeli bazı kırıcıların özellikleri ise Tablo 4.3'de karşılaştırılmıştır.

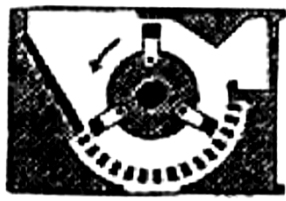
Tablo 4.2 (a) Kırıcılar ve özellikleri (Yıldız, 2007)

	Kırıcı	Boyutları, mm	Güç, kw Devir, d/d	Özellikleri
Elektro Enerji			250 kw'a kadar 5-10 tonluk blok için 2-3 dakika	Birincil kırma öncesi büyük blokların parçalanmasında kullanılır.
Çeneli Kırıcılar		Ağız eni 125x1600 Boy 150x2100	2.25-225 330-100	Küçültme Oranı: 4/1, 9/1 Ortalama: 7/1 Sert, aşındırıcı, yapışkan, iri malzemeleri birincil ve ikincil kırmasında, yüksek kapasite ve iri blok kırılması için kullanılır.
		Ağız eni 180x305 Boy 1220x1525	11-150 390-257	Küçültme Oranı: 4/1, 9/1 Ortalama: 7/1 Sert, aşındırıcı, yapışkan, iri malzemelerin birincil ve ikincil kırmasında, yüksek kapasite ve iri blok kırılması için kullanılır.
		Ağız eni 125x150 Boy 1600x2100	2.25-400 300-120	Küçültme Oranı: 4/1, 9/1 Ortalama: 7/1 Yüksek kapasite, yüksek aşınma, sert ve aşındırıcı malzemeler için uygun değildir.
		Ağız eni 100x150 Boy 280x380	2.25-11 300-250	Küçültme Oranı: 4/1, 9/1 Ortalama: 7/1 Genellikle laboratuvar tipi olarak kullanılır.

Tablo 4.2 (b) Kırıcılar ve özellikleri (Yıldız, 2007)

Kırıcı		Boyutları, mm	Güç, kw Devir,d/d	Özellikleri
Döner ve konik kırıcılar	Döner Kırıcı 	Giriş açıklığı x çapı 760 x 1400 2135 x 300	5-750 450-100	Küçültme oranı: 3/1, 10/1 Ortalama: 8/1 Birincil ve ikincil kırmada kullanılır. Çeneli kırıcıya göre daha yüksek kapasiteye sahiptir.
	Konik Kırıcı 	Koni çapı 600 x 3050	22-600 290-220	İkincil ve geri besleme kırmalarında kullanılır. Küçültme oranı: 6/1-8/1 Geri besleme oranı: 4/1-6/1 İnce boyutlu kırma için kullanılanlarında kırma yüzeyleri birbirine daha paraleldir.
	Gyrodisk 	Koni çapı 900 x 2100	100-400 325-260	Küçültme oranı: 2/1 - 4/1 Öğütmede kullanılır. Kübik ürünler verir. Çubuklu değirmen yerine kullanılabilir. Yapışkan malzemeler için uygun değildir.
Merdaneli kırıcılar	Tek Merdaneli Kırıcı 	D 500 x L 4509 D1500 x L 2100	15-300 60-23	Küçültme oranı: 7/1 Yumuşak, kırılğan, aşındırıcı, olmayan kömür ve kireçtaşı gibi malzemeleri birincil ve ikincil kırmada kullanılır. Kapasiteleri 20-1500 t/h kadardır.
	Çift Merdaneli Kırıcı 	D 750 x L 350 D 1800 x L 900 D 860 x L 2100	27-112 150-50	Küçültme oranı: 3/1 Düşük kırma oranında az toz çıkarır. Merdanesi dişli olanlar kömür kırmada kullanılır. Kapasiteleri 20-1500 t/h kadardır.

Tablo 4.2 (c) Kırıcılar ve özellikleri (Yıldız, 2007)

Kırıcı		Boyutları, mm	Güç, kw Devir, d/d	Özellikler
Döner kırıcı		D x L 2100x3650 4300x9750	7-112 18-12	Kapasiteleri 400-2000 t/h arasındadır.
		Giriş açıklığı 160 x 230 640 x 1470	11-375 1800-600	Kapasiteleri 2500 t/h arasındadır. Kırma odasının altında elek vardır. Kırma darbe etkisiyle gerçekleşir. Sert, aşındırıcı olamayan malzemelerde her türlü kırmada kullanılır. Küçük ince malzeme elde edilir.
		Giriş açıklığı 1400 x 2300	Maksimum 450 Maksimum 900	Açık çıkış ağızlı, yumuşak, kırılabilir malzemeleri kırmada kullanılır. Yüksek hızda ince malzeme oranı artar. 1299 t/h kapasiteleri vardır.
		Çap 750 x 1300	22-260 1500-480	İç içe 1-6 adet kafesten oluşmuştur. Besleme iç kafesten yapılır. Merkezkaç kuvvetinin etkisiyle dışa doğru hareket eden malzeme öğütülür. Kapasiteleri 5-80 t/h arasındadır.
Darbeli kırıcı		Rotor çapı 685 x 990	55-150 2300-1400	Kapasiteleri: 100-200t/h Besleme rotor içinden yapılır. Malzeme merkezkaç kuvveti ile yanlara ve birbirine çarparak kırılır. Kırılmış malzeme kırma bölgesinde doğal yatak oluşturduğundan aşınmayı önler. Sert kayaların kırılması için uygundur.

Tablo 4.3 Döner, çeneli ve darbeli kırıcıların karşılaştırılması (Yıldız, 2007)

Kırıcı	Orta Boyut			Büyük Boyut		
	Döner (106 cm)	Çeneli, blake (101x122cm)	Darbeli tek rotor (96x127cm)	Döner (138cm)	Çeneli, blake (122x152cm)	Darbeli tek rotor (117x138cm)
Maks. besleme boyutu	84 cm	86 cm	86 cm	112 cm	96 cm	112 cm
Makina ağırlığı	115 t	60 t	20 t	240 t	125 t	25 t
Maks.güç	300 hp	200 hp	300 hp	500 hp	200 hp	400 hp
15cm'ye kıırma	1.500t/h	440-540t/h	250-725t/h	2.300t/h	440-530t/h	400-800t/h
15cm geçen	%90	%85	%70	%90	%85	%70
Yaklaşık maliyet	400.000\$	130.000\$	62.000\$	750.000\$	235.000\$	97.000\$

BÖLÜM BEŞ

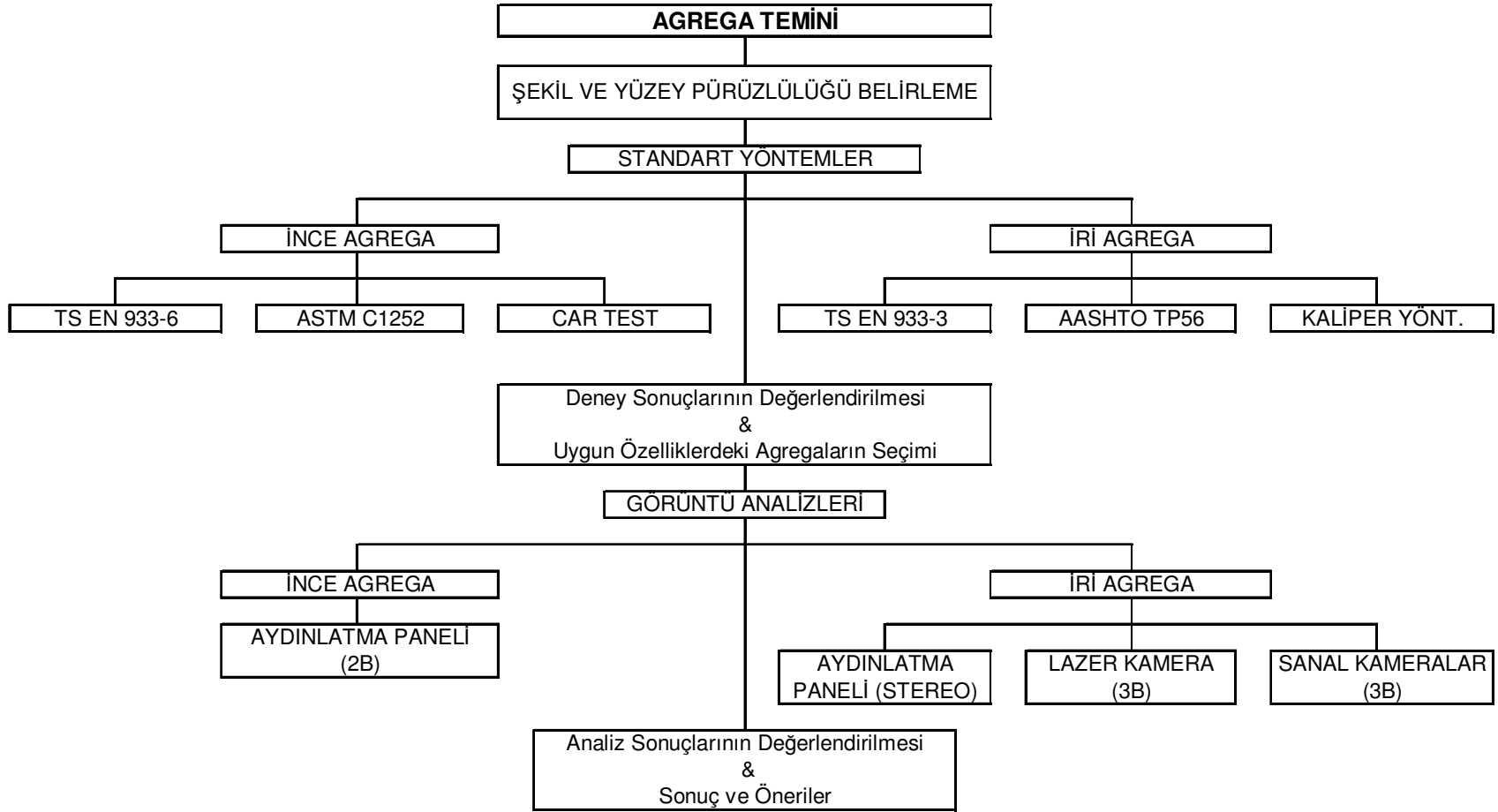
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Agrega geometrik özelliklerinin belirlenmesi amacı ile yapılan deneysel çalışmalar aşağıdaki aşamaları kapsamaktadır:

- Farklı geometrik özelliklerde agreganın temini,
- Standart yöntemlerle agreganın şekil ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerinin belirlenmesi,
- Görüntü analizleri için görüntüleme düzeneklerinin geliştirilmesi,
- Görüntü analizleri ile agreganın geometrik özelliklerinin belirlenmesi,
- İnce agreganın geometrik özelliklerinin çimento harcı performansına etkisi,
- İri ve ince agreganın geometrik özelliklerinin beton performansına etkisi,

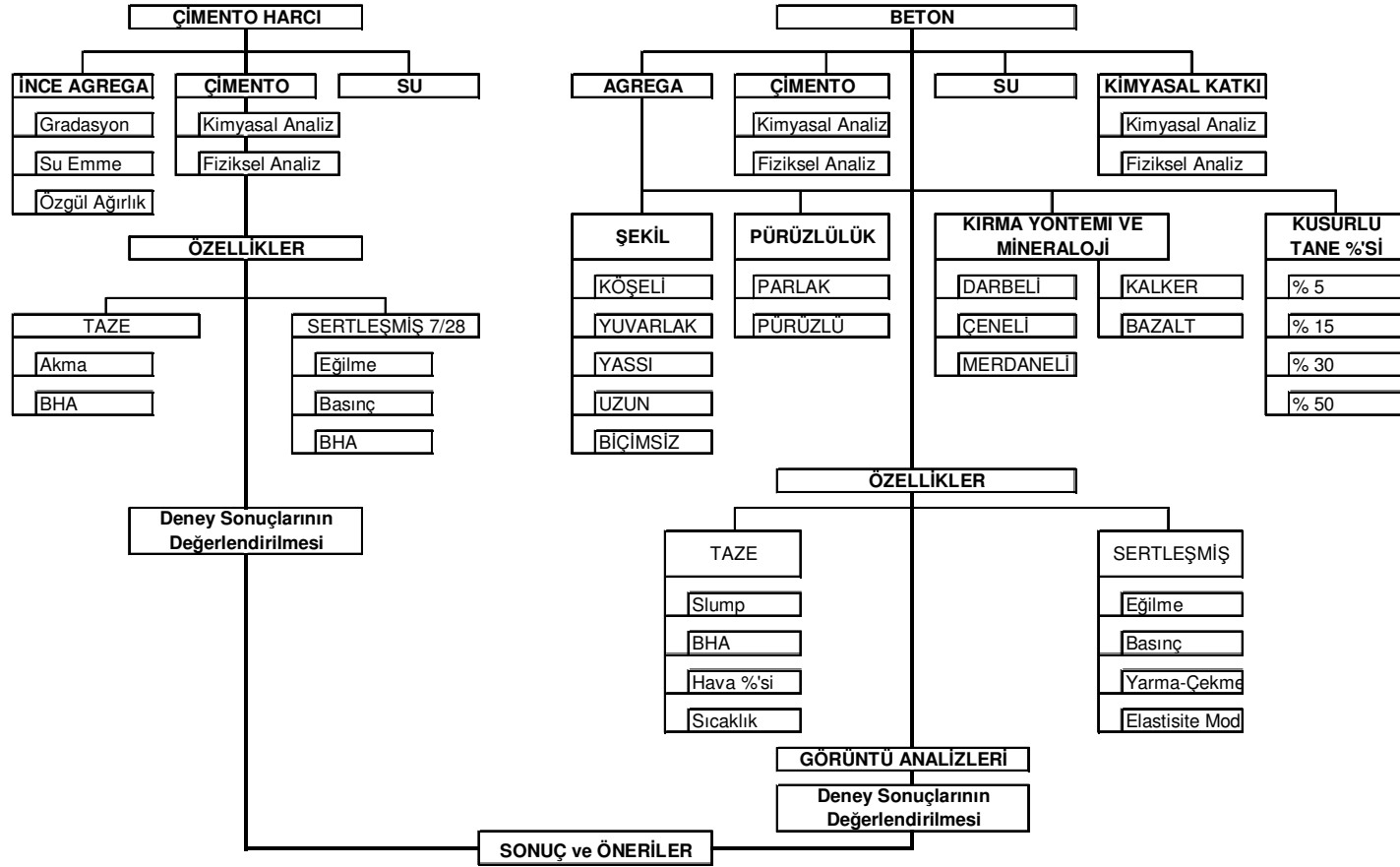
Deneysel çalışma adımları Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görüldüğü gibi özetlenmiştir.

Geometrik özellikleri belirlenen bazı agregalarla yapılan bazı çimento harcı ve beton deneyleri Bölüm 6’da verilmiştir. Bu deneyler, ince ve iri agreganın geometrik özelliklerinin çimento harcı ve beton performansına etkisinin mertebesini belirleyebilmek amacı ile yapılmıştır.



Şekil 5.1 Deneysel çalışmalar - Agrega temini ve agrega geometrik özelliklerinin belirlenmesi

DENEYSEL ÇALIŞMALAR - ÇİMENTO HARCİ VE BETON



Şekil 5.2 Çimento harcı ve beton üzerinde agrega şekil ve yüzey özelliklerinin mertebelerini belirlemeye yönelik deneysel çalışmalar

5.1 Agregada Temini

Agregalar, inşaat sektöründe özellikle çimento, beton ve asfalt betonu üretiminde kullanılmaktadır. Ocaklarda patlatma suretiyle çıkarılan kayalar agrega ocaklarında kırılıp belirli boyutlara getirilerek sınıflandırılırlar. Agregada ocaklarında Bölüm 5’de değinilen değişik tip kırıcılar kullanılmaktadır. Kırma yöntemi, agregaların tane boyut dağılımı, tane şekli ve kusurlu malzeme oranı, 63 µm’den geçen ince malzeme miktarı özellikleri üzerinde etkilidir.

Agregada temini amacıyla agregada ocağı yetkilileriyle yapılan görüşmelerde alınan bilgilere göre, özellikle küçük işletmeler için kırıcı tipi seçiminde kapasitenin ön plana çıktığı görülmektedir. Ürün kalitesi, satınalmalarda yapılan denetimlerin ve otokontrollerin yetersiz olması nedeniyle ikinci planda değerlendirilebilmektedir. Bazı agregada ocaklarındaki tesis yetkililerinin, kullandıkları kırıcı tipi ve kırma yöntemini bilmemeleri ya da yanlış bilgi sahibi olmaları, bu konuya gereken önemin verilmediğinin bir göstergesidir.

Deneysel çalışmalarda kullanılacak agregaların seçiminde, mineraloji ve kırma yöntemine bağlı olarak değişebilen agregada geometrik özelliklerindeki çeşitliliğin ortaya konması gerekmektedir. Farklı şekil ve pürüzlülük seviyelerindeki agregalar temin edilmek suretiyle, standart deney yöntemleri ve görüntü analiz yöntemleri kullanılarak agregada geometrik özellikleri değerlendirilip sonuçlar kıyaslanabilir. Bu sayede, agregada geometrik özelliklerinin çimento harcı ve beton performansına etkisi belirlenebilir.

5.1.1 İzmir İli ve Çevresi Agregada Ocakları

Deneysel çalışmalarda kullanılacak uygun özellikli agregaların temini amacıyla yapılan araştırmalarda, kolay ulaşılabilirlik açısından öncelikle İzmir ili ve yakın çevresindeki agregada ocakları değerlendirilmiştir. Tablo 5.1’de İzmir ve çevresindeki agregada ocaklarının mevkileri, ruhsat sahipleri ve faaliyet durumları görülmektedir.

Tablo 5.1 (a) İzmir ili çevresindeki agrega ocakları

No	İlçe	Mevkii	Ruhsat Sahibi	İşletme Durumu
B1	Aliağa	Şakran	Dere Madencilik	Faaliyette
K1	Bergama	Çaltıkoru	DSİ 2. Bölge (2 adet)	Faaliyette
K2	Bergama	Kınık	Öztüre Kireççilik	Faaliyette
K3	Bergama	Kınık	Karayolları	Faaliyette
K4	Bergama	Kınık	Yayakent Belediyesi	Faaliyette değil
K5	Beydağ	Sankaya	DSİ II. Bölge	Faaliyette
K6	Bornova	Belkahve	Batıçim	Faaliyette (*)
K7	Bornova	Kavaklıdere	Dere Madencilik	Faaliyette
K8	Bornova	Belkahve	Erkoç	Faaliyette (*)
K9	Bornova	Belkahve	İksaş	Faaliyette değil
K10	Bornova	Belkahve	Lafarge	Faaliyette değil
K11	Bornova	Belkahve	Temeltaş	Faaliyette
K12	Bornova	Gökdere	Karayolları	Faaliyette
K13	Bornova	Işıkkent	Bemaş	Faaliyette değil
K14	Bornova	Işıkkent	Bentaş	Faaliyette değil
K15	Bornova	Işıkkent	Çimentaş	Faaliyette değil
K16	Bornova	Işıkkent	Niyazi Ersoy ve Oğl.	Faaliyette (*)
K17	Bornova	Kurudere	Karayolları	Faaliyette
K18	Bornova	Pınarbaşı	Özel Şahıslara Ait (9 ad)	Faaliyette
K19	Buca	Kaynaklar	Özel Şahsa Ait	Faaliyette değil
K20	Buca	Kınıklar	Özel Şahsa Ait	Faaliyette değil
K21	Buca	Melenbaşı	Özel Şahsa Ait	Faaliyette değil
K22	Çeşme	Alaçatı	DLH 6. Bölge	Faaliyette değil
K23	Çeşme	Alaçatı	Karayolları	Faaliyette değil
K24	Dikili	Çandarlı	DSİ 2. Bölge	Faaliyette değil
K25	Gaziemir	Seydiköy	Ahmet Nuroğlu	Faaliyette değil
K26	Gümüldür	Dereboğazı	Özel Şahsa Ait	Faaliyette değil
K27	Karaburun	Aşağıovacık	Mertaş	Faaliyette

Tablo 5.1 (b) İzmir ili çevresindeki agrega ocakları

No	İlçe	Mevkii	Ruhsat Sahibi	İşletme Durumu
K28	Karaburun	Balıklıova	Ali Tekin	Faaliyette
K29	Karaburun	Balıklıova	Aktaş Mermer	Faaliyette
K30	Karaburun	Balıklıova	Yöntaş Mermer	Faaliyette
K31	Karaburun	Eylenhoca	DLH6.Bölge	Faaliyette
K32	Karaburun	Eylenhoca	Özel Şahsa Ait	Faaliyette
K33	Karaburun	Gerence	Cevat Büyük	Faaliyette
K34	Karaburun	Mordoğan	DLH 6.Bölge	Faaliyette
K35	Karaburun	Mordoğan	Yıldız Mermer	Faaliyette (*)
K36	Karaburun	Ovacık	Özgür Tütüncüoğlu	Faaliyette
K37	Kemalpaşa	Beşpınar	Karayolları	Faaliyette
K38	Ödemiş	Yeşilköy	DSİ 2. Bölge	Faaliyette
K39	Seferihisar	Akarca	DSİ 2. Bölge	Faaliyette
K40	Seferihisar	Kavakdere	DLH 6.Bölge	Faaliyette
K41	Seferihisar	Beyler	DSİ 2. Bölge	Faaliyette
K42	Tire	Paşayeri	DSİ II. Bölge	Faaliyette
K43	Tire	Uzunhasan	Özel Şahsa Ait	Faaliyette değil
K44	Torbalı	Kuşçuburun	Özel Şahsa Ait	Faaliyette değil
K45	Torbalı	Uyuzdere	Karayolları	Faaliyette
K46	Torbalı	Uyuzdere	Koment Madencilik	Faaliyette
K47	Torbalı	Uyuzdere	Köy Hizmetleri	Faaliyette
K48	Torbalı	Uyuzdere	Öztüre Kireççilik	Faaliyette
K49	Torbalı	Uyuzdere	Totaş	Faaliyette
K50	Torbalı	Yeniköy	Karayolları	Faaliyette
K51	Urla	Yağcılar	Hüseyin Akgül	Faaliyette değil
K52	Urla	Zeytinalan	Karayolları	Faaliyette değil
K53	Urla	Zeytinalan	Kemal Temiztepe	Faaliyette
K54	Urla	Zeytinalan	Öztüre Kireççilik	Faaliyette
K55	Zeytindağ	A.Şakran	Karayolları	Faaliyette

B: Bazalt, K: Kireçtaşı, * Rehabilitasyon amaçlı

Tablo 5.1'den görüleceği üzere, agrega ocakları özellikle Belkahve ve Işıkkent civarında yoğun olarak faaliyet göstermektedirler. Agrega ocaklarının 38'si faaliyette, 18'i faaliyette değildir. Agrega ocaklarının kullanım amaçlarını 7 grupta değerlendirmek mümkündür:

- a. Agrega amaçlı
- b. Kireç amaçlı
- c. Stabilize amaçlı
- d. Dolomit amaçlı
- e. Mozaik amaçlı
- f. Mermer amaçlı
- g. Çok amaçlı

Agrega ocakları genelde Bornova ilçesinde Naldöken, Doğanlar, Kavaklıdere, Altındağ ve Işıkkent mevkiinde faaliyet göstermektedir. Bu ocaklarda çimento hammaddesi ve hazır beton üretimi için kalker kökenli agrega üretilmektedir. İzmir ili anakent alanı içinde 30 adet, anakent alanı dışında 11 adet olmak üzere toplam 41 adet bu amaçla açılmış ocak mevcuttur. Agrega ocaklarının 16 tanesi faaliyetlerini sürdürmektedir. İzmir metropol alanı içinde kalan tüm ocakların faaliyetleri 1996 yılında İzmir Büyükşehir Belediyesi tarafından yarattıkları gürültü ve toz kirliliği nedeniyle sona erdirilmiştir. Ancak Tablo 5.1'de “*” simgesiyle gösterilen Bornova Işıkkent ve Belkahve mevkilerindeki bazı ocaklar "rehabilitasyon" amaçlı üretimlerine 01 Ocak 2008 tarihine kadar izin verilmiştir. Birinci derecede doğal sit alanı içinde kalan bu ocakların faaliyetleri, şev stabilitesini sağlamak amacıyla oluşturulan kademeli basamak yapısından artan malzemeyi işlemekle sınırlıdır.

Bornova Kavaklıdere mevkiindeki Dere Madencilik A.Ş.'ye ait taş ocağı, sit alanı dışında kaldığından ocak dolomit ruhsatıyla çalışmalarına devam etmektedir. Bemaş ve Bentaş'a ait Işıkkent'teki ocaklar faaliyetlerini durdurmuş ve Temeltaş A.Ş ile birleşerek çalışmalarını Belkahve'de sürdürmektedir. Naldöken-Kavaklıdere mevkiindeki agrega ocakları Batı Anadolu Çimento, Erkoç, İksaş, Temeltaş ve

Anadolu Mıdır tarafından işletilmektedir. Işıkkent-Altındağ mevkiindeki agrega ocakları ise Niyazi Ersoy Oğulları, Bemaş, Bentaş ve Çimentaş Çimento fabrikası tarafından işletilmektedir.

İzmir anakent alanı dışında kalan ocaklar ise genellikle Urla, Karaburun, Çeşme, Torbalı, Selçuk ilçelerinde bulunmaktadır. Eskiden taşocağı nizamnamesine göre işletilen ocakların bir kısmı bugün terkedilmiştir. Bu ocakların büyük bir bölümü maden ve kalker-mermer ruhsatlı sahalar içerisinde kalmaktadır. Bornova, Gaziemir ve Buca ilçelerinde Mesozoyik kireçtaşları birimi içerisinde açılan ocakların bir kısmı günümüzde faaliyetlerini sürdürememektedir. Günümüzde anakent alanı dışında alternatif sahaların tespitine yönelik araştırmalar sürdürülmektedir (Tolungüç, 2000).

Özellikle devlet kuruluşlarına [DSİ, KGM ve İl Özel İdareleri] ait sahaların bir kısmında üretim faaliyeti bulunmamaktadır. Özel sektöre ait mühürlenmemiş tüm ocaklar üretimlerine devam etmektedirler. Üretim miktarları, yasal sınırlamalar ve talebe bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

5.1.2 Farklı Bölgelerden Agrega Temini

İzmir ili ve çevre ocaklardan temin edilen agregalar değerlendirildiğinde, mineraloji ve kırma yöntemi açısından istenilen çeşitlilik elde edilememiştir. Bu nedenle, farklı bölgelerdeki agrega ocaklarından da örnekleme yapılması zorunlu olmuştur (Şekil 5.3).

Ülkemizde beton ve asfalt üretiminde genellikle kireçtaşı kullanılmaktadır. Bu nedenle, agrega temininde ağırlıklı olarak kireçtaşı agregaları tercih edilmiştir. Yirmi dört farklı ocaktan temin edilen kireçtaşı yanında, 6 nehir agregası, 3 doğal ve kırmataş teras agregası, 3 bazalt, 2 andezit, 2 grovak (gritstone) ve bir kırma mermer örnekleme yapılmıştır. Farklı mineralojik kökenli bu agregalar, doğal veya ocaklarında çeneli, darbeli, çekiçli, konik, merdaneli vb. gibi kırma yöntemleri ile kırılmış olduğundan, kırıcı tiplerine göre sınıflandırılmıştır (Tablo 5.2).



Şekil 5.3 Agregat örneklerinin alındığı bölgeler

5.2 İnce Agregat Şekli ve Yüzey Pürüzlülüğünün Standart Deney Yöntemleri ile Belirlenmesi

Agregalar gibi düzensiz geometrili yapıların belirlenmesindeki zorluk nedeni ile taneler arası sürtünme ve boşluk oranını esas alan deney yöntemleri önerilmiştir. Bu amaçla önerilen standart deney yöntemleri; agreganın şekil ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerine bağlı olarak, taneler arasındaki sürtünmeye bağlı akış süresinin fazla olacağı (TS EN 933-6) ve temas eden taneler arasında daha büyük boşluk oluşacağı (ASTM C1252) temeline dayanmaktadır. Bu yöntemlerle, agregaların şekil ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğu düşünülen akma süreleri (akış katsayıları) ve sıkışmamış boşluk oranları dolaylı olarak belirlenebilir.

Bunun yanında CAR Test “Sıkışmış agregat kayma mukavemeti deneyi” agregat şekli ve yüzey pürüzlülüğünü ifade etmek için ASTM C1252’ye alternatif bir yöntem olarak önerilmiştir. Agregat tanelerinin şekline ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olan kayma mukavemetinin ölçülmesi esasına dayanır. Daha yüksek kayma mukavemeti, daha yüksek köşelilik ve yüzey pürüzlülüğünü ifade eder.

Tablo 5.2 Kırma yöntemi ve agrega cinsine göre sınıflandırılmış ince agrega örnekleri

Agrega No	Kırıcı Tipi	Agrega Cinsi	Ocak&Bölge	Agrega Boyutu			
				No.5-No.200		No.10-No.200	
				ρ_p	%w	ρ_p	%w
N-N1	Z	Doğal	Salihli/Manisa	2,505	2,951	2,451	2,754
N-N2		Doğal	Kepsut/Balıkesir	2,472	1,069	2,430	0,900
N-N3		Doğal	Çine/Aydın	2,586	1,220	2,600	1,220
N-N4		Doğal	Odemiş/İzmir	2,626	1,010	2,628	1,215
N-N5		Doğal	Aydın Kum/İzmir	2,490	1,210	2,533	1,240
N-N6		Doğal	Gölmarmara	2,460	1,630	2,511	1,650
N-S7		Teras	Ege Kum/Turgutlu	2,571	1,950	2,573	1,950
R-S8	Merdane (R)	Teras	Ege Kum/Turgutlu	2,565	1,950	2,565	1,949
R-B9		A.Bazalt	Davutlar/Kuşadası	2,306	6,270	2,290	6,520
J-L10	Çeneli (J)	Kireçtaşı	Erdoğanlı/Bursa	2,644	1,461	2,610	1,895
J-L11		Kireçtaşı	Erdoğanlı/Bursa	2,631	1,022	2,619	1,010
J-L12		Kireçtaşı	Yeniköy/Balıkesir	2,672	0,900	2,605	1,010
J-L13		Kireçtaşı	D.Boğazi/Balıkesir	2,542	3,520	2,497	3,734
J-L14		Kireçtaşı	Yılankale/Adana	2,688	0,807	2,677	0,705
J-L15		Kireçtaşı	Mecidiye/Keşan	2,620	0,300	2,610	0,300
J-L16		Kireçtaşı	Zeytinli/ÇimBet.	2,457	0,503	2,450	0,912
J-A17		Andezit	Marda/Ayvalık	2,420	2,670	2,460	2,800
J-G18		Grovak	İkitelli/İstanbul	2,600	2,564	2,536	2,965
C-L19	Konik (C)	Kireçtaşı	Alacaatlı/Ankara	2,660	0,964	2,624	1,071
C-L20		Kireçtaşı	Torbalı/İzmir	2,542	2,520	2,593	2,040
C-L21		Kireçtaşı	Bayındır/İzmir	2,665	0,847	2,624	0,867
C-L22		Kireçtaşı	Batıbeton/İzmir	2,627	0,705	2,638	0,915
C-L23		Kireçtaşı	Belkahve/İzmir	2,636	0,910	2,639	0,505
C-L24		Kireçtaşı	Karakaşlar/Söke	2,626	1,833	2,630	1,937
C-L25		Kireçtaşı	Ema/Söke	2,652	1,058	2,710	0,807
C-L26		Kireçtaşı	Y.Hereke/Gebze	2,700	1,215	2,720	1,317
C-L27		Kireçtaşı	Akyıldız/Gebze	2,611	0,600	2,611	0,600
C-L28		Kireçtaşı	Entegre/Şile	2,840	0,200	2,793	0,301
C-L29		Kireçtaşı	Pabuçcu/Bursa	2,628	1,110	2,647	1,010
C-A30		Andezit	Ayşebacı/Balıkesir	2,287	3,730	2,278	3,754
I-L31	Çekiçli (I)	Kireçtaşı	Akyapı/İzmit	2,671	0,908	2,698	0,705
I-M32		Mermer	Yurdum M./Denizli	2,633	1,010	2,597	1,068
I-L33		Kireçtaşı	Karatepe/Çorlu	2,833	1,420	2,829	1,348
I-B34		Bazalt	Polatlı/Ankara	2,780	3,870	2,735	3,870
I-G35		Grovak	İkitelli2/İstanbul	2,656	2,502	2,596	2,649
V-L36	Düşey Millî (V)	Kireçtaşı	Korkuteli/Antalya	2,558	1,354	2,599	1,523
V-L37		Kireçtaşı	Agregasa/Gebze	2,700	0,400	2,707	0,400
V-L38		Kireçtaşı	Dere maden/İzmir	2,687	1,270	2,660	1,360
V-B39		Bazalt	Dere maden/Aliağa	2,770	0,650	2,660	2,200
V-S40		Teras	Ege Kum/Turgutlu	2,566	1,760	2,565	1,949
V-L41		Kireçtaşı	Batıbet./Menemen	2,632	1,300	2,567	0,915

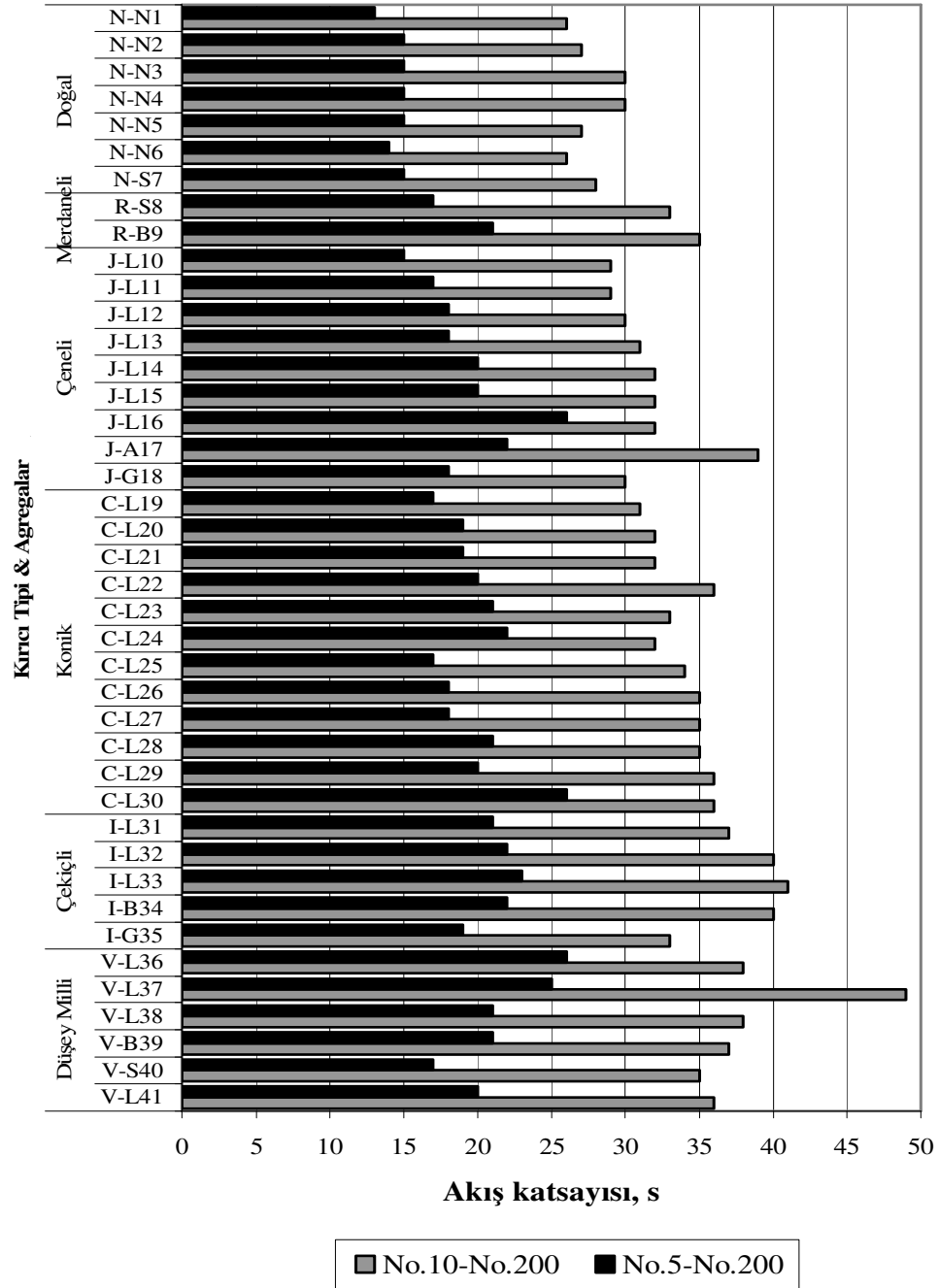
Tablo 5.2’de görülen agrega örnekleri 41 farklı ocaktan TS 707 “Beton agregalarından numune alma ve deney numunesi hazırlama yöntemi”ne uygun olarak alınmıştır. Bu agregalarda öncelikle kuru birim hacim ağırlık (ρ_p) ve su emme yüzdeleri (%w) TS EN 1097-6 “Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini” yöntemine göre belirlenmiştir (Tablo 5.2). Temin edilen agregaların şekli ve yüzey pürüzlülükleri, Bölüm 2’de detayları verilen mekanik deney yöntemleri ile belirlenmiştir. TS EN 933-6’e göre “akış katsayıları” ve ASTM C 1252’ye göre “sıkışmamış boşluk oranı” ve CAR test “agrega kayma mukavemeti” deney sonuçları değerlendirilerek, yöntemlerin birbirlerine göre avantajlı ve dezavantajlı yönleri ortaya konmaya çalışılmıştır. Sonuçlar, agrega geometrik özelliklerinin belirlenmesinde daha etkili bir ölçüm yöntemine olan ihtiyacı ortaya koymak açısından önemlidir.

5.2.1 İnce Agregalarda Akış Katsayıları (TS EN 933-6)

TS EN 933-6 deneyi için Tablo 5.2’deki BHA’lara bağlı olarak akış hunisine konacak malzeme miktarları $\rho_p/2,7$ bağıntısı ile hesaplanmıştır. TS EN 933-6’ye göre ince agregalarda şekil ve yüzey pürüzlülüğünü ifade eden akış katsayıları No.5-No.200 (4mm-0,063mm) ve No.10-No.200 (2 mm-0,063 mm) boyutlarındaki agregalara uygulanmıştır. Deneyler, her bir ince agrega örneği için 5’er kez tekrarlanarak akış süreleri ölçülmüş ve ölçüm değerlerinin ortalaması alınmıştır. Ölçümlerde 0,1 s hassasiyetinde kronometre kullanılmıştır. Elde edilen değer en yakın tam sayıya yuvarlatılmak sureti ile agregaların akış katsayıları belirlenmiştir. TS EN 933-6 yöntemine göre ince agregaların akış katsayıları Şekil 5.4’de görüldüğü gibidir. Bölüm 2’de de bahsedildiği üzere yüksek akış süresi, daha çok köşelilik ve pürüzlülük anlamına gelir.

Farklı kırıcı tipleri ile kırılan agregaların temin edilmesi ile ince agrega şekil ve yüzey pürüzlülüğü özellikleri kırma yöntemi açısından değerlendirilmiştir. Akış katsayısı deney sonuçları, beklendiği gibi kırmataş agregaların doğal agregalara kıyasla şekil ve yüzey pürüzlülüğü açısından daha düzensiz olduğunu göstermektedir. Kırmataş agregaların akış katsayıları, her iki boyut aralığında doğal

agregalara göre daha yüksek değerler almıştır. Akış katsayıları, agrega mineralojisi ve kırma yöntemine bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 5.4 İnce agrega akış katsayıları (TS EN 933-6)

Akış katsayılarının alabileceği değerlerin limit koşulları standartta tanımlanmamıştır. Ancak, Fransız agrega üreticileri birliği (UNPG), ilk olarak AFNOR P18-564'de tanımlanan bu deney yöntemi için birinci derece öneme sahip asfalt betonu karışımlarında 2 mm-63 µm boyut aralığı için en az 35 s, daha az öneme sahip karışımlarda ise en az 30-35 s aralığında olması gerektiğini belirtmiştir (J. F. Corte (LCPC, Teknik müdür), Kişisel iletişim, 14 Kasım 2000). Bu durumda hiç bir doğal agrega bu kriterleri sağlayamamaktadır. Düşey milli ve çekiçli kırıcılarda kırılan kalker ve bazalt agregaları 35 s ve üzeri akış katsayılarına sahip olduğundan, aderans açısından yüksek dayanım gerektiren karışımlara daha uygundur. Konik kırıcılarla kırılan agregaların akış katsayıları ise genellikle 30-35 s aralığında değişmektedir. Bu nedenle kullanım açısından normal dayanım koşullarına uygun gözükmemektedir. Çeneli kırıcılarla kırılan kalker agregalarının bazıları 30-35 s aralığında, bazıları ise 30 s'nin altında değerler almıştır. Bununla birlikte, 4 mm-63 µm boyut aralığı için kriter bulunmamaktadır. Beton agregası olarak kullanım açısından üzerinde fikir birliğine varılmış bir sınırlama bulunmamaktadır.

Düşey milli ve çekiçli kırıcılarla kırılan agregaların akış katsayıları, çeneli ve konik kırıcılarla kırılan agregalara göre daha yüksektir. Agregasa/Gebze kireçtaşı agregası V-L37, 2 mm-63 µm boyut aralığı için en yüksek akış katsayısı değerini (49s) almıştır. Ancak, 4 mm-63 µm boyut aralığı için bu değer (25 s) olup, V-L36 ve C-L30 ve J-L16 agregalarına göre (26 s) daha düşük değer almaktadır. İki farklı boyut aralığı için akış katsayıları benzer eğilimde olmayabilmektedir. Çekiçli kırıcı ile kırılan I-G35 grovak agregası, diğer çekiçli ve düşey milli kırıcılarla kırılan agregalara göre daha düşük akış katsayısı değerleri almıştır. Andezit mineralleri ise iri kristalli olması nedeni ile yüksek pürüzlülüğe sahiptir. Bu nedenle, çeneli kırıcı ile kırılan J-A17 andezit agregasının akış katsayıları, diğer çeneli kırıcılarla kırılan agregalardan daha yüksek çıkmıştır.

Merdaneli kırıcı ile kırılan agrega örneklerinin (R-S8 ve R-B9) akış katsayıları; doğal, çeneli ve bazı konik kırıcılı agrega örneklerinden daha yüksektir. Ancak agreganın gözle yapılan muayenesinde, özellikle R-B9 agregasının yüksek oranda yassı tane içerdiği belirlenmiştir. Agreganın köşeliliği ve pürüzlülüğü yanında, şekil özniteliklerinden biri olan kusurlu tane yüzdesinin de deney sonuçları üzerinde etkili

olduğu söylenebilir. Yüksek akış katsayısı değerlerinin sadece agrega köşeliliği ve yüzey pürüzlülüğünü ifade edemeyeceği görülmektedir. Deney sonuçları agrega granülometrisine ve kusurlu malzeme yüzdesine de bağlı olarak değişebilmektedir.

Deney yönteminde, agregaların tane boyut dağılımı ile ilgili bir sınırlama bulunmamaktadır. Bununla birlikte, yapılan ön deneylerde sonuçların tane boyut dağılımından etkilendiği görülmüştür. Standartta belirtilmediği halde, deneylerde kullanılan agregalarda granülometri düzenlemesi yapıldığında, akış katsayılarının azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca, yassı tanelerin fazla olduğu agregalarda akış hunisinde meydana gelen tıkanma sorunu, granülometri düzenlemesi ile giderilebilmektedir.

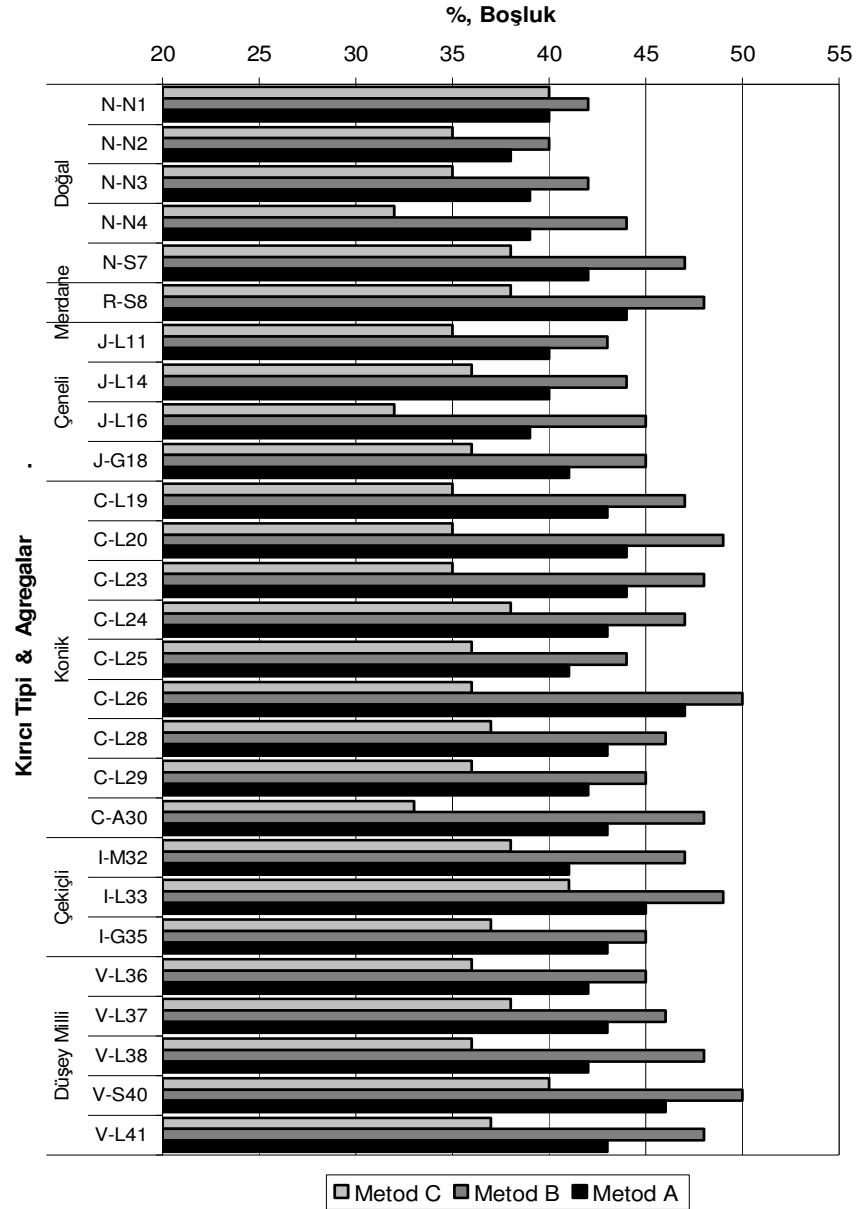
5.2.2 İnce Agregalarda Sıkışmamış Boşluk Oranları (ASTM C1252)

Agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğünü ifade eden diğer dolaylı yöntemlerden, ASTM C1252 “İnce agregalarda sıkışmamış boşluk oranı” deneyi ve hesap yöntemi (Denklem 2.14) Bölüm 2’de detayları ile verilmiştir. Deney sonunda elde edilen yüksek boşluk oranı agregada daha çok kırılmış yüzeyi belirtir (Masad ve diğer., 2000).

Bu yöntemle göre deneyler, 27 farklı agrega örneği üzerinde Tablo 2.5’de tanımlanan standart granülometride (Metod A), standart granülometri için kullanılan her bir boyut aralığı için ayrı ayrı yapılan ölçümlerin ortalaması alınmak sureti ile (Metod B) ve ocaktan geldiği haldeki granülometride (Metod C) yapılmıştır. Deneyler, her bir agrega örneği için üçer kez tekrarlanarak ölçüm sonuçlarının ortalaması alınmıştır. Ölçümlerde 0,001 g hassasiyetinde tartı kullanılmıştır. Deney sonuçları Şekil 5.5’de görüldüğü gibidir.

Deney sonuçları, boşluk oranı ve akış katsayıları ile değerlendirilen agrega köşeliliği ve yüzey pürüzlülüğünün geniş bir aralıkta değiştiğini göstermektedir. Değerler agrega mineralojisi, şekli, köşeliliği ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak değişkenlik gösterir. Doğal agregalara oranla kırmataş agrega şekilleri ve yüzey pürüzlülükleri daha düzensizdir. Doğal agregalar, doğanın aşındırıcı etkileri sonucu yuvarlak ve yüzeyleri pürüzsüz olma eğilimindedirler. Kırmataş agregalar ise

kırılmış yüzeylere sahip olduklarından ve yeni kırılan yüzeylerde aşınma olmadığından, agreganın kökenine de bağlı olmakla birlikte daha pürüzlüdür. Bu nedenle, kırma yönteminin, agregaların şekli ve köşeliliği üzerinde etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 5.5 İnce agrega sıkışmamış boşluk oranları (ASTM C1252)

ABD’de Superpave (Superior Performance Asphalt Pavements) araştırmacıları, ASTM C1252 Metod A’ya göre boşluk oranının en az % 40 olması gerektiğini belirtmişlerdir. Boşluk oranını % 40-45 değeri arasında olan agregalar orta dereceden, % 45’den büyük değeri alan agregalar ise yüksek dereceden köşeli ve pürüzlü olarak tanımlanır (Lee, Pan, ve White, 1998; Cominsky, 1994). Bu değeri yol malzemeleri için öngörülen kriterlerdir. Çimento harcı ve beton üretiminde kullanılacak agregalar için bir sınırlama bulunmamaktadır.

Superpave kriterleri değeriendirilecek olursa; agregaların sıkışmamış boşluk yüzdeleri, Metod A ve Metod B’ye göre benzer eğilimlerdedir. Superpave’in önerdiği Metod A’ya göre % 45 ve üzeri yüksek dereceden sıkışmamış boşluk oranları C-L26, V-S40 I-L33 agregalarında (sırasıyla % 47, 46, 45) elde edilmiştir. Bu agregalar konik (C), düşey milli (V) ve çekikli (I) kırıcılarla kırılmıştır. Metod B ye göre en yüksek boşluk oranları yine aynı agregalarda elde edilmiştir. Tane boyutu düzenlemesi yapılmayan ve ocaktan alındığı haldeki granülometride uygulanan Metod C’ye göre en yüksek boşluk oranı değeri I-L33, V-S40 ve I-M32 (sırasıyla %41, %40, %38) agregaları ile elde edilmiştir. Deney yönteminin granülometri değerişimlerinden büyük ölçüde etkilendiği, Metod C sonuçlarındaki ani değerişimlerden anlaşılmaktadır. Örneğin; Metod A’ya göre C-A30 agregasının boşluk oranı % 43 iken, Metod B ye göre % 48, Metod C’ye göre % 33 olarak ölçülmüştür. Diğer agregalar için de benzer sonuçlar Şekil 5.5’den görülebilir. Bu sonuçlar, sıkışmamış boşluk oranı değerilerinin tane şekli ve yüzey pürüzlülüğü yanında, agregatane boyutu dağılımından etkilendiğini göstermektedir.

Doğal nehir agregalarının (N) akma oranları Superpave Metod A kriterinin ($\geq 40-45$) altında değeri almıştır. Sadece doğal teras ocağı agregası N-S7’nin boşluk oranı (%42) ise bu kriterin üzerinde değeri almıştır. Teras agregalarının nispeten köşeli şekil özelliklerinde olduğu bilinmektedir. Aynı teras agregasının merdaneli kırıcı ile kırıldığı R-S8 agregasında boşluk oranı % 44’e, düşey milli kırıcı ile kırıldığı V-S40 agregasında % 46’ya yükselmiştir. Deney sonuçları, kırma işlemi yönteminin agregatane şekli ve köşeliliği üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

Kırmataş agregalar, doğal agregalara göre daha köşeli ve kübik şekilli olmalarına rağmen, her kırmataş agregası yüksek köşelilik değerine sahip değildir ve Superpave kriterlerini sağlamayan bazı kırmataş agregaları da vardır (Örneğin; J-L16). Çeneli kırıcı ile kırılmış olan bu kalker agregasının düşük köşelilik ve yüzey pürüzlülüğünde olmasının nedeni uygun kırma yönteminin seçilmemesi olabilir.

5.2.3 Sıkıştırılmış Agrega Mukavemeti Deneyi (CAR Test)

CAR Test “Compacted Aggregate Resistance Test” agregası şekli ve yüzey pürüzlülüğünü ifade etmekte daha etkin bir yöntem geliştirmek amacı ile yapılan araştırmalarda David W. Jahn, (2003) tarafından önerilmiştir. Deney düzeneği ve deney yönteminin uygulanışı Bölüm 2’de tanımlanmıştır. Bununla birlikte, en temel olarak; sıkıştırılmış ince agregası yüzeyine basınç uygulamak sureti ile agregası taneleri arasında agreganın şekline ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olan kayma mukavemetinin ölçülmesi esasına dayanır.

Deneyler için Bölüm 2’de tarif edilen deney düzeneği hazırlanmıştır. Bunun için standart Marshall ekipmanlarına ek olarak bir yükleme başlığı yaptırılmıştır (Şekil 5.6-b).



(a) Deney ekipmanının hazırlanması

(b) Yükleme

Şekil 5.6 CAR test

CAR test 15 farklı agregası örneği için 2 farklı granülometride ve her agregası için 3’er adet numune üzerinde uygulanmıştır. Agregası seçiminde, standart yöntemlere

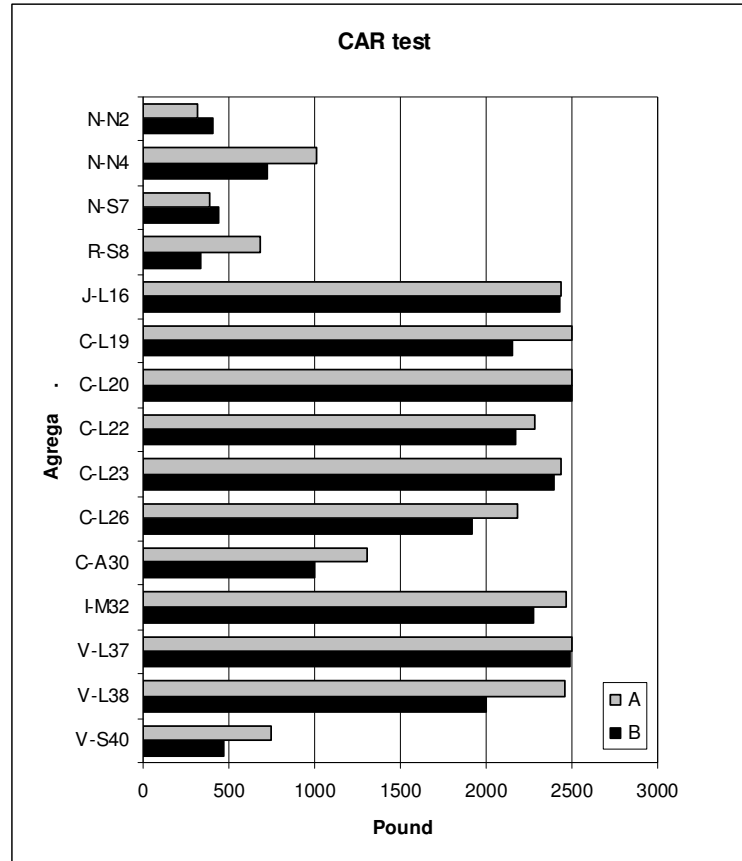
göre farklı şekil ve yüzey pürüzlülüklerinde olan agregalar tercih edilmiştir. Her bir agrega için 10'ar kilo agrega numunesi alınmıştır. Deneyler, standart granülometride (A) ve ocaktan alındığı granülometrideki (B) 2,36 mm elekten elenen ince agregalara uygulanmıştır. Standart granülometri (A) için agregalar Tablo 5.3'de belirtilen eleklerle elenerek, her bir boyut aralığı için gereken miktarda agrega alınmıştır. Agregalar % 3 nem içeriğine getirildikten sonra çeyreklemeye yöntemi ile 1:4 oranında malzeme alınmıştır. Bu malzeme, 10 cm çapındaki Marshall kalıplarına iki tabaka halinde ve her tabaka 20'şer kez şişlenerek yerleştirilmiş ve Marshall kompaktöründe 50 darbe ile sıkıştırılmıştır. Daha sonra deney numunesi Marshall stabilite aletine yerleştirilip, yükleme başlığı ve deplasman ölçerin (LVDT) konumları ayarlanmış ve numune yüzeyinden yük uygulanmıştır (Şekil 5.6 a-b). Elektronik Marshall Test-E aleti, deformasyonun 0,25 inç (~0,63 cm)'e ulaştığında veya malzeme dayanımının aletin yük taşıma kapasitesini aşması durumunda otomatik olarak sona erer. Elde edilen sonuçlar, Tablo 5.4 ve Şekil 5.7'de görülmektedir.

Tablo 5.3 CAR test (A) agrega oranları

Elek	Geçen (%)	Kalan (%)	Eklenik Kalan, (%)	Ağırlık (g)
No.8	100	0	0	0
No.10	91,2	8,8	8,8	97
No.40	44,1	47,1	55,9	615
No.80	29,4	14,7	70,5	776
No.200	17,6	11,8	82,4	906
Elek altı	0	17,6	100	1100

Tablo 5.4 CAR test sonuçları

Numune No	CAR test, Yük - lb (kg)	
	Standart Granülometri (A)	Ocak Granülometrisi (B)
N-N2	312 (142)	405 (184)
N-N4	1015 (460)	721 (327)
N-S7	384 (174)	434 (197)
R-S8	687 (312)	339 (154)
J-L16	2436 (1105)	2430 (1102)
C-L19	≥2500 (1134)	2149 (975)
C-L20	≥2500 (1134)	≥2500 (1134)
C-L22	2281 (1035)	2173 (986)
C-L23	2438 (1106)	2394 (1086)
C-L26	2180 (989)	1922 (872)
C-A30	1306 (592)	999 (453)
I-M32	2474 (1122)	2275 (1032)
V-L37	≥2500 (1134)	2490 (1130)
V-L38	2457 (1114)	1997 (906)
V-S40	742 (337)	465 (211)



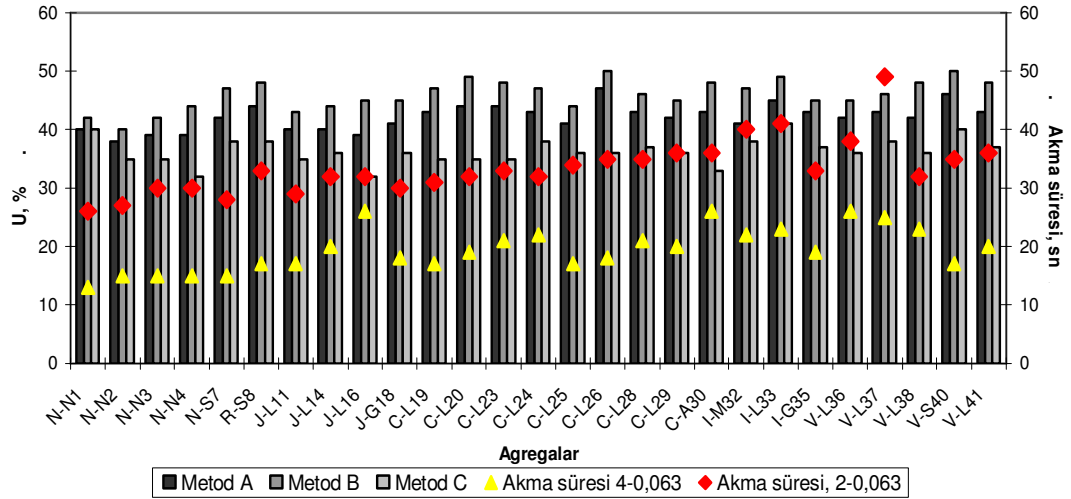
Şekil 5.7 CAR test sonuçları

Deney sonuçları incelendiğinde; doğal nehir ve teras ocağı agregaları, mermer (I-M32), andezit (C-A30) ve farklı kırıcı tiplerinde kırılmış kireçtaşlarına göre daha düşük kayma mukavemeti göstermiştir. Kırmataş V-L37 ve C-L19 agregaları standart granülometride (A) ve C-L20 agregası her iki granülometride (A ve B) aletinin yükleme kapasitesini (≥ 2500) aşmıştır. Deney yöntemine göre bu agregalar en yüksek dereceden köşeli, kübik ve pürüzlü agregalardır. Kırma teras agregaları (V-S40 ve R-S8) ise düşük kayma mukavemeti göstermişlerdir. Kayma mukavemetinin düşük olmasının sebebi, agrega tanelerinin kırmataş agregalara göre nispeten aşınmış yüzeylere sahip olmasıdır.

5.2.4 Standart Deney Yöntemlerinin Karşılaştırılması

ASTM C1252 Metod A-B-C'ya göre yapılan sıkışmamış boşluk oranı ve TS EN 933-6'ya göre yapılan akış katsayıları standart deney yöntemleri tekrarlanabilirlik açısından iyi sonuçlar vermiştir. Birbiri ardına tekrarlanan deneyler arasındaki farklar küçük mertebelerdedir.

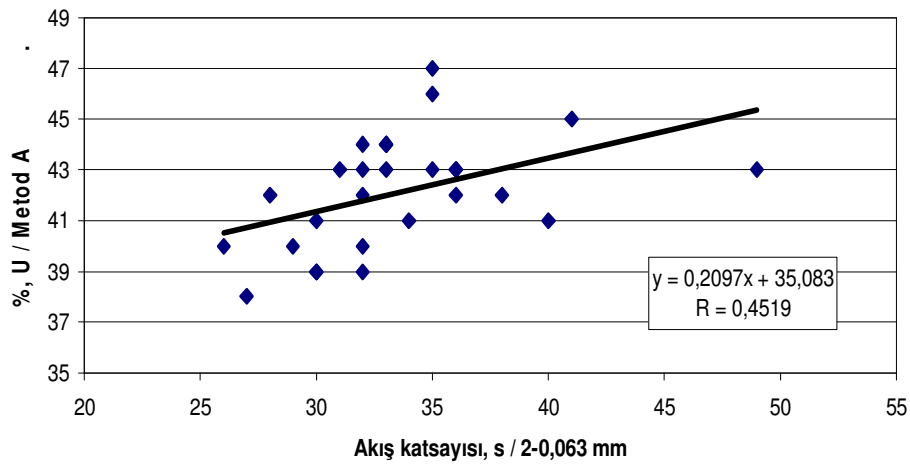
Sıkışmamış boşluk oranı ve akış katsayıları deney sonuçları Şekil 5.8'de aynı grafik üzerinde görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde; çekiçli kırıcılar (I) ve düşey milli döner kırıcılarla (V) kırılan agregaların akış katsayıları ve akma sürelerinin her agrega cinsi için daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Doğal agregalarda (N) her iki deney yöntemine göre elde edilen sıkışmamış boşluk oranları, kırmataş agregalara göre daha düşük değerlerdedir.



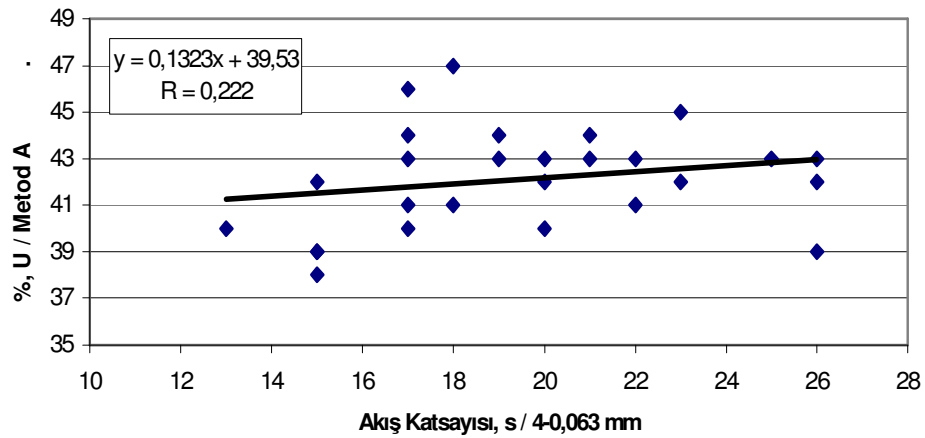
Şekil 5.8 ASTM C1252 ve TS EN 933-6 deney sonuçlarının karşılaştırılması

Metod A ve Metod B'ye göre sıkışmamış boşluk oranları en yüksek olan agregalar; sırası ile V-L38, V-L40, V-L41, C-L26, I-L33 ve C-L20 iken, akış katsayıları değerlendirildiğinde, sıralama V-L37, I-M32, I-L33, I-G35 C-L26 ve C-L20 şeklinde değişmektedir (Şekil 5.8).

Sıkışmamış boşluk oranı ve akış katsayıları arasındaki ilişkiler incelendiğinde, Metod A'ya göre boşluk oranı (%U) ile akış katsayıları arasında iyi bir korelasyon görülmektedir (Şekil 5.9 - 5.10). ASTM C1252 ve TS EN 933-6 deney yöntemi sonuçları arasında çok düşük dereceden doğrusal bir korelasyon olduğu söylenebilir.



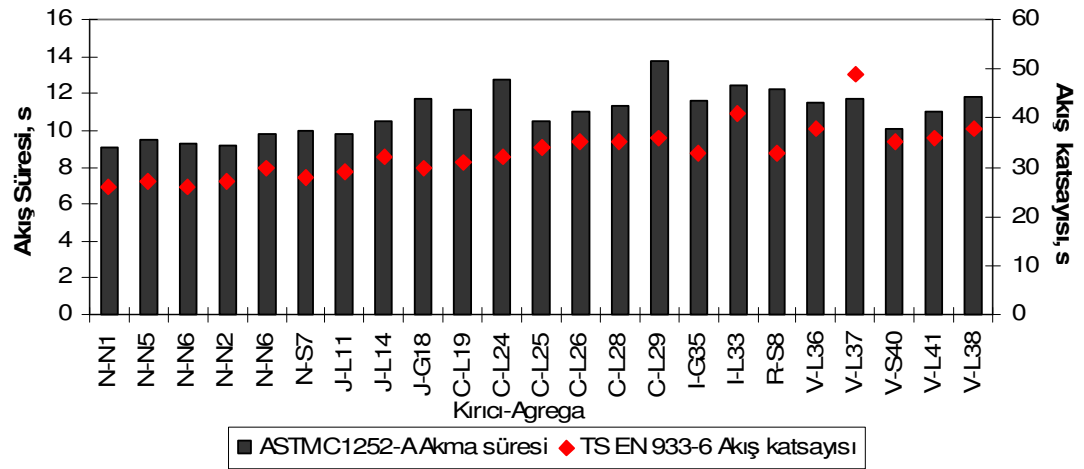
Şekil 5.9 ASTM C1252 ve TS EN 933-6 deney sonuçları ilişkisi (Metod A–No.10-No.200)



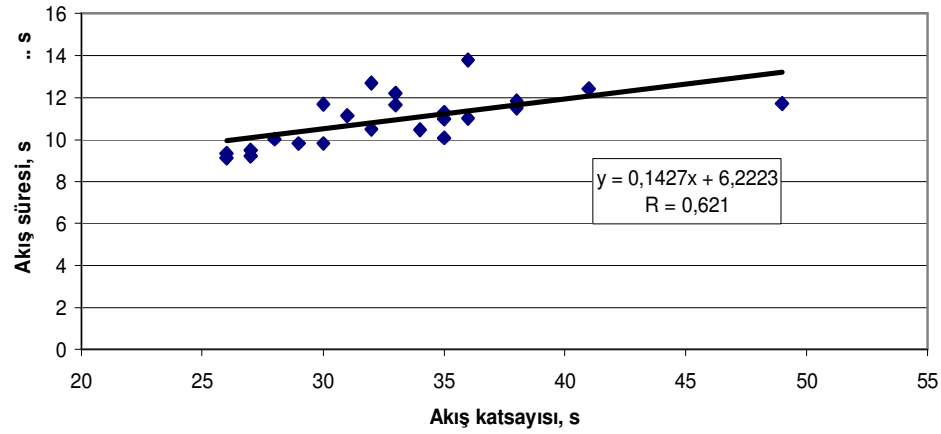
Şekil 5.10 ASTM C1252 ve TS EN 933-6 deney sonuçları ilişkisi (Metod A-No.5-No.200)

ASTM C1252 Metod-A'ya göre sıkışmamış boşluk oranı deneyleri yapılırken, bazı agregalar için agrega akış süreleri TS EN 933-6 deneyine benzer şekilde ölçülmüştür. Şekil 5.11'de her iki deney yöntemine göre akış süreleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sırasıyla No.10-No.200 ve No.5-No.200 tane boyut aralıklarındaki akış süreleri ile boşluk oranı deneyi sırasında ölçülen akma süreleri arasındaki ilişki Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de görülmektedir. İki farklı değişken olan akma süreleri arasında anlamlı bir ilişki bulunup bulunmadığını belirlemek, böyle bir ilişki varsa bu ilişkiyi ifade eden regresyon denklemini elde etmek amacı ile regresyon analizleri yapılmıştır.

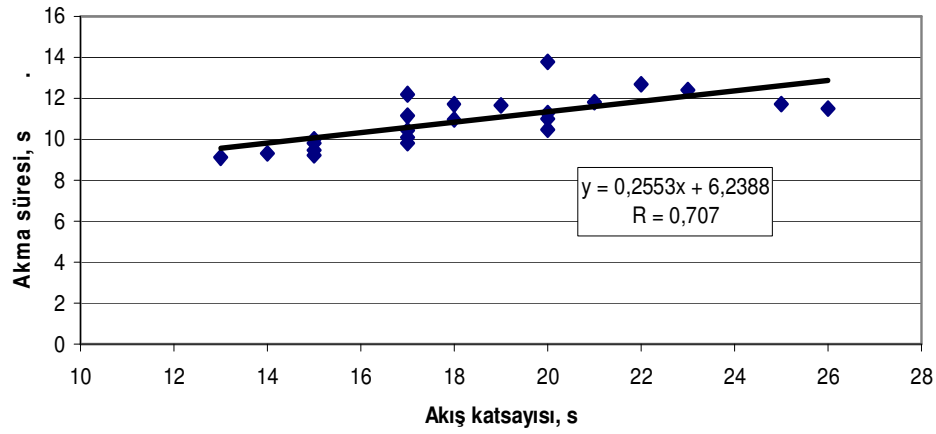
Doğal agregalar için en küçük değerlerini alan akış katsayısı ve akma süreleri, kırma yöntemi çeneli, konik, darbeli ve düşey milli kırıcılarla kırılan agregalarda sırasıyla artış göstermiştir. Agreganın mineralojik kökenine bağlı olarak artış eğiliminde bazı sapmalar gözlenmektedir (Örneğin; I-G35, R-S8, V-S40).



Şekil 5.11 İnce agregalarda akma süresi ve akış katsayıları (Metod A–No.10-No.200)



Şekil 5.12 İnce agregalarda akma süresi ve akış katsayıları ilişkisi (Metod A–No.10-No.200)



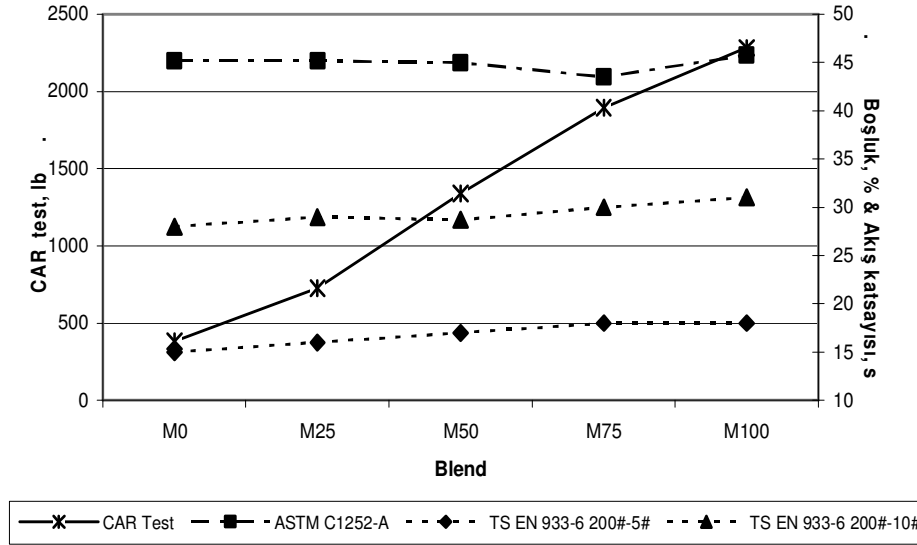
Şekil 5.13 İnce agregalarda akma süresi ve akış katsayıları ilişkisi (Metod A–No.5-No.200)

Akma süreleri ASTM C1252 Metod A için 4,75 mm'den küçük, TS EN 933-6 için 2 mm'den küçük ince agregalarda yapılmıştır. Deney sonuçları ve regresyon denklemi Şekil 5.12'de görüldüğü gibidir. Korelasyon katsayısı 0,621 olduğundan, aradaki ilişkinin deterministik olduğu söylenemez. Bu durumun nedeni, en büyük tane boyutlarının aynı olmayışı ve tane boyut dağılımındaki farklılık olabilir.

Şekil 5.13'de görülen akma süreleri ise, Metod A için 4,75 mm'den küçük, TS EN 933-6 için 4 mm'den küçük ince agregalarda yapılmıştır. Nispeten birbirine yakın en büyük tane boyutları için korelasyon katsayısı 0,707 olup 1'e yaklaşmaktadır.

5.2.5 İnce Agreganın Şekli ve Yüzey Pürüzlülüğü Dolaylı Deney Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Deney yöntemlerinin daha objektif olarak karşılaştırılabilmesi amacıyla, düşük kayma mukavemeti gösteren N-S7 agregasına yüksek kayma mukavemeti gösteren ancak alet kapasitesini aşmamış olan C-L22 agregası %25, %50, %75 oranlarında ikame edilmiştir. Bu karışımlarla yapılan deneylerde ASTM C1252-Metod A'ya göre sıkışmamış boşluk oranı, TS EN 933-6'ya göre akış katsayısı ve CAR test sıkıştırılmış agrega kayma dayanımı deney sonuçlarının ortalamaları Şekil 5.14'de görüldüğü gibidir. Şekilde M0 %100 N-S7 agregasını, M100 ise %100 C-L22 agregasını ifade etmektedir.



Şekil 5.14 Dolaylı deney yöntemi sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 5.14 incelendiğinde, akış katsayılarının ve CAR test kayma dayanımlarının M0'dan M100'e doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. Karışımındaki kırmataş agregası (C-L22) oranı artıp, doğal agregası (N-S7) oranı azaldıkça, kayma dayanımları ve akış katsayıları da artmaktadır. CAR test deney sonuçlarındaki değişim daha belirgin bir biçimde kayma dayanımının artması şeklinde ortaya çıkmıştır. Sıkışmamış boşluk oranlarında belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir. Aksine, M75 karışımında boşluk oranı bir miktar azalmıştır.

Sonuçlar, ASTM C1252 deney yönteminin farklı köşelilik ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerindeki kırmataş ve doğal agregası ayırımı yapmakta başarılı olamadığını göstermektedir (Şekil 5.14). Bu durum, karışım içerisinde az veya çok miktarda yuvarlak ya da kusurlu agregası olması durumunda bile deney sonuçlarının çok değişmeyeceğini göstermektedir. Farklar çok belirgin olmamakla birlikte, ASTM C1252'ye göre TS EN 933-6 deney yönteminin agregası şekli ve yüzey pürüzlülüğünü ifade etmede daha başarılı olduğu görülmektedir.

Yeni geliştirilmekte olan CAR yönteminde ise diğer dolaylı yöntemlere kıyasla kırmataş ve doğaltaş ayırımı belirgin bir şekilde yapılabilmektedir (Şekil 5.14).

5.2.6 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çalışmanın bu bölümünde, ince agregalarda akış katsayıları, sıkışmamış boşluk oranı ve sıkışmış agregaya kayma mukavemeti (CAR Test) deney sonuçlarının mineral agregaya cinsi ve kırıcı tipine bağlı değişimi incelenmiştir. Ayrıca, dolaylı deney yöntemlerinin sonuçları kıyaslanarak, agregaya geometrik özelliklerini belirlemede kullanılan bu yöntemlerin birbirlerine göre üstünlükleri değerlendirilmiştir.

Agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğü belirlemek amacı ile kullanılan standart (dolaylı) ölçüm yöntemleri, belli miktardaki agreganın bir huniden akış süresini veya bir silindir kapta kapladığı dolu hacmi esas alan yöntemlerdir. CAR test, bu yöntemlere alternatif olarak geliştirilen ve agregaya tanelerinin içsel kenetlenmesini esas alan kayma mukavemetinin belirlenmesi deneyidir.

TS EN 933-6'ya göre akış katsayılarının belirlenmesi sırasında birbiri ardına aynı agregaya ile tekrarlanan deneylerde akış katsayıları arasındaki farklar çok küçük mertebelerde olmaktadır. Ancak, ocaktan alındığı haldeki granülometride ince tane oranı az olduğunda ve/veya yassı ve uzun tane oranı fazla olduğunda deney hunisi tıkanabilmektedir. Tekrarlanan deneylerde değişimler çok küçük mertebelerde olmasına rağmen, aynı agregaya ocağından farklı zamanlarda yapılan örneklemelerde, deney sonuçlarının büyük oranda değişebildiği görülmüştür. Örneğin C-L22 agregası ile ilk yapılan deneylerde Şekil 5.4'de görüleceği üzere, iki farklı agregaya boyut aralığı için belirlenen akış katsayıları (20-36 s), bir sonraki çalışma için ocaktan yeniden örneklemeye yapıldığında Şekil 5.14'den görülebileceği üzere (18-31 s) olarak ölçülmüştür. Bu durumun nedeni, ocakta kırma makinalarında zamanla meydana gelen aşınmalar ve geciken bakım koşulları olabilir.

ASTM C1252'ye göre sıkışmamış boşluk oranı deney yöntemi sonuçlarından Metod A ve B benzer eğilimler göstermektedir (Şekil 5.5). Yöntemle ilgili Bölüm 2'de verilen detaylarından da görüleceği üzere; Method B her bir elek aralığında ayrı ayrı yapılan ölçümleri esas aldığından, taneler arasında daha büyük boşluk hacimleri oluşmaktadır. Bu nedenle Metod B'de Metod A'ya göre daha yüksek boşluk değerleri elde edilmektedir. Yüksek oranda yassı ve uzun tane içeren agregalarda

yapılan deneylerde, özellikle ASTM C1252 Metod-B tek boyut aralıkları için deneylerde kullanılan huni ağzının tıkandığı ve akışın kesintiye uğradığı görülmüştür. Bu nedenle deneyler, standartta önerilenden çok daha fazla sayıda tekrarlanmak zorunda kalınmıştır. Sıkışmamış boşluk oranı deney yönteminin granülometri değişimlerinden büyük ölçüde etkilendiği Metod C sonuçlarındaki sapmalardan anlaşılmaktadır. Özellikle ocaklardan temin edilen kırmataş agregalarda ince malzeme oranı fazla olduğunda, boşluk oranları daha düşük mertebelerde olmaktadır. Bu nedenle, tane boyutu dağılımı ve ince malzeme oranına bağlı olarak, benzer kırma yöntemi kullanılan ve benzer mineralojik özellikteki agregalarda bile boşluk oranı değişimleri fazla olabilmektedir. Bu bakımdan deneysel çalışmalarda Metod A'nın tercih edilmesinde fayda vardır.

ASTM C1252 deney yöntemi metodlarının karşılaştırılması amacıyla çok sayıda yapılan ve tekrarlanan deneyler zaman alıcıdır. Birbiri ardına aynı grup agrega ile 3 kez tekrarlanan deneylerde sonuçlar en yakın tam sayıya yuvarlandığından genellikle yakın boşluk oranları elde edilmektedir. Bu nedenle deney yöntemi tekrarlanabilirlik açısından uygundur. Deney sonuçlarının, köşeli ve pürüzlü yüzey özelliklerindeki agregalar için yüksek olacağı beklense de, yassı ve uzun tane yüzdesinin fazla olduğuna da işaret edebilmektedirler. ABD'de Superpave araştırmacıları, sıkışmamış boşluk oranı yüksek bazı agregaların asfalt betonu uygulamalarında oluklanma açısından iyi performans vermediğini bildirmişlerdir. Sıkışmamış boşluk oranının yüksek olmasının nedeni, agreganın şekli ve yüzey pürüzlülüğü olmayıp, yüksek oranda yassı ve uzun tane içermesi de olabilir.

ASTM C1252 ve TS EN 933-6 deney yöntemlerinde agrega birim hacim ağırlığının (BHA) belirlenmesi gerekmektedir. Numune alımı, deney malzemelerinin yıkama, kurutma, eleme, BHA belirleme işlemleri ile deney öncesi işlemlerin çokluğu ve numune hazırlama işlemi zaman alıcıdır. Bu işlemler sırasında yapılacak hatalar deney sonuçları üzerinde etkili olacaktır. Deney sonuçlarının agrega tane boyut dağılımından etkilendiği görülmüştür. Standartta belirtilmemekle birlikte TS EN 933-6 yönteminde de granülometri düzenlemesinin gerekli olduğu görülmektedir. Bu hususlar, deneysel çalışmalardan kısa sürede sonuç alınmasını engelleyici faktörlerdir.

CAR test deney yönteminde, diğer yöntemlerden farklı olarak agrega BHA'larının belirlenmesine gerek yoktur. Agregalar ocaktan alındığı haldeki granülometride deneye tabi tutulabilir. Şekil 5.7'de görüldüğü üzere, standart granülometride ve ocaktan alındığı granülometride yapılan CAR test deneylerinde, sonuçlar arasında ihmal edilebilir farklar bulunmaktadır. CAR test deney yöntemi, agrega şekli, köşeliliği ve yüzey pürüzlülüğünü ifade etmekte, diğer dolaylı yöntemlere göre daha başarılıdır ve kısa sürede sonuç alınabilmektedir.

Mekanik (dolaylı) deney yöntemlerinden elde edilen bu veriler, Bölüm 6'de verilen çimento harcı ve beton deneylerinde istenen özellikte agrega seçiminde göz önünde bulundurulmuştur. Dolaylı yöntem sonuçları, Bölüm 5.4'de tanımlanan görüntü analiz yöntemlerinden elde edilen sonuçlarla da karşılaştırılacaktır.

5.3 İri Agreganın Geometrik Özelliklerinin Standart Deney Yöntemleri ile Belirlenmesi

İri agregalarda standart yöntemler ve görüntü analizleri ile geometrik özellikleri belirlenecek agregalarda geometrik çeşitliliğin sağlanması amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu agregalar Bölüm 6'da anlatılan Beton deneylerinde de kullanılacaktır. Bu nedenle Bölüm 5.1.1'de bahsedilen çalışmalarda tespit edilen uygun geometrik özellikteki agregalar örneklenip, ayırma, kırma, eleme gibi işlemlerle deneysel çalışmalarda kullanmak üzere hazırlanmışlardır. Agreganın geometrik çeşitliliğini sağlamak amacı ile yapılan çalışmalar 4 ana başlık altında incelenmiştir.

5.3.1 Kalker ve Bazalt Agregalarının Farklı Kırma Yöntemleri ile Kırılması

Deneysel çalışmalarda kullanılan agregalar, Dere Madencilik A.Ş. Kavaklıdere ocağından temin edilen Kireçtaşı (V-L38) ve yine Dere Madencilik Aliğa ocağından temin edilen Bazalt (V-L39) agregalarıdır. Ocaklarda patlatma suretiyle çıkarılan kayalar, kırma tesislerinde kırılıp belli boyutlara getirilerek sınıflandırılmaktadır.

Kireçtaşı ve bazalt agregaları ocakta darbeli tip primer ve sekonder kırıcılarla kırılmaktadır. Patlatma sonrasında balast üstü boyutta ($\geq 70\text{mm}$) alınan malzemeler, DEÜ Maden Mühendisliği Bölümü Kırma Laboratuvarı'nda çeneli ve merdaneli tip

kırıclarla (aşındırma ve basınç etkisi) kırılarak (Şekil 5.15-Şekil 5.16) uygun granülometriye getirilmek üzere elenmişlerdir (Şekil 5.17). Bu sayede karışım özelliklerinin granülometri değişiminden mümkün olduğunca az etkilenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 5.15 Çeneli Kırıclar



Şekil 5.16 Merdaneli Kırıcı

Şekil ve yüzey pürüzlülükleri dolaylı yöntemlerle belirlenecek agrega örnekleri uygun boyut aralıklarında elenmişler, ve 105 ± 5 °C'deki etüvde 24 saat kurutulmak sureti ile poşetlenerek deneylere hazır hale getirilmişlerdir (Şekil 5.18-5.19).



Şekil 5.17 Elek analizinde kullanılan eleme ünitesi



(a) No.5-No.200



(b) No.10. No.200

Şekil 5.18 TS EN 933-6 deneyinde kullanılan agregalar



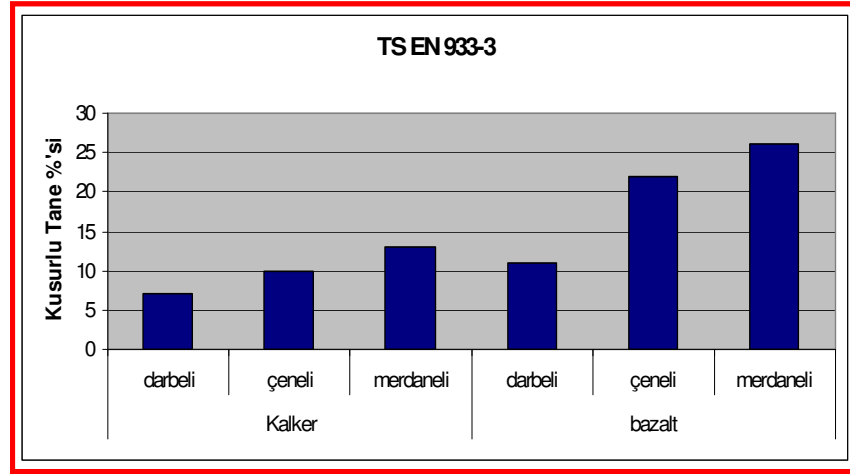
(a) Method-A



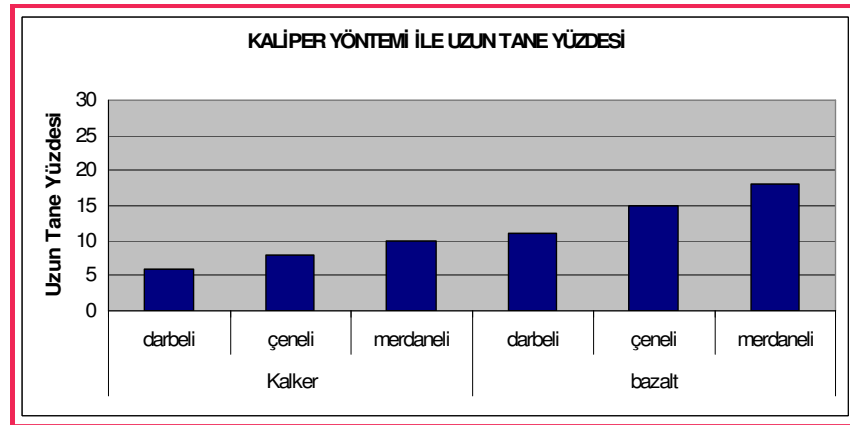
(b) Method-B

Şekil 5.19 ASTM C1252 deneyinde kullanılan agregalar,

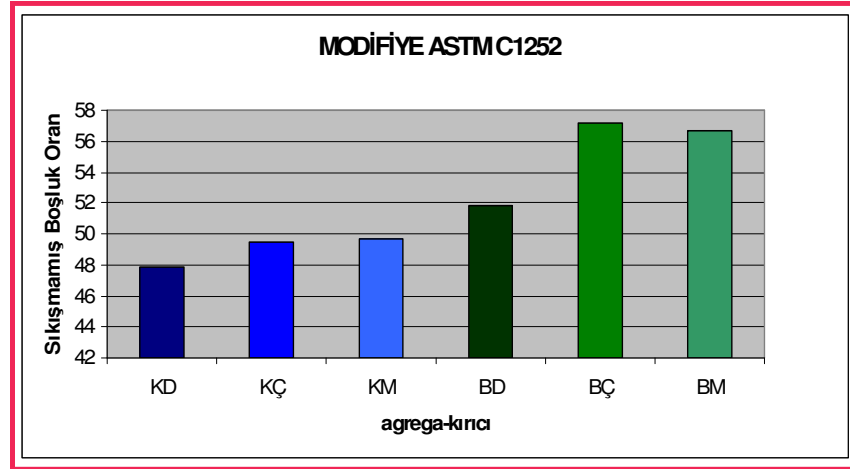
Agregaların standart yöntemlerle belirlenen geometrik özellikleri Şekil 5.20-24’de verilmiştir.



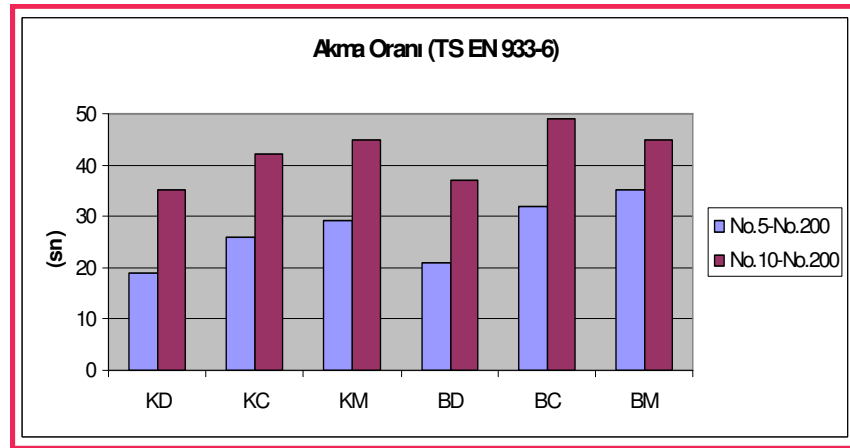
Şekil 5.20 Agreg a kökeni ve kırıcı tipine göre iri agrega kusurlu (yass ı ve uzun) tane yüzdeleri



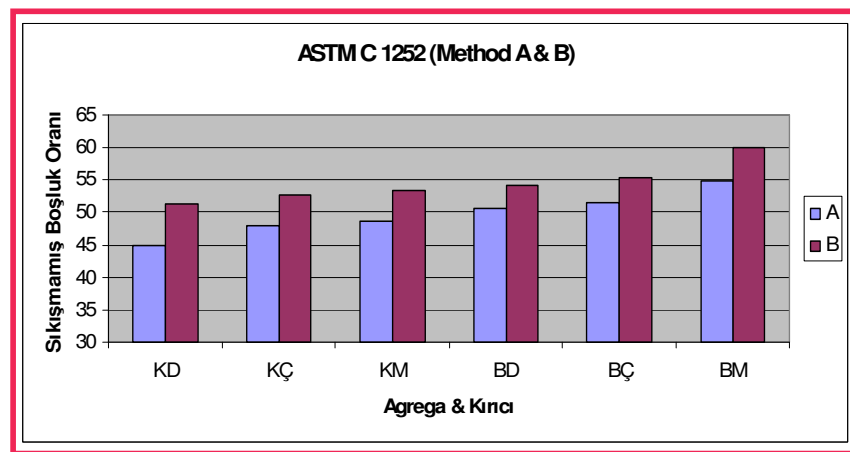
Şekil 5.21 Agreg a kökeni ve kırıcı tipine göre iri arega uzun tane yüzdeleri



Şekil 5.22 Agregat kökeni ve kırıcı tipine göre iri agregat sıkışmamış boşluk yüzdeleri



Şekil 5.23 Agregat kökeni ve kırıcı tipine göre ince agregat akış katsayıları



Şekil 5.24 Agregat kökeni ve kırıcı tipine göre ince agregat sıkışmamış boşluk yüzdeleri

Şekiller incelendiğinde, iri agregalar için darbeli (düşey milli) kırıcı ile kırılmış kireçtaşı agregasının kusurlu (yassı ve uzun) tane oranı % 7 iken çeneli kırıcıda bu oran % 10'a, merdaneli kırıcıda % 13'e çıkmıştır. Bazalt için bu değerler sırası ile %11, % 22 ve % 26'dır (Şekil 5.20). Kaliper yöntemi ile belirlenen uzun tane oranlarında da benzer bir eğilim görülmektedir (Şekil 5.21).

Dolaylı yöntemlerden akış katsayıları her agregaya boyut aralığı için, merdaneli ve çeneli kırıcılar için yüksek değerler alırken, darbeli kırıcılar için daha küçük değerlerdedir. Farklar akış katsayılarında, sıkışmamış boşluk oranı sonuçlarına göre daha belirgin olarak gözükmemektedir. Dolayısı ile akış katsayıları ve boşluk oranlarının agregaya şekli ve pürüzlülüğü yanında kusurlu tane yüzdesinden de etkilendiği söylenebilir.

Agrega seçiminde kullanılan 41 farklı ince agregaya örneğinde, darbeli kırıcılarla kırılan ince agregaların akış katsayıları çeneli kırıcılarla kırılan agregalara göre daha büyük değerler almışlardır. Merdaneli kırıcı ve darbeli kırıcılarla elde edilen agregaların akış katsayıları ise birbirlerine yakın değerlerdedir (Şekil 5.23). Ancak, aynı mineral agregaya cinsi için çeneli kırıcılarla kırılan agregaların akış katsayıları, darbeli kırıcılarla kırılan agregaların akış katsayılarına göre daha yüksek değerlerdedir. Agregaya şekli ve yüzey pürüzlülüğünün ölçüsü olarak tanımlanan TS EN 933-6 ve ASTM C1252 deney sonuçlarının yüksek değerlerinin daha çok kırılmış yüzey anlamına geldiği belirtilmiştir. Bununla birlikte, kusurlu agregaya yüzdesinin de dolaylı yöntemlerin sonuçlarını etkilediği görülmektedir.

Hudson (1999)'a göre agregaya taneleri arasındaki boşluk hacmi agregaya tanelerinin boyutları arasındaki orana bağlı olarak değişir. Agregaya yığınının boşluk içeriği tanelerin şekline, yüzey pürüzlülüğüne ve granülometriye bağlıdır. Deney sonuçları değerlendirildiğinde; kusurlu tane yüzdesinin düşük değerleri için boşluk yüzdeleri fazla değişmemekte, kusurlu tane yüzdesi %20'nin üzerine çıktığında boşluk oranları artmaktadır. Bu durum özellikle iri agregalarda daha belirgin olarak görülmektedir (Şekil 5.22).

TS EN 933-6'ya göre akış katsayıları, kusurlu tane yüzdesi arttıkça artmaktadır. Yüksek oranda kusurlu tane içeren agregalarda, özellikle No.5-No.200 boyut aralığı

için 16 mm'lik akma hunisi ağzında akışın zaman zaman kesintiye uğradığı ve deneyin başarısız olduğu görülmüştür. Bu yüzden deneyler, yöntemde istenenden daha fazla (>5) tekrarlanmış ve başarısız deneyler ortalamaya katılmamıştır.

5.3.2 Kusurlu Agregada Temini ve Özelliklerinin Belirlenmesi

Agregaların farklı kırıcılarla kırılması sonucunda en yüksek kusurlu tane oranı (%26) merdaneli kırıcıda kırılmış bazalt agregasında elde edilmiştir (Şekil 5.20). Bu nedenle deneylerde kullanmak üzere yüksek oranda kusurlu tane içeren agregaya gerekmektedir.

Bu amaçla yapılan araştırmalar sonucu Famerit A.Ş'den temin edilen Ören çakılı TS EN 933-3'e göre yüksek oranda (%90-92) kusurlu tane içermektedir. Ören çakılının fiziksel özellikleri Tablo 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.5 Ören çakılının fiziksel özellikleri

Özellik	İri Agregada		Deney Standardı
	5/15	15/25	
DYK Özgöl ağırlık	2,60	2,62	TS EN 1097-6
Su emme (%)	1,10	1,05	TS EN 1097-6
İnce malzeme (%)	-	-	TS 3527
Organik madde	yok	yok	TS 3673
Kusurlu malzeme yüzdesi	%90	%92	TS EN 933-3
Los Angeles aşınma %'si 100 devir, (%) 500 devir, (%)	7 30		TS EN 1097-2

5.3.3 Farklı Şekil Özelliklerinde Agregada Temini ve Özelliklerinin Belirlenmesi

Agregada tane şekli; köşeli, yuvarlak, yassı veya uzun olabilmektedir. Köşeli agregada taneleri, üzerlerinde keskin çıkıntılar bulunduran tanelerdir. Örneğin kırmataş agregaları genellikle köşelidir. TS EN 933-4 (TS 3814)'e göre, en büyük ve en küçük boyutu arasında 3 misli ve daha fazla fark olan agregada taneleri, şekilce kusurlu taneler olarak isimlendirilir.

Farklı agregada şekilleri ile yapılacak görüntü analizi ve beton deneyleri için iri agregada olarak Dalaman doğal agregası kullanılmıştır. Dalaman doğal agregası; köşeli, yuvarlak, yassı, uzun ve şekilsiz agregada tanelerini birlikte bünyesinde

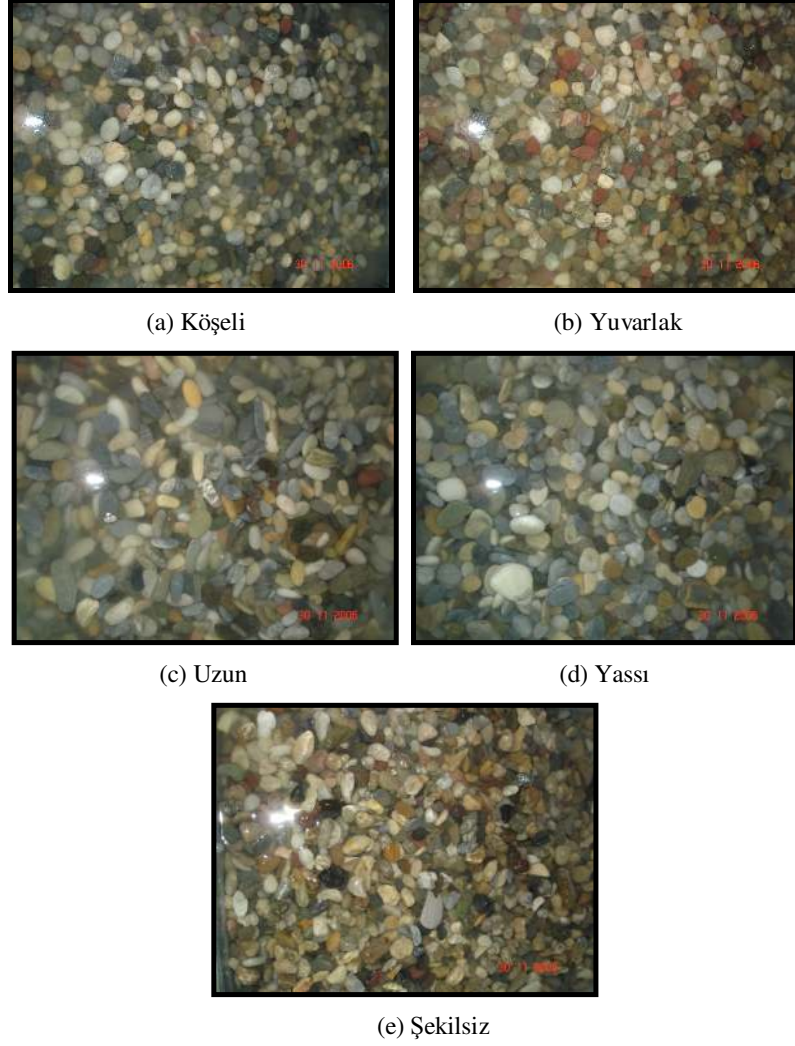
bulundurmaktadır. Değişik şekil özelliklerine sahip bu agreganın seçilme nedeni, yüzey pürüzlülükleri aynı fakat şekilleri farklı olan agregalarda yapılacak görüntü analizleri için, sınıflandırmada kullanılacak geometrik özniteliklerin belirlenmesidir.

Ayrıca bu agregalar çok sayıda örneklenmek sureti ile beton deneylerinde de kullanılacaktır. Bu şekilde mineraloji farklılığının beton dayanıma etkisi en aza indirilecektir. Ayrıca, agregalar tek bir kaynaktan temin edildiğinden, yüzey dokuları benzer özelliklerdedir. Bu sayede, diğer değişkenler sabit kalmak koşulu ile sadece iri agreganın şeklinin en uç durumları için beton performansına etkisi değerlendirilebilecektir.

Agregalar görsel olarak seçilmek sureti ile **Köşeli, Yuvarlak, Uzun (Torpil), Yassı ve Şekilsiz** olarak sınıflara ayrılmıştır (Şekil 5.25). Agregaların iri tane boyutlarında (4 mm - 25 mm) elenmek sureti ile ayrılmıştır.

Beton üretiminde kullanılacak olan farklı şekil özelliklerindeki iri agregaların modifiye ASTM C1252 (AASHTO TP56)- “İri agreganın tane şekli ve yüzey pürüzlülüğü ölçüsü” yöntemine göre sıkışmamış boşluk oranları, ASTM D3398’e göre sıkışmış boşluk oranları, birim ağırlıkları ve yoğunlukları belirlenmiştir.

Ahlich tarafından önerilen yöntem, ince agregalarda sıkışmamış boşluk oranının belirlenmesinde kullanılan ASTM C1252 ile benzerlik göstermektedir. Deneyler No.4-3/4" (4,75 mm- 19 mm) boyutlu agregalar üzerinde uygulanır. 102 mm (4-in.) ağız açıklığına sahip, 152 mm (6-in.) genişliğindeki deney aletinden 5000 g malzemenin 114 mm yükseklikten 152mmx154mm’lik silindir kap içerisine serbest akışa bırakılan agreganın numunesinin, kabın içinde şekline ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak değişecek olan sıkışmamış boşluk oranı esasına göre yapılır (Şekil 5.26). Daha yüksek sıkışmamış boşluk yüzdesi, daha yüksek köşelilik ve yüzey pürüzlülüğü anlamına gelir.



Şekil 5.25 Köşeli, Yuvarlak, Uzun, Yassı ve Şekilsiz agregalar



Şekil 5.26 İri agregalarda sıkışmamış boşluk oranı tayininde kullanılan deney aleti

Deney, agregaların; 19-12,5 mm, 12,5-9,5 mm ve 9,5-4,75 mm boyut aralıkları için yapılabildiği gibi, esasen deneyler ocaktan alındığı hali ile veya Tablo 5.6’da verilen 2 farklı granülometride yapılır. Sıkışmamış boşluk oranı ASTM C1252 yönteminde ifade edilen Denklem 2.14’e göre hesaplanır.

Tablo 5.6 Modifiye ASTM C1252 Granülometreleri

Elek Boyut Aralığı (mm)	Standart Granülometri-1 5000 g Malzeme (g)	Standart Granülometri-2 5000 g Malzeme (g)
19,0 – 12,5	1842	-
12,5 – 9,5	1106	1690
9,5 – 6,3	1210	1972
6,3 – 4,75	842	1338

Modifiye ASTM C1252 standart granülometri-1’e göre sıkışmamış boşluk oranları Tablo 5.7 ve Şekil 5.27’de verilmiştir. Tartımlarda 0,5 g hassasiyetinde tartı kullanılmıştır.

Agregaların birim hacim ağırlığı, (TS EN 1097-6)’e göre belirli bir hacimdeki kabı dolduran agreganın tanelerinin toplam ağırlığının kabın hacmine bölünmesi ile elde edilir (Denklem 5.1). Birim ağırlık tayininde kabın hacmi hem agreganın tanelerinin hacimlerini, hem de taneler arası boşlukları içermektedir.

$$\gamma_g = \frac{W_a}{V} \quad (5.1)$$

Burada,

γ_g = Agreganın birim hacim ağırlığı, gr/cm³

V = Agreganın ile dolu kabın hacmi

W_a = Kabı içerisinde dolduran agreganın ağırlığı’dır.

Taneler arası boşluk, Denklem 5.2 ye göre hesaplanabileceği gibi, agreganın dolu kabın boşluklarını dolduracak su hacminin belirlenmesi ile de bulunabilir.

$$p = \left[1 - \frac{\gamma_g (kg / m^3)}{1000 \times D} \right], \% \quad (5.2)$$

Belirli hacimdeki kabı dolduracak agreganın numunesinin miktarı, agreganın granülometrisinden, agregaların tane şeklinden, tanelerin mevcut nem durumundan ve tanelerin kap içerisinde gevşek veya sıkıştırılmış tarzda yerleştirilmiş olmasından etkilenir.

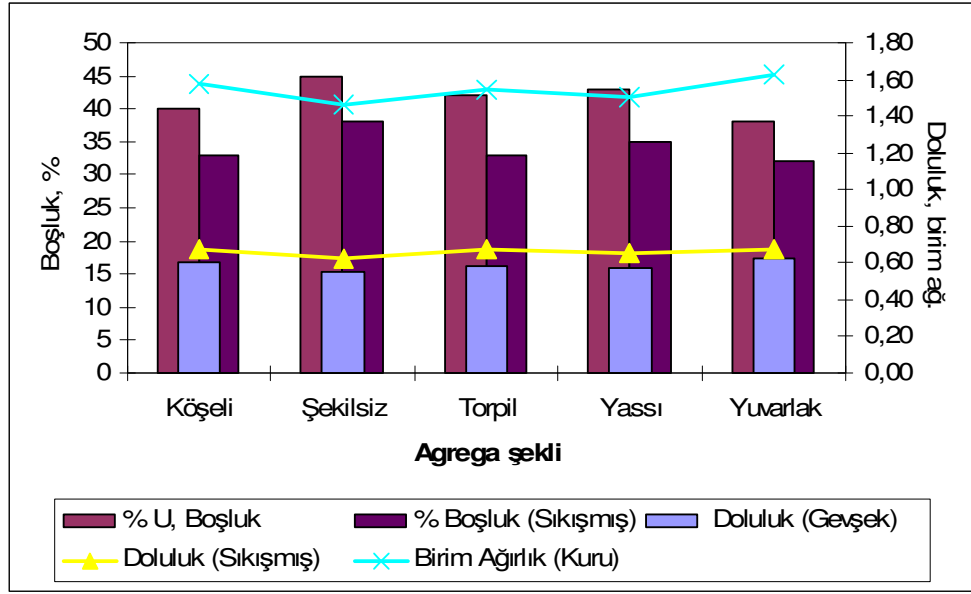
Birim hacim ağırlık, agreganın tanelerinin belirli bir hacim içerisinde bir araya gelerek ne kadar sıkı bir paket oluşturabileceğini işaret eder. Birim ağırlık değerinin yüksek olması, agreganın taneleri arasındaki boşluğun az olduğunu belirtir. Ayrıca birim ağırlık bilindiği takdirde, mevcut agreganın hacmi hesaplanabilir.

Standart granülometri-1'e göre yapılmış deney sonuçları Tablo 5.7'de görülmektedir.

Tablo 5.7 Şekil özelliklerine göre agregalarda boşluk, doluluk ve kuru birim hacim ağırlıklar

Agrega Şekli	AASHTO TP56	Doluluk (Gevşek)	% Boşluk (Sıkışmış)	Doluluk (Sıkışmış)	Kuru BHA, (t/m ³)
	% U, Boşluk				
Köşeli	40	0,60	33	0,67	1,57
Şekilsiz	45	0,55	38	0,62	1,46
Uzun	42	0,58	33	0,67	1,54
Yassı	43	0,57	35	0,65	1,50
Yuvarlak	38	0,62	32	0,68	1,63

Kusurlu agregaların gevşek ve sıkışmış boşluk yüzdesi fazladır (Şekil 5.27). Bu nedenle, karışımlarda kullanımı çimento hamuru ihtiyacını arttıracaktır. Kusurlu tanelerin boşluk yüzdesi fazla olduğundan, birim hacim ağırlığı da köşeli ve yuvarlak agregalara göre daha düşüktür (Tablo 5.7).



Şekil 5.27 Şekil özelliklerine göre agregalarda boşluk, doluluk ve kuru birim hacim ağırlık ilişkileri

5.3.4 Parlak ve Pürüzlü Yapay Agreg (Bilya) Temini ve Özelliklerinin Belirlenmesi

Agrega yüzey pürüzlülüğü, çimento hamuru ile agreg arasındaki bağı ve karışımın su ihtiyacını etkiler. Yüzey pürüzlülüğü, agreg tanesi ve çimento hamuru arasındaki bağ dayanımını etkilediğinden, betonun dayanım ve büzülme özellikleri üzerinde de etkili olduğu düşünülmektedir. Daha iyi mekanik bağ daha yüksek dayanım (Kaplan, 1959) ve daha düşük büzülme demektir.

Agrega pürüzlülüğü şekilden bağımsız olarak mevcut yöntemlerle belirlenmemektedir. Bu nedenle farklı mineral agregaların pürüzlülük değerleri karşılaştırılamamaktadır. Agregaların standart şekilleri olmadığından, sadece pürüzlülüğün beton performansına olan etkilerini belirlemek mümkün değildir. Bu nedenle karışımlarda yapay agreg olarak bilya kullanılmıştır.

Agrega pürüzlülüğünün taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisi değerlendirebilmek amacı ile çimento öğütme değirmenlerinde kullanılan çelik (parlak yüzeyli) ve döküm (pürüzlü yüzeyli) bilyalar AkEge Çim A.Ş. ve Çimentaş A.Ş.'den temin edilmiştir (Şekil 5.28). Bilyalar 25 mm, 19 mm ve 10 mm olmak üzere 3 farklı boyuttadır. Döküm bilyalar 1/3 saf Nitrik asit

(HNO₃)/hidroklorik asit (HCl) karışımında 3 gün bekletilmek sureti ile yüzey pürüzlülükleri arttırılmıştır.



Şekil 5.28 Bilyalar (a) Parlak yüzeyle (b) Pürüzlü

Standart granülometride yapılan deney sonuçları Tablo 5.8’de görülmektedir. Tartımlarda 0,5 g hassasiyetinde tartı kullanılmıştır.

Tablo 5.8 Parlak ve pürüzlü yüzey özellikli bilyalarda boşluk, doluluk ve kuru birim hacim ağırlıklar

Bilya Yüzeyle	% U, Boşluk	Doluluk (Gevşek)	% Boşluk (Sıkışmış)	Doluluk (Sıkışmış)	Kuru BHA (t/m ³)
Parlak	44	0,56	42	0,58	4,50
Pürüzlü	45	0,55	43	0,57	4,49

5.4 Görüntüleme Sistemlerinin Geliştirilmesi

Agrega geometrik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan mekanik dolaylı yöntemler, zaman alıcı ve sonuçları tartışmalı olabilecek yaklaşım yöntemleridir. Az miktarda malzeme ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar genellikle yığılı temsil etmez. Agregada geometrik özelliklerini matematiksel olarak kısa sürede karakterize etme ihtiyacı, bazı görüntü analiz yöntemlerinin bu amaçla kullanılmasını gündeme getirmiştir.

Beton agregalarında geometrik özelliklerin belirlenmesi ihtiyacı, başlıca iki nedene bağlı olarak açıklanabilir:

- Agregada şekil özellikleri ve yüzey pürüzlülükleri kayacın mineralojisine ve kırma yöntemine bağlı olarak değişebilir. İri agregalarda standart

yöntemlerle şekil indeksi ve yassılık indeksinin belirlenmesi, zaman alıcı ve bu nedenle de az sayıda agregatanesi üzerinde ölçüm esasına dayanmaktadır. Deney sonuçları operatöre bağlı olarak değişebilmektedir. Kusurlu taneler, uzun/kısa kenar oranının (boy/en) üçten büyük olma koşuluna göre belirlenmektedir. Agregatayüzey pürüzlülüğü ile ilgili standart bir ölçüm yöntemi bulunmamaktadır. İnce agregalarda ise dolaylı ölçüm yöntemleri uygulanmakta olup, şekil ve yüzey pürüzlülüğü akış katsayısı ya da sıkışmamış boşluk oranı ile ifade edilmektedir. Buna karşılık, bilgisayar ve dijital görüntüleme teknolojilerindeki gelişmeler, tane geometrik özelliklerinin matematiksel olarak karakterize edilmesini mümkün kılmaktadır.

- Agregatanelerinin şekli, nicel olarak kullanıldıkları karışımların performans özellikleri ile ilişkilidir. Bu özelliklerin ölçülebilir olması, taze betonda; işlenebilirlik ve hapsolmuş hava miktarı, sertleşmiş betonda; agregat-çimento hamuru aderansı, boşluk oranı ve geçirimsizlik, nihai olarak da betonun dayanımı ve kalıcılığı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi açısından gereklidir. Örneğin, köşeli ve pürüzlü agregalarla üretilen taze beton örnekleri daha düşük işlenebilirlik değerleri verir. Agregageometrik özelliklerinin optimizasyonu, beton karışımları için uygun agregaseçimi ve karışım oranlarının belirlenmesi açısından önemlidir. Agregatanelerinin geometrik özellikleri sayısal olarak karakterize edilebilirse, agregageometrisi-karışım performansı ilişkisi anlamlı bir şekilde açıklanabilir.

Çalışmanın amacı doğrultusunda, agregageometrik özelliklerini dijital yöntemlerle belirlemek üzere çeşitli görüntüleme düzenekleri oluşturulmuştur. İri ve ince agregageometrik düzensizliklerinin belirlenmesi amacı ile geliştirilen görüntüleme sistemlerinde, birbirine alternatif olabilecek 3 farklı yöntem denenmiştir. Sistemlerin tasarımı, agregalarda görüntü analizleri için en iyi başarıyı sağlamaya yöneliktir. Bu yöntemler:

- Aydınlatma panelli sistem,
- Lazer kameralı sistem,
- Sanal kameralı sistem (Aynalar) şeklinde adlandırılmıştır.

İki ve/veya üç boyutlu analiz yapımına imkan tanıyacak bu yöntemlerin geliştirilmesinde ortak amaç; hızlı, güvenilir ve ekonomik bir görüntü analiz yönteminin geliştirilmesidir. İri agregalarda agrega geometrik özelliklerinin belirlenebilmesi için bu yöntemlerin her biri kullanılabilir. İnce agregalarda ise görüntü analizi için, aydınlatmalı panel sisteminin daha uygun olduğu düşünülmektedir. İnce agregalarda en büyük tane boyutunun 4 mm olduğu göz önüne alındığında, tane yükseklik farklılıklarının ölçümü istisnalar dışında ihmal edilebilir düzeylerde dir.

İyi bir görüntü analizi yapabilmek için görüntü alımı özenli bir çalışmayı gerektirir. Agreg a görüntülerinin orijinal şek il özelliklerinden sapmış, gerçek şek li ifade etmeyen ve hatalar içeren görüntüler olmaması gerekmektedir. Görüntüleme düzeneklerinin oluşturulmasında; uygun aydınlatma şartlarının sağlanması, uygun görüntü çözünürlüğü seçimi, görüntü alma ve işleme adımları büyük bir dikkatle yapılmalıdır. Bu nedenle, çalışma kapsamında görüntüleme düzeneklerinin oluşturulması sırasında, literatürde karşılaşılan olumsuz durumlar da göz önünde bulundurulmuştur.

Agregaların geometrik düzensizlikleri göz önüne alındığında; öncelikle gölge oluşumuna imkan vermeyen, gürültüsüz bir görüntü temini için homojen aydınlatma koşullarını sağlamak üzere çalışmalar yapılmıştır. Görüntü özniteliklerinin analizi aşamasında gerekli olan yüksek hassasiyet için yüksek çözünürlüklü kameralar tercih edilmiştir. Hazırlanan görüntüleme sistemlerinde, farklı sınıflara ayrılan agregalar için görüntüleme işlemleri yapılmıştır. Görüntü analizlerinin ilk adımı olan görüntü alma işleminden sonra, görüntü işleme ve obje tanımlaması, görüntü özniteliklerinin ölçümü, sonuçların değerlendirilmesi ve istatistiksel analizler yapılmıştır.

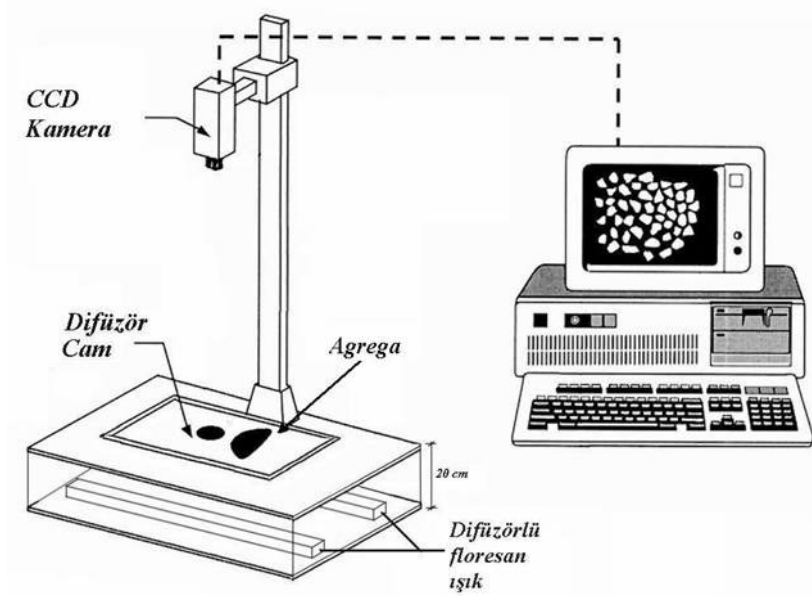
5.4.1 Aydınlatma Panelli Görüntüleme ve Analiz Sistemi

Yaygın olarak kullanılan görüntüleme sistemlerinde aydınlatma, örneklerin üstünden ya da her iki tarafından sağlanan ışık kaynakları ile yapılmaktadır (Şekil 5.29). Ancak bu durum, agregaların aydınlatma yönüne dik yüzeylerinde gölge oluşumuna neden olur. Agregaların sınırlarının belirlenmesi (edge detection) sırasında bu gölgeler, gri seviyelerine göre görüntü alanı içine dahil edilebilmektedir. Gölge oluşumları, yapılacak analiz sonuçları üzerinde etkili olabilecek hataları da beraberinde getirir.

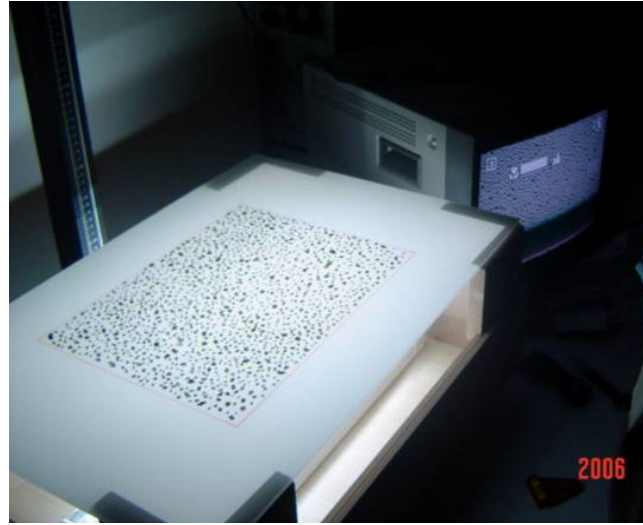


Şekil 5.29 Görüntüleme sistemi, (Imperial College London)

Uygun olmayan aydınlatma koşullarından kaynaklanan sorunları giderebilmek amacı ile görüntü alma işlemi için farklı bir aydınlatma paneli hazırlanmasına karar verilmiştir. Şekil 5.30 ve Şekil 5.31’de bu amaçla hazırlanan sistem görülmektedir. Aydınlatma alt yüzeyden yapıldığında agrega çevresinde gölge oluşmaz ve çekilen agrega görüntüleri gerçeğe en yakın şekil özelliklerini ifade eder. Görüntüden arka planın çıkarılması ve yapılandırma işlemleri için gerekli olan görüntü işleme adımları da böylelikle en aza inecektir. Bu durum işlem süresini kısalttığı gibi, görüntü işleme (özellik çıkarımı) aşamasında hatalı veri elde etme olasılığını da azaltır. Agregalar üst üste binmeyecek şekilde ayrı olarak bu panel üzerine yerleştirilirse, Bölüm 3’de sözü edilen tane segmentasyon adımlarına da gerek kalmayacaktır. Tüm bu işlemlerde amaç, görüntü işleme sırasında doğabilecek veri kayıplarının önlenmesidir.



Şekil 5.30 Aydınlatma panelli görüntüleme sistemi



Şekil 5.31 Aydınlatma paneli

Aydınlatma panelinin, görüntü alanının her bölgesinde eşit aydınlanma koşulunu sağlaması, yapılacak görüntü işleme adımlarının daha da azalmasını sağlar. Bu nedenle hazırlanan görüntüleme düzeneğinde aydınlatma panelinin her santimetre karesinde eşit aydınlatma sağlayacak özel bir cam kullanılmıştır. Bu cam, bir yüzü katmanlar halinde elektrolit ve ısıt işlemler kullanılarak silikon, gümüş ve nikel kaplanmış, homojen aydınlatma sağlamak amacı ile geliştirilen patentli bir üründür (Patent Cooperation Treaty, WO 00/10797, 1999).

Aydınlatma paneli 40 x 60 cm ebatlarında olup, aydınlatma difüzörlü camdan 20 cm aşağıya yerleştirilen 2 adet difüzörlü 24 W flüoresan ışık kaynağı ile sağlanmıştır (Şekil 5.31).

Görüntülerin alınmasında 5,2 Megapiksel çözünürlüklü otomatik odaklamalı CCD (Charged-Coupled Device) Nikon kamera kullanılmıştır. Kamera, bir sehpa ya bağlı ölçekli ve yükseklik ayarlı uzatma aparatına monte edilmiştir (Şekil 5.32 a). Görüntüleme alanı kameranın panelden olan yüksekliğine ve çözünürlüğe bağlı olarak 29,7x18,5 cm olarak belirlenmiştir. Görüntüler bilgisayara çevre ürünleri bağlanmasında kullanılan yüksek veri aktarım hızında arayüz bağlantısı (firewire, IEEE 1394) kullanılarak monitörde gerçek zamanlı görüntülenebilmektedir. Bu sayede çekim alanı kontrol edilebilmekte ve çekim özellikleri belirlenebilmektedir (Şekil 5.32 b). Analog/Dijital 24 bit çözünürlüklü sayısallaştırıcı görüntülerin dijital olarak bilgisayar belleğine aktarılmasında kullanılmıştır. Görüntü sayısallaştırıcılar (Frame grabber), CCD kameradan gelen analog video sinyali işler ve onu bilgisayarın dijital veri diline çevirir. Görüntü analizlerinde kullanılan bilgisayar; 1,6 Ghz İşlemcili, 512 Mb Ram 2048x1536 çözünürlük destekli ATI mobility radeon 9700 görüntü birimi ve 3D efektli TFT ekrandan oluşmaktadır.



(a) Görüntüleme paneli



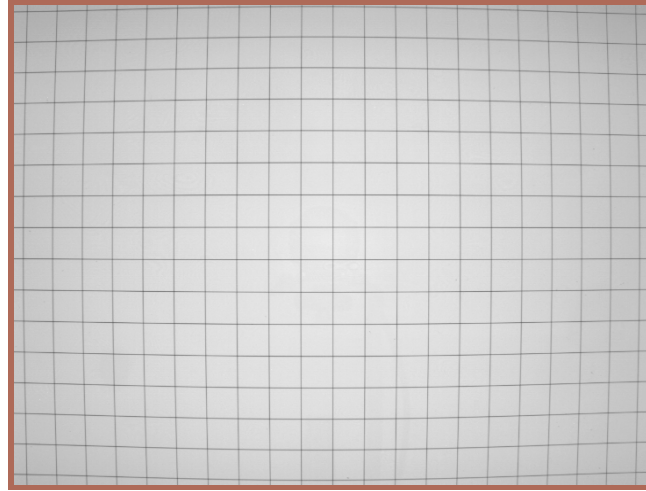
(b) Kontrol monitörü

Şekil 5.32 Aydınlatma panelli görüntüleme sistemi

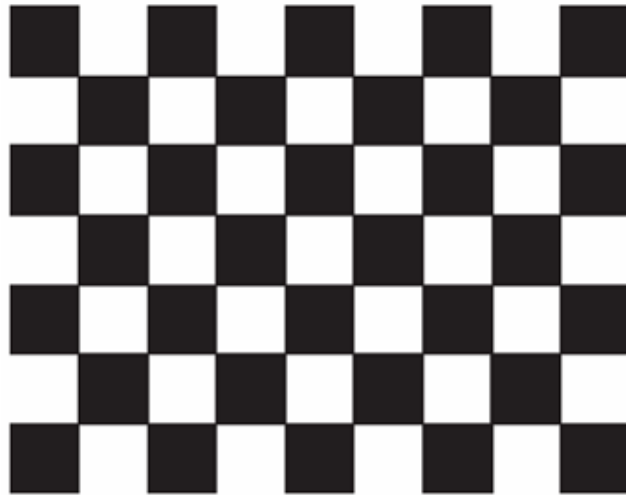
5.4.1.1 Görüntü Kalibrasyonu

Standart CCD kamera lensleri kullanıldığında, görüntü alanının merkezi ile kenarları arasında lensin eğriliğinden kaynaklanan bir miktar doğrultu hatası olur.

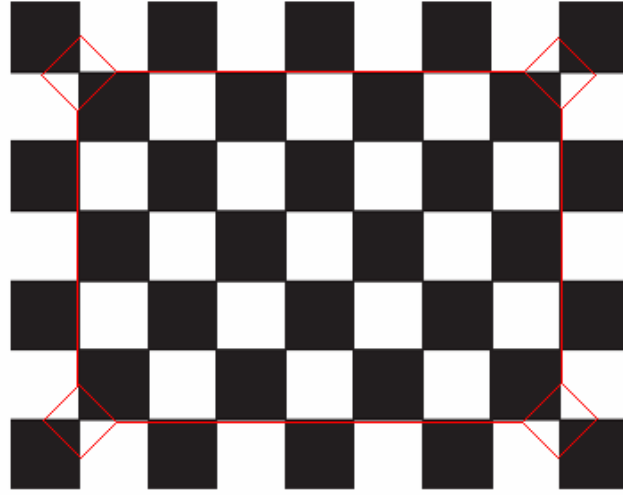
Bunun anlamı, bir görüntü alanında merkezden kenarlara doğru gidildikçe nesnelerin gerçek uzunluk değerlerinin bir miktar değişmesi demektir. Şekil 5.33'da yakın çekimle pozlanan görüntüde de görüldüğü gibi, yatay ve dikey çizgiler doğrusal formdan uzaklaşmaktadır. Yakın (makro) çekimlerde daha önemli hale gelen bu problem, görüntülenecek nesnelerin kamera lensinden olan mesafesi arttıkça azalır. Bu amaçla, kamera görüntüleme panelinden oldukça yükseğe konumlandırılmıştır. Ayrıca, agregalarda görüntü alma işlemine geçmeden önce uygun lens seçimi (40,5mm+5 Sania) ve çok boyutlu kalibrasyon yazılımı ile bu problem giderilmiştir. Çekilen görüntülerdeki boyutların doğruluğu Şekil 5.34'de görülen kalibrasyon cetveli yardımı ile kontrol edilmiştir (Şekil 5.35).



Şekil 5.33 Kamera merceğinden kaynaklanan eğrilik



Şekil 5.34 Kalibrasyon cetveli



Şekil 5.35 Kalibrasyon cetveli yardımı ile boyut kontrolü

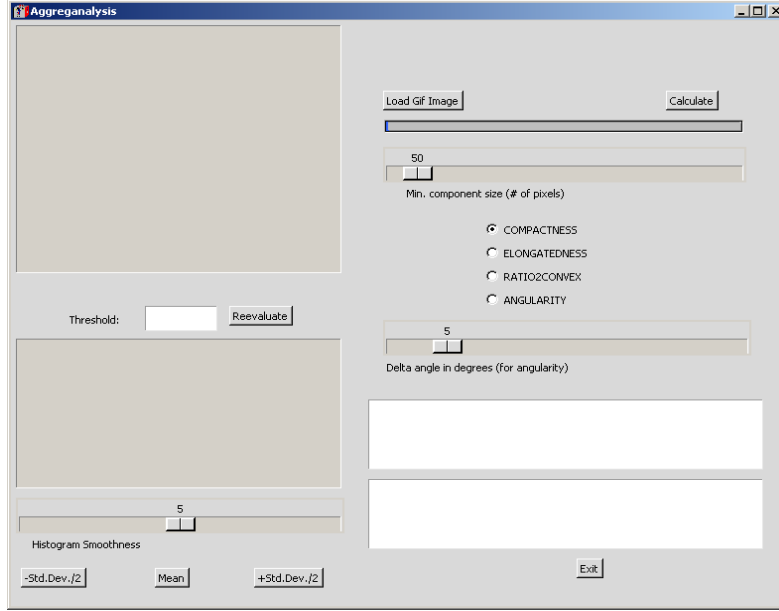
Çekimler sırasında el dokunuşlarından kaynaklanacak titreşimleri bertaraf etmek için, sisteme cep bilgisayarı (Palm) adapte edilmiştir. Bu sayede görüntüleme işlemleri uzaktan kumanda ile yapılmıştır. Kurulan düzenekte görüntüler, aydınlatma koşullarının tane kenar piksellerinde meydana getirebileceği kayıpların kontrolü amacıyla üç farklı pozlama hızında çekilmiştir.

Deneme çekimleri ve analizler, şekil açısından birbirinden çok farklı özelliklerde agrega örnekleri ile yapılmıştır.

5.4.1.2 Görüntü Analiz Programı ve Analizler

Agregalarda görüntü işleme ve analizi çalışmalarına mesnet teşkil edecek bu çalışma için geliştirilen ve AGGREGANALYSIS adını verdiğimiz görüntü analizi programı C++ programlama dilinde yazılmıştır (Ek. A). Görüntüler, kullanım kolaylığı açısından hazırlanan ve Şekil 5.36'de görülen arayüz sayesinde kolayca yapılabilir. Arayüz sayesinde kullanıcıya bağlı olarak yapılabilecek hatalar da giderilmiş olacaktır. Temel bilgisayar bilgisine sahip herkes bu programı rahatlıkla kullanabilir. Görüntü analiz programında, Chang, Chen, ve Lu (2004) tarafından önerilen, kenar tarama yöntemi ile çizgisel bileşenlerin etiketlenmesi algoritması kullanılmıştır. Bu yöntemin en önemli avantajı, görüntü işleme aşamasında dijital görüntüdeki tüm piksellerin değerlendirilmesi yerine, obje kenarlarına komşu piksellerin öncelikle değerlendirilerek, bu piksellere komşu

benzer gri seviyelerdeki piksellerin izlenmesi ve tane sınırlarının belirlenmesi (edge detection) işlemidir. Böylelikle veri işleme süre en aza iner.



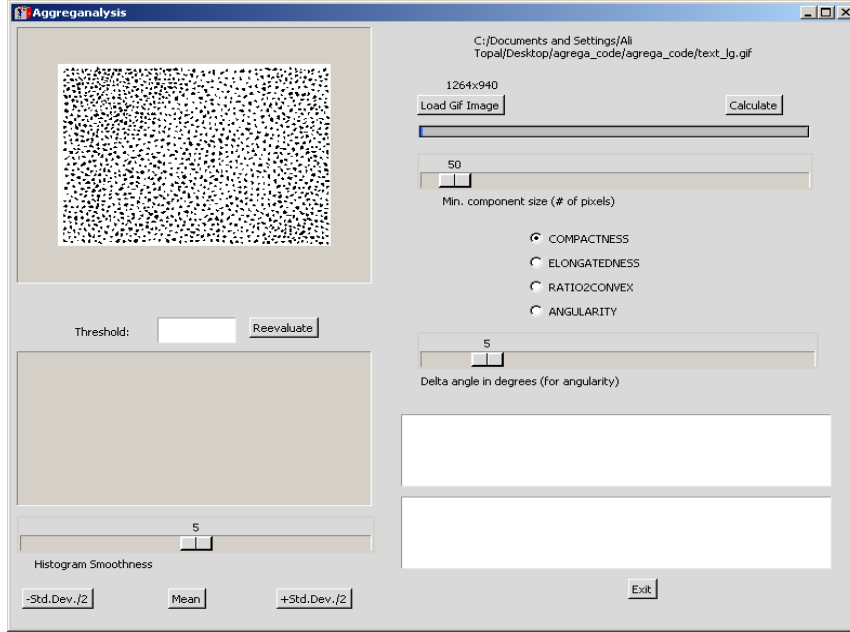
Şekil 5.36 Aggreganalysis programı arayüzü

Hazırlanan arayüz ile agregaların şekil ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak değişen 4 farklı özniteliği incelenebilmektedir. Bu öznitelikler, agrega geometrik özellikleri ile ilgili birçok öznitelik içinde birbirleri ile doğrusal ilişkisi olmadığı belirlenenler arasından seçilmiştir. Yuvarlaklık (compactness), uzunluk veya dış merkezlik (elongatedness), konkavlık (ratio2convex) ve köşelilik (angularity) olarak isimlendirilen öznitelikler programa entegre edilmiştir. Geometrik özniteliklerin sayısı, istenildiğinde programa yapılacak ilavelerle daha da arttırılabilir.

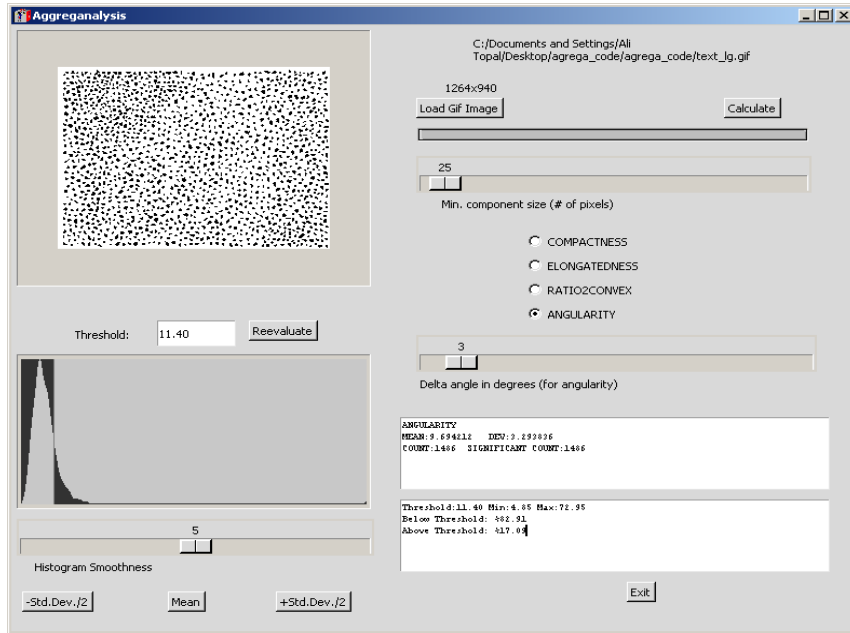
Arayüzün kullanım aşamaları aşağıda özetlendiği gibidir:

- GIF (Graphics Interchange Format) formatında kaydedilmiş 0/1 görüntülerin sisteme yüklenmesi (Şekil 5.37),
- Analizi yapılacak en küçük tane boyutunun piksel cinsinden seçilmesi,
- Belirlenmesi istenilen geometrik özniteliğinin seçilmesi,

- Eğer köşellilik (angularity) belirlenmek isteniyorsa delta açısının belirlenmesi (Şekil 5.38),
- Görüntü analizi
- Agrega tanelerinin şekil özniteliklerini esas alan histogramın çizilmesi
- İstatistiksel sonuçların ve grafiklerin ayrı dosyalar halinde kaydedilmesi.



Şekil 5.37 GIF formatında 0/1 (binary) görüntülerin sisteme yüklenmesi



Şekil 5.38 En küçük tane boyutu, öznitelik ve θ açısının seçilmesi–Görüntü analizi

GIF formatındaki 0/1 görüntü “Load GIF Image” komutu ile arayüze yüklenerek sisteme tanıtılır. Görüntüdeki olası gürültülerin (veya çok küçük boyutlu agrega tanelerinin) analiz hesaplarına dahil edilmemesi için, analiz edilmesi istenen en küçük tane boyutu piksel cinsinden seçilebilir. Örnek analizde; Şekil 5.38’deki ekran görüntüsünden de görüldüğü gibi, en küçük piksel sayısı 25 seçilmiştir. Köşeliliğin (angularity) belirlenmesinde tane çevresi 3° ’lik ($360^\circ/3$) çevritle taranmıştır. Bu açı istenilen büyüklükte seçilebilir. Analizden elde edilen istatistikler ekranın sağ altındaki kutucuklarda görülebilir. İlk kutucukta; şekil özniteliğinin ortalama değeri, bu değerden ortalama sapmalar, tane sayısı ve analiz edilen tane sayısı görülmektedir. İkinci kutucukta şekil özniteliğinin kabul sınırı (Threshold-eşik) değeri, şekil özniteliğinin en küçük ve en büyük değeri, kabul sınırlarının altında ve üstünde kalan tane yüzdeleri görülmektedir. Arayüzün sol tarafında, görüntü analizinin histogramı görülmektedir. Histogram, standart sapmayı esas alacak şekilde çizilebilmekte ($\pm$ standart sapma/2) ve eğrisellik düzenlenebilmektedir. Analiz işlemi sonunda görüntü alanındaki agrega tanelerinin geometrik özellikleri ve sonuçlara ait istatistiksel bilgiler ayrı ayrı wordpad dosyalarında metin formatında kaydedilmektedir. Bu özniteliklere ait histogramlar da yine resim formatında (.pgm) kaydedilmektedir.

Yuvarlaklık ve Konkavlık tanımları daha önce **Bölüm 2.1.1 “Tane Şekli Sınıflaması”** başlığı altında yapılmıştı. **Yuvarlaklık**, tanenin 2.boyutta dairesellikten ne kadar uzaklaştığının ölçüsüdür. Tanenin formu ile ilgilidir ve bütünü temsil eder “1” tam değeri daireyi ifade eder. Yuvarlaklık ölçüsünün C++ programla dilinde yazılan kodu Tablo 5.9’de verilmiştir. **Konkavlık**, tane şekli ve yüzey pürüzlülüğünün ölçüsüdür. Konkav alan oranının C++ programla dilindeki kodu ise Tablo 5.10 a-b’de verilmiştir.:

Bu şekil tanımlamalarından başka agregalarda özellikle uzun ve kusurlu tanelerin bulunmasında faydalı olacağı düşünülen “Dış merkezlik” ve “Köşelilik” tanımları yapılmıştır. Programda hesaplanan şekil özelliklerinin matematiksel tanımları ve C++ kodları aşağıda tanımlandığı gibidir:

Tablo 5.9 Yuvarlaklık ölçüsünün C++ kodu

```

compactness for kth object:

find_center(imgc,obj_width+1,obj_height+1,&center_j,&center_i);
    }
    perimeters[k]=find_perimeter(imgc,obj_width+1,obj_height+1);
    area+=areas[k];
    per+=perimeters[k];

if(1==feature){
    compactness[k]= perimeters[k]*perimeters[k]*1.0/(areas[k]*4*M_PI);
    if(compactness[k]>max_compact) max_compact=compactness[k];
    if(compactness[k]<min_compact) min_compact=compactness[k];
}

```

Tablo 5.10 (a) Konkavlık ölçüsünün C++ kodu

```

> ///// convexity for kth object:
> ratioconvex[k]=convexperimeters[k]/perimeters[k]
float find_concavityratios(unsigned char **img,int width,int height,float center_j,float
center_i,float area)
{
    int i,j,k,l,m,n,flag=1;
    unsigned long newcount=0;
    unsigned char check,**img1,**img2;
    img1=alloc_img(width,height);
    img2=alloc_img(width,height);
    //    img_to_pgm_file(img,"sil.pgm",width,height);
    //    show_pgm_file("sil.pgm");

    for(i=0;i<height;i++) for(j=0;j<width;j++) {img1[i][j]=img[i][j]; img2[i][j]=img[i][j];}
    for(i=0;i<height;i++) for(j=0;j<width;j++)
    if(img1[i][j]==0)
    {
        for(k=0;k<height;k++) for(l=0;l<width;l++)
        if(img1[k][l]==0 && (k!=i || l!=j))
        {
            for(m=0;m<height;m++) for(n=0;n<width;n++)
            if(img2[m][n]!=0 && (m!=i || n!=j) && (m!=k || n!=l))
            if(PointInTriangleYesNo((float)n,(float)m,(float)l,(float)k,(float)j,(float)i,center_j,center_i))
            {
                img2[m][n]=0;
            }
        }
        img1[i][j]=128;
    }
    for(i=0;i<height;i++) for(j=0;j<width;j++) {if (img2[i][j]==0) newcount++;}
    //    img_to_pgm_file(img2,"sil.pgm",width,height);
    //    show_pgm_file("sil.pgm");
    free_img(img1);
    free_img(img2);
    return((float)newcount/area);
}

```

Tablo 5.10 (b) Konkavlık ölçüsünün C++ kodu

```

int PointInTriangleYesNo(float p1j,float p1i,float aj,float ai,float bj,float bi, float cj,float ci)
{
    /* Based on http://www.blackpawn.com/texts/pointinpoly/default.html */
    if(fabs(ai*(bj-cj)+bi*(cj-aj)+ci*(aj-bj))<0.1) return(0);
    /* Collinearity check from http://mathworld.wolfram.com/Collinear.html*/
    if(PointsSameSideYesNo(p1j,p1i,aj,ai,bj,bi,cj,ci) &&
        PointsSameSideYesNo(p1j,p1i,bj,bi,aj,ai,cj,ci) &&
        PointsSameSideYesNo(p1j,p1i,cj,ci,aj,ai,bj,bi) ) return(1);
    else return(0);
}

int PointsSameSideYesNo(float p1j,float p1i,float p2j,float p2i,float aj,float ai,float bj,float bi)
{
    if (x*y>=0) return(1);
    else return (0);
}

float find_concavityratios45deg(unsigned char **img,int width,int height)
{
    int i,j,flag=1,count;
    unsigned char check,**img1,**img2;
    img1=alloc_img(width,height);
    img2=alloc_img(width,height);
    img_to_pgm_file(img,"sil.pgm",width,height);
    show_pgm_file("sil.pgm");
    for(i=0;i<height;i++) for(j=0;j<width;j++) {img1[i][j]=img[i][j]; img2[i][j]=img[i][j]; }
    while (flag==1)
    {
        count=0;
        for(i=0;i<height;i++) for(j=0;j<width;j++) {
            check=0;
            if(i>0 && j>0) if(img1[i-1][j-1]==0) check=check|(1<<0);
            if(i>0) if(img1[i-1][j]==0) check=check|(1<<1);
            if(i>0 && j<width-1) if(img1[i-1][j+1]==0) check=check|(1<<2);
            if(j<width-1) if(img1[i][j+1]==0) check=check|(1<<3);
            if(i<height-1 && j<width-1) if(img1[i+1][j+1]==0) check=check|(1<<4);
            if(i<height-1) if(img1[i+1][j]==0) check=check|(1<<5);
            if(i<height-1 && j>0) if(img1[i+1][j-1]==0) check=check|(1<<6);
            if(j>0) if(img1[i][j-1]==0) check=check|(1<<7);

            if(img2[i][j]!=0)
            if((check&240)==240||(check&120)==120||(check&60)==60 ||(check&30)==30||
                (check&15)==15 ||(check&135)==135||(check&195)==195||(check&225)==225)
            { img2[i][j]=0; count+=1; }

        }
        for(i=0;i<height;i++) for(j=0;j<width;j++) img1[i][j]=img2[i][j];
        if(count==0) flag=0;
    }

    img_to_pgm_file(img1,"sil.pgm",width,height);
    show_pgm_file("sil.pgm");

    free_img(img1);
    free_img(img2);
}

```

Dış merkezlik: Taneyi çevreleyen elipsin 2. dereceden moment bölgeleridir. 2x2 moment matrisinin özdeğerleri matematiksel olarak λ_1 ve λ_2 cinsinden eksantirisite $((\lambda_1 - \lambda_2) / (\lambda_1 + \lambda_2))^2$ şekilde ifade edildiğinden dış merkezlik Denklem 5.3'deki gibi tanımlanır (Sühling, Arigovindan ve Hunziker, 2004).

$$\text{Dış merkezlik} = \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \right)^2 = \frac{(\mu_{2,0} - \mu_{0,2})^2 + 4\mu_{1,1}^2}{(\mu_{2,0} + \mu_{0,2})^2} \quad (5.3)$$

Burada;

$$\mu_{11} = (1/N) + ((r-rc) * (c-cc))$$

$$\mu_{20} = (1/N) + ((r-rc)^2)$$

$$\mu_{02} = (1/N) + ((c-cc)^2)$$

μ ; merkezi (central) momentler, (rc,rc); agrega tanesinin merkez koordinatlarıdır.

Dış merkezlik 0 ila 1 arasında değerler alır. Bir objenin yassı/uzun olup olmadığı hakkında bilgi verir. Dış merkezlik ölçüsü görüntünün bölgesel enerjisinden bağımsızdır ve formu temsil eder. Bu nedenle yuvarlaklık ve kısa/uzun kenar oranlarının karşılaştırmalar için daha uygundur. Dış merkezliğin C++ programlama dilindeki kodu Tablo 5.11'de verilmiştir:

Köşelilik, agrega tanesinin formundan daha küçük ölçekte değerlendirilen yüzey geometrisidir. Bir agrega tanesinin köşeliliği; tane kenar ve köşelerinin ortalama eğrisellik yarıçaplarının tane içine çizilebilen en büyük dairenin yarıçapına oranı olarak tanımlanmaktadır (Popovics, 1992; Kwan ve Mora, 2001). Ancak çalışmada köşelilik için eğrisellik değerleri kullanılmamıştır. Bunun nedeni, özellikle ince agrega tane şekilleri çok küçük olduğundan, tane köşelerinin eğrisellik değerini kullanmanın hatalı sonuçlara neden olacağıdır. Dijital görüntülerin piksellerden (küçük kareler) oluştuğunu göz önüne aldığımızda, çözünürlük azaldıkça tane köşelerinin eğriselliğinden söz edilemez. İnce bir agrega tanesi için köşeliliğin tane

çevresinde 360°'lik her bir açı değeri için hesaplanacağı göz önüne alındığında, tane yüzeyindeki girinti çıkıntıların pikseller nedeni ile çok fazla görüneceği durumlarda çok hatalı sonuçlar verecektir. Bu nedenle, köşelilik değeri için yeni bir fonksiyon tanımlanmıştır.

Tablo 5.11 Dış merkezlik ölçüsünün C++ kodu

```

///// eccentricity -- function

float find_eccentricity(unsigned char **img, int width, int
height,float center_j,float center_i) { int i,j; float
m11,m20,m02,val,denom,term1,term2;
long count=0,m11count=0,m20count=0,m02count=0;

for(i=0;i<height;i++)
for(j=0;j<width;j++)
if(img[i][j]==0)
{
count++;
m11count+=(i-center_i)*(j-center_j);
m20count+=pow((i-center_i),2);
m02count+=pow((j-center_j),2);
}

if(count ==0) return(0);

m11=(float)m11count/count;
m20=(float)m20count/count;
m02=(float)m02count/count;

term1=m20+m02;

term2=sqrt(pow((m20-m02),2)+4*pow(m11,2));
elong= [(m20-m02)^2+4*m11^2]/(m20+m02)

//printf("%d %d %d %.6f %.6f %.6f %.6f %.6f %.2f
%.2f\n",count,width,height,m11,m20,m02,term1,term2,center_i,center_j);

denom=(float)(term1);
if (denom!=0) val=(term2/term1);
else val=1;
return(val);
}

```

Köşelilik fonksiyonu; şeklin çevrit (sınır) görüntüsü üzerindeki tüm piksellerin belirli bir referansa göre açısı hesaplanması, 0-359 derece aralığında bulunan açı için çevritin merkeze uzaklığı (R_{θ}) kaydedilmesi esasına dayanır. Böylece 360 elemanlı bir dizi (array) oluşur. Tanenin çok küçük olduğu durumlarda bazı açılara atama yapılmayacağı için bunlar için bulunacak uzaklık değeri hatalı olarak sıfır

görünecektir. Bu durumu ortadan kaldırmak için en yakın komşudan alınan değerlerle ($R_{\theta+\Delta}$) enterpolasyon yapılması öngörülmüştür. Köşelilik değeri bu dizi üzerinden hesaplanmıştır. Köşeliliğin C++ kodu aşağıdaki Tablo 5.12’de verilmiştir.

$$\text{Köşelilik} = \sum_{\theta=1}^{360} \frac{|R_{\theta} - R_{\theta+\Delta}|}{R_{\theta}} \quad (5.2)$$

Köşelilik tanenin formundan çok yüzey özellikleri ile ilgilidir. Köşelilik tayininde kullanılan açı derecesi azaldıkça, köşelilik ölçüsünden pürüzlülüğe geçilir. Görüntünün çözünürlüğü arttıkça da pürüzlülük tayini daha hassas bir biçimde yapılabilir.

Aydınlatma panelinde farklı sınıflarda çok sayıda ince ve iri agregatörünün görüntüleri alınmıştır. Görüntü alımı aşamasında aydınlatma paneli ile uygun aydınlanma koşulları sağlandığından, görüntü işleme adımları sadece agregada piksel kaybına neden olmayacak iyileştirme işlemleridir. Agregatör görüntülerinin arka fondan ayrılması için yapılan işlemler sırasıyla Bölüm 5.4.2.2’de tanımlanan; parlaklık/karşıtlık, boşluk doldurma, arka planın çıkarılması (background subtraction), sınır bulma ve eşikleme ile 0/1 (binary) işlemleridir. İşlenerek 0/1 (binary) formatına dönüştürülen görüntüler GIF (Graphics Interchange Format) olarak kaydedilir. Görüntülerin işlenmesi ile sınırları belirlenen agregatör tanelerinin boyutları ve geometrik özellikleri ölçülebilir.

Aydınlatma paneli sisteminde tek kamera ile yapılan görüntüleme işlemleri ile agregatörlerin ancak 2 boyutlu şekil özellikleri elde edilebilir. Bu nedenle sistem ince agregatörlerde görüntü analizleri için uygun olmasına rağmen, iri agregatörlerde yükseklik ölçümleri özellikle yassı tanelerin belirlenmesi açısından gereklidir. Görüntü analizlerinde 3. boyuta ait derinlik bilgilerinin temini amacıyla, insan gözünün derinlik algılamasına benzer bir şekilde, iki farklı açıdan görüntüleme yapılarak nesnelerin derinlik bilgileri elde edilmeye çalışılmıştır.

Tablo 5.12 Köşelilik ölçüsünün C++ kodu

```

(sum ( |R_theta-R_(theta+delta)| /R_theta ))

sum (abs(uzaklık(theta)-uzaklık(theta+delta)))
-----
uzaklık(theta)

float find_angularity(unsigned char **img,int width,int height,float center_j,float center_i,
                      float area,int delta_ang)
{
/* img here is the 1 pixel wide border image */ int i,j,flag=1,count,theta_int,temp; float
theta_indeg,angle_hist[360],angle_hist_interpolated[360],radius,tot,maxrad=0,angularity,angularit
y_sum=0;
unsigned char **img1;

for(i=0;i<360;i++) {
angle_hist[i]=0;angle_hist_interpolated[i]=0;}

for(i=0;i<height;i++)
for(j=0;j<width;j++)
if(img[i][j]==0) /* foreground pixel */
{
radius=sqrt(pow((i-center_i),2)+pow((j-center_j),2));
if (maxrad<radius) maxrad=radius;
theta_indeg=(atan2((i-center_i),(j-center_j))+M_PI)*180.0/M_PI;
theta_int=(int)theta_indeg;
if(theta_int<360 && theta_int>=0) {
if(angle_hist[theta_int]<1)
angle_hist[theta_int]=radius;
else
angle_hist[theta_int]=0.5*(radius+angle_hist[theta_int]);
}
}
for(i=0;i<360;i++) {
angle_hist_interpolated[i]=angle_hist[i];}

for(i=0;i<360;i++) { flag=1;j=i;
if (angle_hist_interpolated[i]==0)
while (flag==1) {
j=(j+1)%360;
if (angle_hist[j]!=0) {
angle_hist_interpolated[i]=angle_hist[j]; flag=0; }
}
}
for(i=0;i<360;i++) {
if(0!=angle_hist_interpolated[i])
angularity_sum+=
fabs(angle_hist_interpolated[i]-
angle_hist_interpolated[(i+delta_ang)%360])/angle_hist_interpolated[i];}

angularity=angularity_sum;

return (angularity);

```

5.4.1.3 Aydınlatma Panelinde Stereo Yöntemle Görüntü Analizi

İnsan gözünün çevresindeki nesneleri 3 boyutlu (3D) görmesinin nedeni, aslında sağ ve sol gözün farklı şeyleri görüyor olmasından kaynaklanmaktadır. Gözlerimizle alınan iki ayrı ama birbirine yakın görüntü beynimizde işlenerek 3B görüntü oluşur. Böylece derinlik bilgisi (3. boyut bilgisi) algılanır.

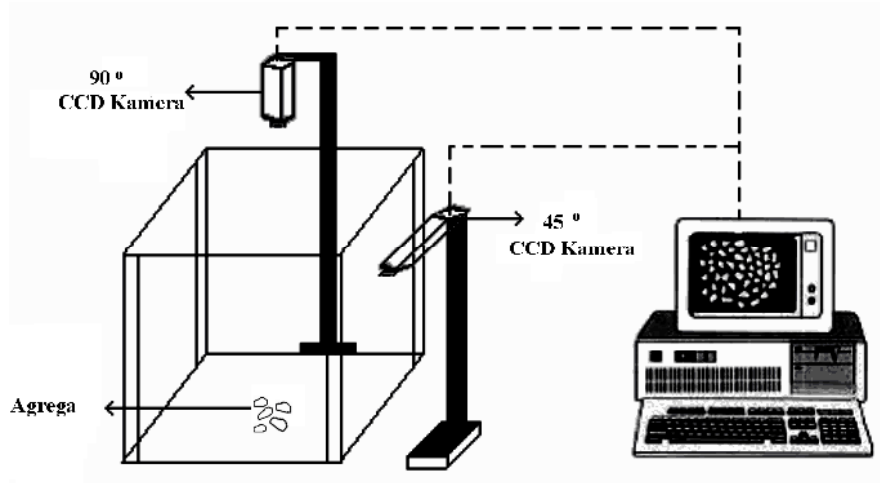
Dijital kameralarla çekilen görüntüler 2 boyutlu görüntüler olup, nesnelerin yüksekliği (derinlik) ile ilgili bilgi vermezler. Aynı nesnenin iki farklı açıdan çekilen görüntüleri her ne kadar 2 boyutlu olsalar da 3. boyut (yükseklik) hakkında bilgi veren stereo görüntülerdir. İnce agregaların boyutları nedeni ile istisnalar dışında ihmal edilebilir düzeyde olan bu özellik, iri agregalar için önemli olmaktadır. Bu nedenle iri agregalarda yapılan görüntü analiz çalışmaları, derinlik bilgilerini de içerecek şekilde yeniden değerlendirilmiştir.

Stereo yöntemle iri agregalarda görüntü analizleri yapılabilmesi için aydınlatma paneline 90° ve 45° de çekim yapmak üzere 2. bir kamera ilave edilmiştir. Sistemin başarımlı testi için yapılan deneme çekimlerinde farklı şekil özelliklerinde (Köşeli, Uzun, Yassı, Yuvarlak, Biçimsiz) sınıflandırılan agregalar, kullanılmıştır. Ayrıca, iri agregaların şekil özelliklerine göre sınıflandırılması amacıyla geliştirilen, MatLab programının araç kutusunda bulunan “Fisher doğrusal ayraçlama” analizleri yapılmış ve sistemin agrega taneleri şekillerine göre sınıflandırma başarısı değerlendirilmiştir. Daha sonra analizler, farklı mineralojide ve farklı kırıcı tiplerinde kırılmış agregalar üzerinde yapılan çalışmaları da kapsayacak şekilde genişletilmiştir.

5.4.1.4 Stereo Görüntüleme Sistemi

Stereo görüntüleme sisteminde homojen aydınlanma için aydınlatma paneli kullanılmıştır. Bunun yanında, stereo görüntü alımı için 7.2 Mp Canon EOS 350D (CCD1) ve 10,2 Mp Pentax E10D (CCD2) kameralar kullanılmıştır. Kameralarla görüntü alımı 45° ve 90° açılarla yapılacak şekilde düzenlenmiştir. Bu sayede agregalarda 3. boyuta ait derinlik bilgileri elde edilebilir. Çekimler sırasında oluşabilecek titreşimlerin önlenmesi için dijital fotoğraf makinaları birer tripod

üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 5.39). Işığın homojen dağılması ve tipodlardan agrega görüntüleri üzerine gölge düşmemesi amacıyla panel etrafı beyaz kumaş ile çevrelenmiştir.



Şekil 5.39 Stereo görüntüleme sistemi

5.4.1.5 Stereo Görüntü Alımı, Görüntü İşleme ve Analizler

Stereo görüntü alımı amacıyla görüntüleme alanına yerleştirilen agrega taneleri üzerinde görüntü işleme ve analiz adımları sırasıyla aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

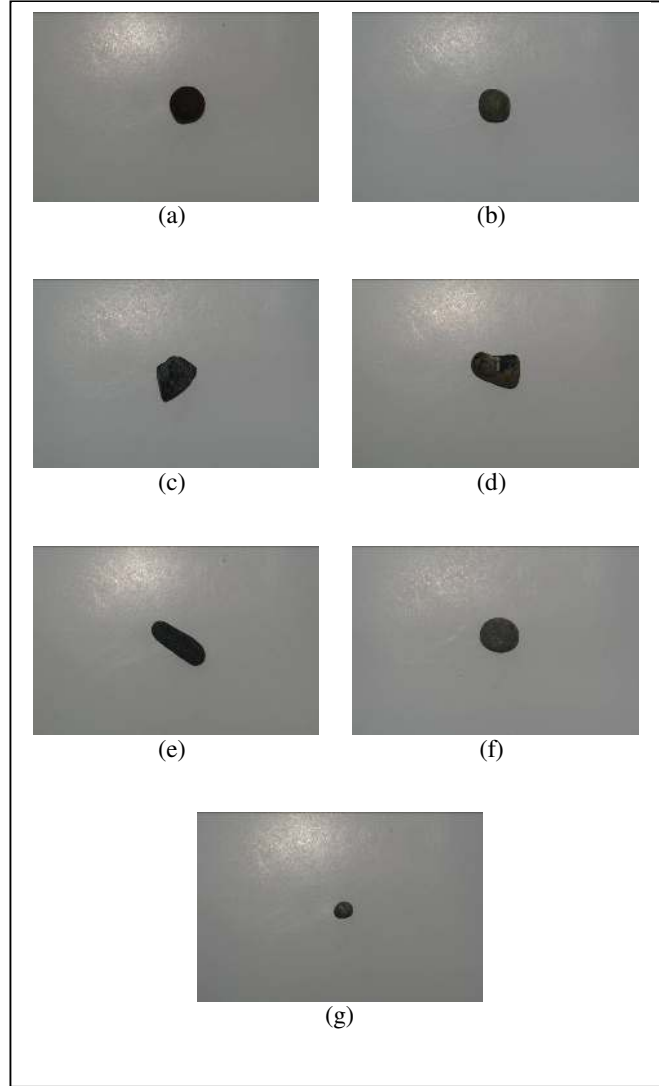
- Agregaların 45° ve 90° açılarla CCD1 ve CCD2 kameraları ile görüntülenmesi
- Görüntüden arka planın çıkarılması
- Gri seviyeye dönüştürme
- Gürültü azaltma (filtreleme)
- Segmentasyon
- Özellik çıkarımı

Stereo yöntem ile aynı agregalardan 45° and 90° ’lik açılarla alınan görüntü sonuçları karşılaştırılarak derinlik bilgileri elde edilebilir. Görüntülerde gürültü azaltma işlemi Bölüm 2’de bahsedilen Gaussian filtre kullanılarak yapılmıştır. Böylece agregalar 2 farklı açıdan 2 boyutlu özelliklerinin çıkarılması için hazır hale getirilmiştir.

Ören doğal agregasından görsel olarak seçilmek sureti ile ayrılan agregalar şekillerine göre; köşeli (1), biçimsiz (2), uzun (3), yassı (4), yuvarlak (5) olarak sınıflandırılmıştır. Farklı geometrilerdeki bu agregalar ve yine beton karışımlarında kullanılacak pürüzlü ve parlak bilyalardan alınan görüntüler Şekil 5.25’de (Sy.153) görülmektedir. Bu agregalardan çok sayıda görüntüleme ve görüntü analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları, daha sonra farklı ocaklardan temin edilen agregalarda yapılacak görüntü analizleri ve sınıflandırmalar için referans teşkil edecektir.

İki farklı açıda çekilen görüntüler 7,2 Mp çözünürlüğünde olup, JPG formatında kaydedilmiştir (5.40-a). Agregalar görüntülerinin işlenmesi, analizi ve öznitelik vektörlerinin hesaplanması için MatLab® 7.0.4 Görüntü işleme araç kutusu (Image Processing Toolbox) kullanılmıştır.

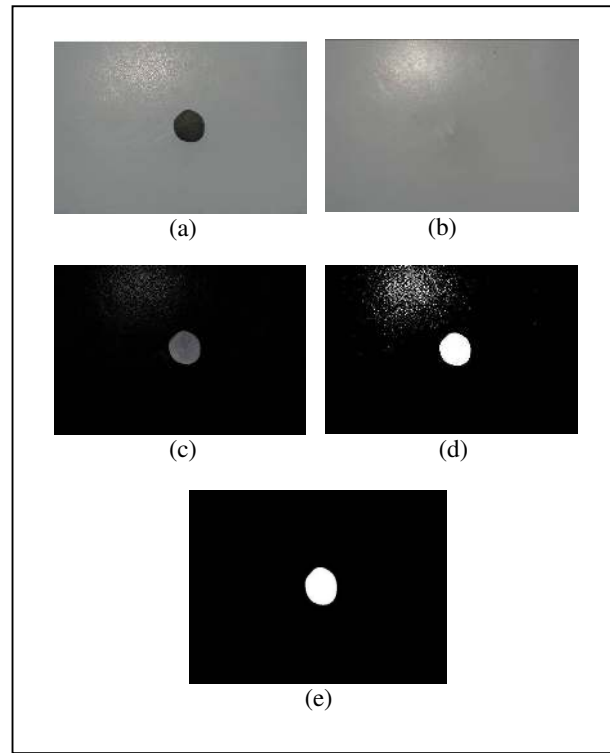
MatLab®, teknik hesaplamalar ve matematiksel problemlerin çözümü ve analizi için tasarlanmış bir yazılım geliştirme aracıdır. “MATrix LABoratory” kelimesinin kısaltması olan MatLab®, adında da anlaşılacağı üzere matrisler (matrix) yani diğer bir deyişle diziler (array) ile çalışır. Özellikle mühendislik alanındaki sistemlerin analizinde kullanılan MatLab®, görüntü işleme (image processing), sayısal işaret işleme (signal processing), optimizasyon (optimization), veri elde etme (data acquisition), veritabanı (database), süzgeç tasarımı (filter design), sistem kimliklendirme (system identification), dalgacık dönüşümleri (wavelet transform) gibi araçlar vardır. MatLab® gelişmiş özellikleri olan, programlanabilen bir bilimsel hesap makinasına benzetilebilir. MatLab®, yazılan programlar, MatLab®’ın kendine özgü dili kullanılarak yazılır ve MatLab®’ın içinde çalıştırılır. Ayrıca yazılan programlar DLL ve EXE olarak oluşturulabilir ve C/C++ gibi programlama kodlarına da çevrilebilir.



Şekil 5.40 CCD1 kamera ile çekilmiş iki boyutlu agregat görüntüleri a-Pürüzlü bilya, b-Parlak bilya, c-Köşeli, d-Biçimsiz, e-Uzun, f-Yassı, g-Yuvarlak

Görüntü işleme amacıyla öncelikle agregaların arka zeminden segmentasyonu sağlanmıştır. Bunun için öncelikle, agregat olmaksızın çekilen boş ekran (arka fon) (Şekil 5.41-b) her bir agregat görüntüsünden çıkarılmıştır (Şekil 5.41-c). Daha sonra agregaları segmente edebilecek eşik değeri hesaplanarak görüntü binary kodlamaya (0/1) dönüştürülmüştür (Şekil 5.41-d). Görüntüde oluşan gürültüler temizlendikten sonra (Şekil 5.41-e), Şekil 5.41’de gösterilen görüntü işleme adımları uygulanarak, agregaların 0/1 (binary) görüntüleri elde edilmiştir (Şekil 5.42-45). Çekilen agregat görüntülerinde arka fonun çıkarılması işlemi (Şekil 5.42), Canny sınır belirleme

(Şekil 5.43), eşikleme (Şekil 5.44), 0/1 dönüşüm (Şekil 5.45) gibi görüntü işleme adımlarının detayları Bölüm 3’de anlatılmıştı. Agrega tanelerinin öz nitelikleri 0/1 görüntülerde yapılan analizler sonucu hesaplanmıştır. Görüntü analiz işlem adımlarından bazıları Şekil 5.46-48’de görülmektedir. Şekil 5.46’da bir agrega tanesinin ağırlık merkezinin, Şekil 5.47’de konkav çevritin bulunuşu görülmektedir. Şekil 5.48’de ise agreganın etiketlenmesi ile % Dikdörtgen alanı (%DA), kalınlık (Rg), yarıçaplar oranı (Ry), yuvarlaklık, konkavlık (K) ve tane çevresine çizilen elipsin uzun aksının kısa aksına oranı (Re) gibi birçok öz niteliği görülmektedir. Tek bir agrega için belirlenen bu özellikler genelleştirilerek görüntü alanındaki tüm agrega taneleri için ayrı ayrı uygulanabilir (Şekil 5.49).

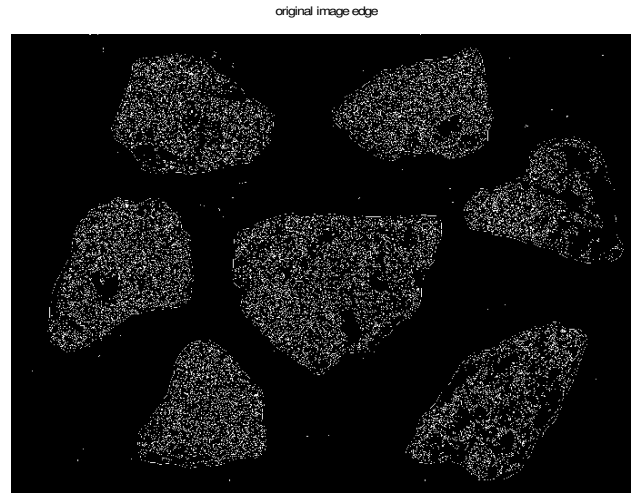


Şekil 5.41 Görüntü işleme adımları

- (a) Görüntünün alınması, (b) Arka plan görüntüsü,
- (c) Görüntüden arka planın çıkarılması,
- (d) Görüntünün Gri Seviyeye Dönüştürülmesi,
- (e) Gürültülerin Yok Edilmesi.



Şekil 5.42 Arka fonun çıkarılması ve temizle kapa (Clear-Close)



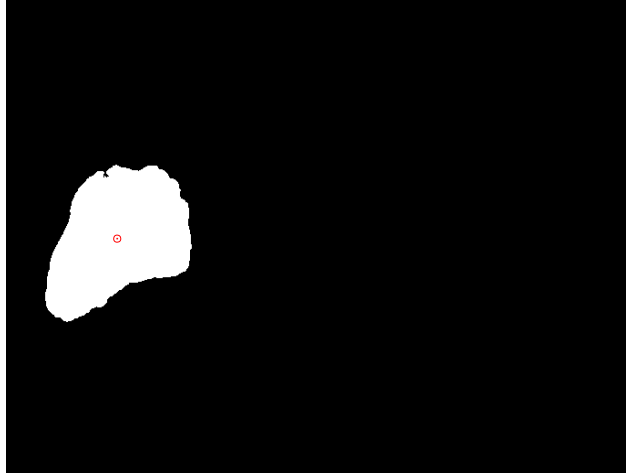
Şekil 5.43 Canny Sınır Belirleme



Şekil 5.44 Eşikleme



Şekil 5.45 0/1 (binary) Dönüşüm



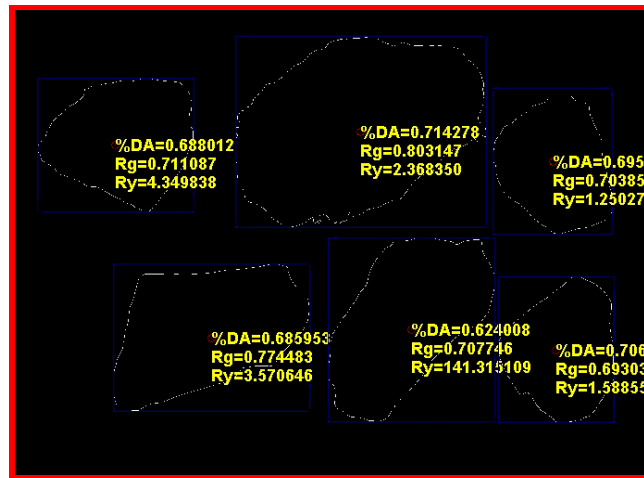
Şekil 5.46 Ağırlık Merkezi Bulma



Şekil 5.47 Konkav Alan



Şekil 5.48 Etiketleme ve şekil özelliklerinin tespiti



Şekil 5.49 Agregalara ait bazı şekil özellikleri

Tablo 5.13’de, agregalarda Şekil 5.42-49’de tanımlanan görüntü işleme adımlarının Matlab kodları görülmektedir.

Tablo 5.13 Agregalarda görüntü işleme adımlarının MatLab kodları

```

clear all
close all
clc
RGB = imread('blk-and1sil.tif');
I = edge(rgb2gray(RGB),'canny');
imshow(I);title('original image edge');
BW2 = bwareaopen(I,300);
figure,imshow(BW2);title('number of pixels greater than 300');
BW3 = imfill(BW2,'holes');
figure, imshow(BW3);title('labeled pixels');
BW4 = bwlabel(BW3,8);
e=1;
while e <= 1
    for i=1:size(BW4,1)
        for j=1:size(BW4,2)
            if BW4(i,j)==e
                BW5(i,j)=1;
            else
                BW5(i,j)=0;
            end
        end
    end
    e = e + 1;
end
BW6 = edge(BW5,'canny');
figure,imshow(BW5);title('first labeled aggregate shape properties');
[m,n]=size(BW6);
[x,y]=find(BW6==1);
r=size(x);
X = zeros(1,r(1,1));
Y = zeros(1,r(1,1));
k=1;
l=1;
for j=1:m
    for i=1:n
        if BW6(j,i)==1
            X(k) = i;
            Y(l) = j;
            k=k+1;
            l=l+1;
        end
    end
end
W = [X',Y'];
b=1;
for i=1:size(W,1)
    Q = abs([1,size(BW6,1)]-W(i,:));
    solalt(b) = sqrt(Q(1,1)^2+Q(1,2)^2);
    b=b+1;
end
solalt=solalt';
b=1;
for i=1:size(W,1)
    Q = abs([size(BW6,2),1]-W(i,:));
    sagust(b) = sqrt(Q(1,1)^2+Q(1,2)^2);
    b=b+1;
end
...
end

```

Geometrik öznitelikler, agrega görüntülerinden yuvarlaklık (compactness), konkavlık, rugosity (kabalık), yarıçaplar oranı, % dikdörtgen alanı, uzunluk ve agrega gölge alanı oranı değerlerinden oluşmaktadır. Öznitelikleri ifade etmekte kullanılan bu ölçüler Şekil 2.5'e göre Bölüm 2.1.1'de tanımlanmıştır. Bu nedenle agrega geometrik özellikleri ile ilgili tanımlar burada tekrarlanmayacaktır. Agrega şekil özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan MatLab kodları Tablo 5.14-19'da verilmiştir.

Tablo 5.14 Yuvarlaklığın MatLab kodu

```
function round = roundness(image)
bw1 = image;
bw2 = imfill(bw1,'holes');

% figure,imshow(bw4)
% kenar hatlarını bulalım

[B,L] = bwboundaries(bw2,'noholes');
% Her nesneyi etiketleyelim ve kenarlarını çizelim
figure,imshow(label2rgb(L, @jet, [.5 .5 .5]));title('labeled aggregates');
% hold on

% Merkez değerine göre alanı bulalım
stats = regionprops(L,'Area','Centroid');

% Her kenar noktasını belirleyelim
for k = 1:length(B)

    % etiketlenen kenarların herbirini bulalım
    boundary = B{k};

    % Çevre değerini bulalım (her objeye ait)
    delta_sq = diff(boundary).^2;
    perimeter = sum(sqrt(sum(delta_sq,2)));

    % Etiketlenmiş her nesnenin alanını bulalım
    area = stats(k).Area;

    % Metrik yuvarlaklık hesabını yapalım
    round = 4*pi*area/perimeter^2;

end
```

Yuvarlaklık tane çevre uzunluğuna ve alanına bağlı olarak belirlendiğinden, tanenin yüzey pürüzlülüğü değişimlerinden etkilenir.

Tablo 5.15 Konkavlığın (K) MatLab kodu

```
function con = convex(Image)

I = Image;
kk = regionprops(I,'ConvexArea'); %konkav_koordinat
konkav = cat(1, kk.ConvexArea);

al = regionprops(I,'Area'); %alan
alan = cat(1, al.Area);

kk = regionprops(I,'ConvexHull');
figure,imshow(I);
hold on
plot(kk.ConvexHull(:,1),kk.ConvexHull(:,2));
con = alan/konkav;
```

Tablo 5.16 Kabalığın (Rg) Matlab kodu

```
function cevre = rugosity(edge_image, Xdata, Ydata)

[m, n] = size(edge_image);

k=0;
for i=1:m
    for j=1:n
        if edge_image(i,j)==1
            k=k+1;
        end
    end
end

m=abs(Ydata(3)-Ydata(4));
l=abs(Xdata(3)-Xdata(4));

c=abs(Ydata(1)-Ydata(2));
d=abs(Xdata(1)-Xdata(2));

a=sqrt(m^2+l^2);
b=sqrt(c^2+d^2);

DC = 2*(a+b);
AC = k;

cevre = AC/DC;
```

Tablo 5.17 Yarıçaplar oranının (Ry) MatLab kodu

```

function yari_oran = yari_cap_orani(image, merkez)

[m,n] = size(image);

t=1;
for i=1:m
    for j=1:n
        if image(i,j)==1
            k(1,1)=abs(merkez(1,1)-j);
            k(1,2)=abs(merkez(1,2)-i);
            z(t)=sqrt(k(1,1)^2+k(1,2)^2);
            t=t+1;
        end
    end
end
Rmax = max(z);
Rmin = min(z);

yari_oran = Rmax/Rmin;

```

Tablo 5.18 Dikdörtgen Alanı (DA,%)'nin MatLab kodu

```

function dikdortgen_alani = dik_alan(image, Xdata, Ydata)

[m, n] = size(image);

k=0;
for i=1:m
    for j=1:n
        if image(i,j)==1
            k=k+1;
        end
    end
end

m=abs(Ydata(3)-Ydata(4));
l=abs(Xdata(3)-Xdata(4));

c=abs(Ydata(1)-Ydata(2));
d=abs(Xdata(1)-Xdata(2));

a=sqrt(m^2+l^2);
b=sqrt(c^2+d^2);

DA = a*b;
AA = k;

dikdortgen_alani = AA/DA;

```

Tablo 5.19 Uzunluk (Re)'nin MatLab kodu

```
function elips = el_uzun(Image)

I = Image;
MjL = regionprops(I,'MajorAxisLength'); %Major Uzunluk
Major = cat(1, MjL.MajorAxisLength);
MajorLength = Major/2;

MnL = regionprops(I,'MinorAxisLength'); %Minor Uzunluk
Minor = cat(1, MnL.MinorAxisLength);
MinorLength = Minor/2;

elips = MinorLength/MajorLength;
```

Bölüm 2’de tanımlanmayan bir öznitelik agregaların 2 farklı açıdan görüntülenmesi ile elde edilen “Gölge Alanı Oranı” (GA)’dır. Agreganın çevresinde gölgeli alanın (A_2) görüntülenmesi, aydınlatma panelinde alttan yapılan aydınlatmanın kapatılması ile elde edilmiştir. İki farklı açıdan çekilen görüntülerdeki gölge alan farklılıkları, tanenin yüksekliği (derinliği) ile ilgili bilgi verir. Gölge alanı oranı, Denklem 5.5’deki gibi hesaplanır.

$$GA = \frac{A_2 - A_1}{A_1} \quad (5.5)$$

$A_1 = 90^\circ$ ile alınan kamera görüntüsündeki gölge alanı

$A_2 = 45^\circ$ ile alınan kamera görüntüsündeki gölge alanı

Tez çalışması kapsamında hazırlanan aydınlatma paneli sisteminden başka, agreganın tanelerinin 3. boyut bilgilerini almak amacı ile “lazer kameralı sistem” ve bu çalışmaya özgü olan “Sanal kameralı sistem” kurulumları ve kalibrasyonları yapılmıştır. Sistemlerin performansı, şekil özelliklerine göre sınıflandırılmış agregalarda yapılan görüntüleme ve analiz çalışmaları ile test edilmiştir.

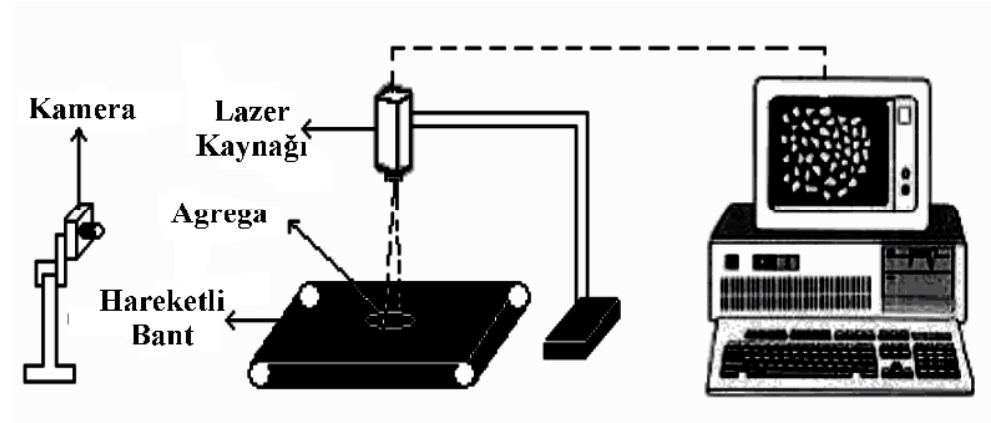
5.4.2 Lazer Kameralı Sistem (Üç Boyutlu Görüntü Analizi)

Lazer kameralı sistemler, özellikle otomotiv sanayinde kalite kontrol amacıyla kullanılan, ticari olarak da piyasaya arz edilen yüksek maliyetli yeni nesil teknolojik

cihazlardır. Yapılması istenen ölçümlerinin hassasiyetine bağlı olarak piyasada birçok model bulunmaktadır. Bununla birlikte, ABD’de Illinois Üniversitesi ve Teksas Üniversitesinde lazer kameraların agrega görüntülerinin 3 boyutlu modelleme çalışmalarında kullanıldığı bilinmektedir (Kim, Haas, ve Rauch, 2003).

5.4.2.1 Donanım ve Sistem Kurulumu

Agregalarda üç boyutlu görüntü alımına imkan verecek sistem genel olarak; agregaların taşındığı bir taşıyıcı bant sistemi (Lego brain storm[®]), görüntü alımını sağlayan standart ışık kontrollü webcam, lazer kaynağı olarak kullanılan bir barkod okuyucu ve alınan dijital görüntülerin depolandığı ve analizlerin yapılacağı bir bilgisayardan oluşmaktadır (Şekil 5.50).

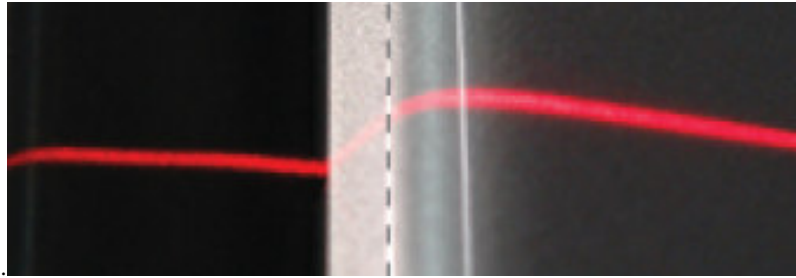


Şekil 5.50 Üç boyutlu görüntü alım sistemi

Bu amaçla Lego Brain Storm[®] setinin parçaları kullanılarak hareketli taşıyıcı bant yapılmıştır. Küçük bir fasıllı motor (12 V), silindirlerin dönüşünü sağlamakta ve silindirler üzerine giydirilmiş bant her adımda 1 mm hızla ilerlemektedir. Bu hareketi sağlamak amacı ile elektronik bir devre kartı hazırlanmıştır. Çizgisel lazer kaynağı (barkod okuyucu) düşey düzlemde taşıyıcı bant üzerine yerleştirilmiştir. Lazer ışığı çizgi genişliği 1 mm kalınlığında ve yaklaşık 10 cm genişliğindedir. Görüntü alımlarında tam profesyonel 10,2 Mp Sony CCD kamera kullanılmıştır.

CCD kameranın yüksek enstantene hızında olması nedeniyle, birkaç lazer çizgisi atımının aynı anda yakalaması başlarda sorun olsa da enstantene hızının düşürülmesi ile sorun giderilmiştir. Bu sorunun asıl nedeni ise lazer kaynağı olarak kullanılan barkod okuyucunun kesintili lazer ışığı vermesidir. Sabit lazer kaynakları kullanıldığında da böyle bir sorun yaşanmayacaktır. Maliyetleri azaltmak bakımından standart 3.1 Mp webcam kullanılarak da görüntü alımı yapılabilir.

Hareketli bant siyah plastik malzemeden yapılmıştır. Bunun nedeni, siyahın lazer ışığının büyük kısmını soğurmasıdır. Farklı renk ve parlaklıktaki malzemelerde lazer ışığı yansımaları ve çizgi genişlikleri Şekil 5.51’de görülebilir. Sistemde görüntü alımları karanlık ortamda yapıldığında, lazer çizgileri kamera objektifi tarafından daha net olarak algılanabilmektedir. Aynı zamanda görüntüden arka fonun çıkarılması işlemi, farklı kontrast nedeni ile kolaylaşmaktadır. Bu nedenle sistem kutu içerisine alınarak görüntüleme ortamı da karartılmıştır.



a) Lastik bant (Siyah-gri) b) Metalik yüzey (Gri-siyah)

Şekil 5.51 Farklı malzeme ve renklerde lazer ışığının yansıması

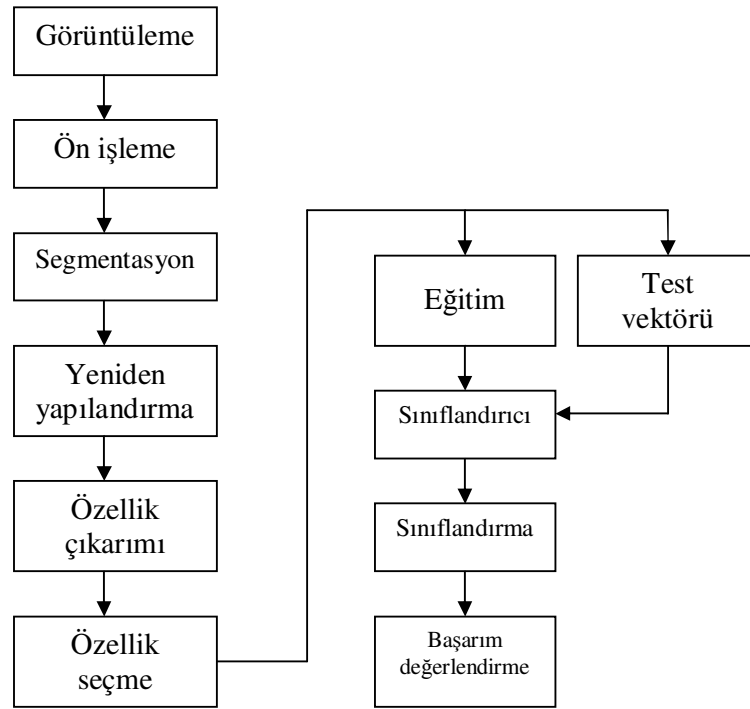
5.4.2.2 Görüntü Alımı ve Analiz İşlemleri

Hareketli bant üzerinde her adımda 1 mm ilerleyen agrega taneleri üzerine düşürülen lazer ışığı 10,2 Mp kamera ile görüntülenmiştir. Lazer ışığı 1 mm genişliğinde olduğundan tüm agrega yüzeyi eşit dilimler halinde görüntülenebilmektedir. Alınan bu görüntüler daha sonra işlenmek üzere hafıza kartına sayısal olarak kaydedilmektedir.

Görüntü alma ve işleme adımları aşağıdaki gibidir:

- Agregâ üzerine düşen lazer çizgisi görüntülerinin alınması,
- Bant tabanî görüntüsünün silinmesi ve agregâ kesitlerinin birleştirilmesi,
- Gri seviyelere ve daha sonra 0/1 formatına çevirme,
- Her bir lazer çizgisinin sınırlarını bulma,
- Çizgileri birleştirme,
- Özellik çıkarımı.

Görüntü analizinde işlem adımları Şekil 5.52'daki akış şemasında görüldüğü gibi gerçekleştirilmiştir.

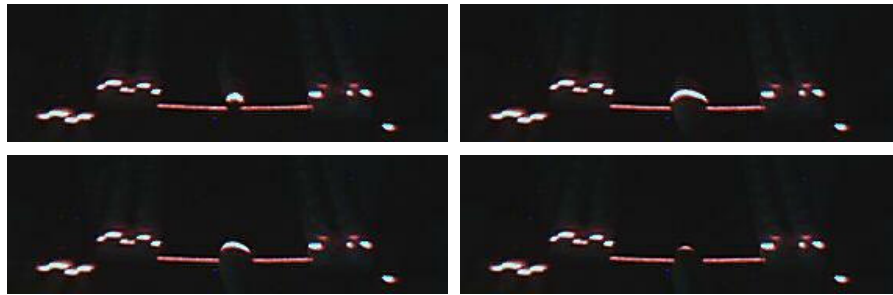


Şekil 5.52 Üç boyutlu görüntü işleme ve analizi akış şeması

Sistemin çalışma prensibi son derece basittir. Taşıyıcı bant üzerine agregâ tanesi yerleştirilir, lazer kaynağı açılır, taşıyıcı bandın ilerleyişi ile agregâ üzerine çizgisel lazer ışık demeti düşer. Bu sırada kamera tarafından agregâ ve üzerine düşen lazer

ışığının görüntüsü alınır. Işık demeti, agreganın taban kotundan farklı olan yüzeyleri üzerinde ilerler ve yüzey durumuna göre farklı şekillerde görüntülenir. İşlem taşıyıcı bandın ilerlemesi ve lazer ışık demetinin tekrar çizgisel forma dönmesi ile son bulur. Taşıyıcı bant üzerine yeni agregalar konulması ile sistem sürekli olarak çalıştırılabilir. Görüntüler geliştirilen yazılım vasıtası ile alınır ve işlenir.

Şekil 5.53’de bir agrega örneğinde yapılan lazer çizgisi görüntüleme işleminden, az sayıda seçilen birkaç görüntü görülmektedir. Bu görüntülerden lazer çizgilerinin agrega boyunca doğrultu sapmaları görülebilir. Lazer çizgisinin yatay düzlemde olan uzaklığı tanenin yüksekliği hakkında, genişliği ise agreganın genişliği hakkında bilgi verir. Çizginin eğriselliği ise tane şeklini ifade eder. Şekil 5.53’deki görüntülerde doğrusal çizginin iki yanında görülen şekiller, ölçüm kalibrasyonu amacı ile kullanılan en-boy ve yükseklik gibi geometrik özellikleri belli olan lego parçalarıdır. Taşıyıcı bantın ilerlemesi ile bu şekillerdeki lazer çizgisi izleri değişmemekte, ancak ortada bulunan agrega görüntüleri değişmektedir.



Şekil 5.53 Lazer kamera ile agregalarda lazer çizgilerinin görüntülenmesi

5.4.2.3 Yazılım

Lazer kameralı sistemle agregalarda 3 boyutlu görüntü analizi için MatLab programında bir yazılım ve arayüz geliştirilmiştir. Geliştirilen arayüz Şekil 5.54’de görüldüğü gibi, görüntü yakalama, birleştirme, öznitelik çıkarma ve yeniden oluşturma ve analiz adımlarını içermektedir. Görüntülenen her bir lazer profili birleştirilir ve öznitelik vektörleri hesaplanır. Şu an için agregaların uzunluk, en ve yükseklik (X, Y, Z) boyutları belirlenebilmektedir. Bir sonraki aşamada yüzey dokusu özellikleri için frekans bileşenlerinin elde edilmesine çalışılacaktır. Boyutları

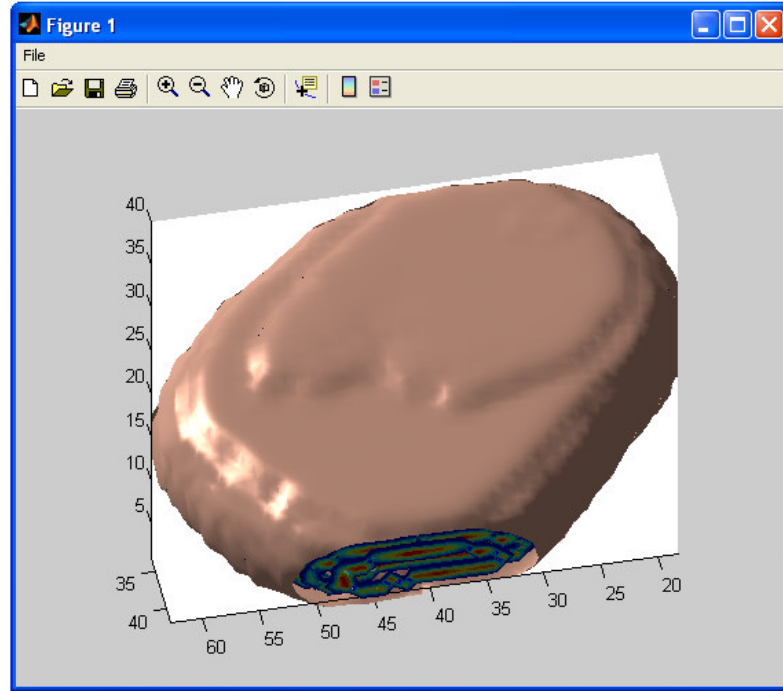
belli olan örneklerle (lego parçaları) yapılan denemelerde ölçümlerin performansı %100 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar manüel olarak kumpasla yapılan ölçüm sonuçları ile bire bir örtüşmektedir.

5.4.2.4 Üç Boyutlu Modelleme

Bu çalışmada öncelikle farklı şekil özelliklerinde oldukları bilinen iri agregalar (Köşeli, yassı, uzun, yuvarlak, biçimsiz) üzerinde çalışılmıştır. Bu agregalarda lazer dilimlerinin görüntülenmesi ile agregaların derinlik bilgilerini de içerecek şekilde MatLab görüntü analiz araç kutusu kullanılarak hazırlanan program vasıtası ile bilgisayarda yeniden yapılandırılmıştır. Sonuçta 3 boyutlu agregaların görüntüsü elde edilmiştir (Şekil 5.55).



Şekil 5.54 Üç boyutlu görüntü işleme ve analiz yazılımı



Şekil 5.55 Üç boyutlu agregat görüntüsü

Yassı, uzun ve yuvarlak agregat örnekleri üzerinde yapılan ölçüm sonuçları Tablo 5.20’de görüldüğü gibidir.

Tablo 5.20 Lazer kameralı sistem ile şekil özellikleri farklı bazı agregalarda yapılan ölçüm sonuçları

Agrega Şekli	Yükseklik (piksel)	Boy (piksel)	En (piksel)	Küresellik	Şekil faktörü	Uzunluk Faktörü	Yassılık faktörü
Yassı	13	44	37	0,629	0,418	1,189	0,351
Yassı	11	43	43	0,635	0,256	1,000	0,256
Yassı	10	43	40	0,6	0,269	1,075	0,250
Uzun	13	35	21	0,606	1,032	1,667	0,619
Uzun	10	44	23	0,492	0,832	1,913	0,435
Uzun	15	42	25	0,597	1,008	1,680	0,600
Yuvarlak	37	43	33	0,871	1,461	1,303	1,121
Yuvarlak	36	43	36	0,888	1,194	1,194	1,000
Yuvarlak	30	36	32	0,905	1,055	1,125	0,938
Köşeli	32	35	29	0,912	1,332	1,207	1,103
Köşeli	28	33	25	0,863	1,478	1,320	1,120
Köşeli	25	30	22	0,849	1,550	1,364	1,136

Tablo 5.20’de görüldüğü gibi, yassılık faktörü en küçük değer alan agrealar “Yassı”, uzunluk faktörü (Boy/En) en büyük olan agrealar “Uzun”, Şekil faktörü en büyük olan agrealar “Köşeli”, Küreselliği 1’e en yakın agrealar “Yuvarlak”, olarak sınıflandırılabilir. Köşeli agreaların küresellik değeri 0,8-1 aralığında değişmekte, uzunluk ve yassılık faktörleri 1’e yakın olmaktadır. Daha kesin genellemelerin yapılabilmesi için çok sayıda agreganın analiz edilmesi gerekmektedir.

Lazer kamera sisteminin modernize edilmesi ile kısa sürede çok sayıda agrega görüntülenip analizi yapılabilecektir. Sistemin otomasyonu ve modernize etme çalışmaları devam etmekte olup, maliyetlerin yüksek olması nedeni ile tez çalışması kapsamında tamamlanamamıştır.

5.4.3 Sanal Kameralı Sistem

Uygulamada olan bilgisayarlı görme sistemleri genellikle iki boyutlu görüntü işleme tekniklerine dayalıdır. Oysa birçok durumda denetlenmesi gereken malzemelerde aranan kusurlar ancak üç boyutlu görme teknikleri ile saptanabilir. Söz konusu görüntüleme sistemlerinin hızlı olması ve bakım gerektirmeden uzun süre çalışabilmesi gerekir. Bu yüzden bu sistemlerde amaç yönelimli hızlı algoritmalar içeren yazılımlar ve mümkün olan en dayanıklı parçaları içeren donanımlar kullanılmalıdır.

Literatürde karşılaşılan görüntüleme sistemlerinde ortak özellik, agreaların farklı yüzeylerinin birden fazla kamera ile görüntülenmesini esas alan sistemlerdir. Kamera sayısının fazla olması sistemlerin maliyetini arttıran en önemli etmendir. Kamera maliyetleri yanında kameraların senkronize çalışabilmesi için ilave donanım ve aydınlanma koşullarının sağlanması gereklidir. Kontrol parametrelerinin fazla olması yazılımın hızını da olumsuz yönde etkilemektedir.

Bölüm 2 Literatür bölümünde de bahsedildiği gibi, bir agrega tanesinin birden fazla yüzeyinin farklı kameralar ile görüntülenmesi ile elde edilen 2 boyutlu görüntülerden sağlanan veriler genellikle 3 boyutlu analiz olarak isimlendirilmektedir. Agregalarda üç boyutlu görüntü analizi için Ferlund (2005) tarafından geliştirilen görüntüleme sisteminde 2 adet kamera kullanılmaktadır. Rao

ve diğ er. (2001) tarafından geliştirilen görüntüleme sisteminde ise 3 kamera ile agrega tanelerinin üç farklı yüzeyinin (cephe, üst, yan) görüntülenmesi esas almaktadır. Halbuki agrega tanesini bir küp olarak düşünülürse, küpün 6 yüzeyi olduğundan aslında, nesnelerin gerçek 3 boyutlu görüntüleri 6 yüzeyinin de görüntülenmesi ile elde edilebilir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen sanal kameralı sistem, birden fazla kameranın yapabileceği iş i tek kamera ve aynaların kullanılmasıyla gerçekleştiren ve üç boyutlu nesnelerin özelliklerini hızlı bir şekilde algılayabilen bir görüntüleme sistemidir. Agregalarda öznitelik belirleme amacıyla geliştirilen bu sistem, farklı kameraların işlevlerini gören 4 adet ayna ve bir kameradan oluşmaktadır. Burada geliştirilen geometri, bir nesnenin görüntülerini en anlamlı bakış noktalarından alınabilmesine yardımcı olur. Görüntüleme sisteminin istenen geometrisi, aynaların düşeyle yaptığı açıların ayarlanması ile gerçekleştirilir. Özel bir kalibrasyon görüntüsü kullanılarak yapılan kalibrasyon sonucunda bilinmeyen kamera parametreleri bulunur ve sistemin istenen geometriye ne kadar yakın olduğu konusunda bir geri besleme alınır. Kalibre edilmiş kamera ve her bir ayna görüntüleri nesne boyutlarının iki boyutlu görüntülerinin oluşturulması için kullanılır. Agreg a tane yüzeylerinin aynalar yardımıyla farklı açılardan görüntülenmesinin ardından bu görüntüler düzeltilip harmanlanarak ölçüm amacıyla kullanılacak olan tek bir görüntü oluşturulur. Bu şekilde, üç boyutlu nesnelerin yüzey dokuları ile birlikte denetlenmesi gibi tanımlanması zor olan bir işlem iki boyutlu görüntüler üzerinde yapılacak duruma getirilerek, ölçüm işlemleri daha iyi tanımlı ve süratle gerçekleştirilebilecek hale getirilmiştir.

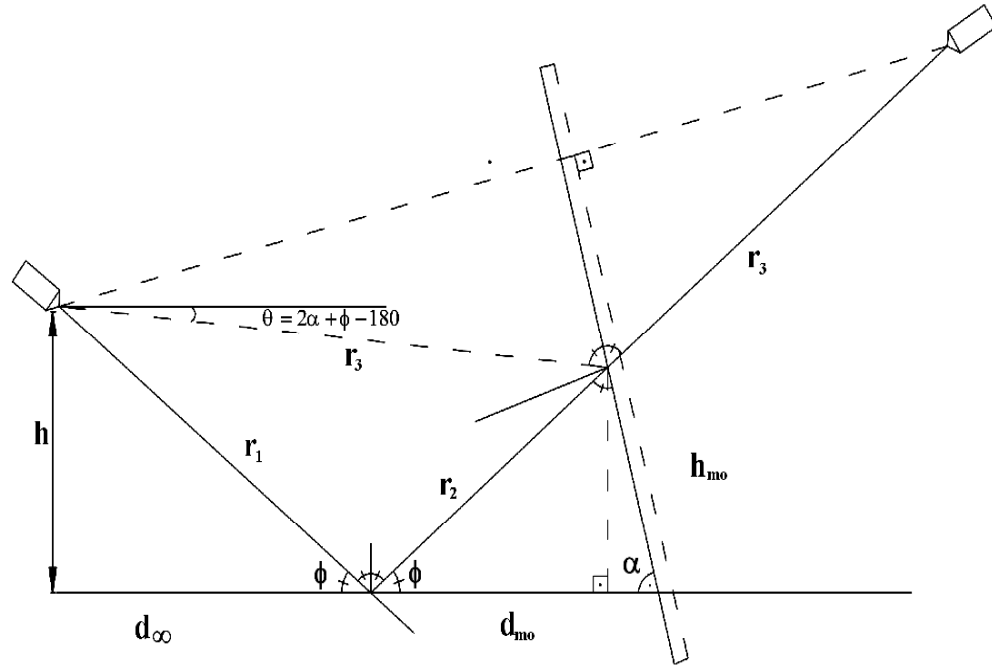
Tek kamera kullanılması sistemin donanım maliyetini azalttığı gibi kontrol parametrelerinin azalması yazılımın çalışmasını da kolaylaştırmaktadır. Tasarlanan sistemlerin geometrik yapısı bir ve iki aynanın kullanılması durumları için aşağıda açıklanmaktadır.

5.4.3.1 Görüntüleme Sistemi Kurulumu

Nesnenin en uygun şekilde görüntülenmesini sağlamak için ilk aşamada yapılması gereken kamera ve aynaların üç boyutlu uzayda yerleştirilmesidir. Bu işlem iki kriter esas alınarak yapılabilir:

- Kamera ve sanal kameraların aynı düşey açı ile nesneye bakması,
- Kamera ve sanal kameraların görüş açılarının yatay düzlemde 360^0 'yi düzgün paylaşması.

Tek aynalı ve tek sanal kameralı durumda 2 nolu kriter; kamera, nesne ve sanal nesnenin oluşturduğu düzlem ayna düzlemine dik olacak şekilde, aynanın yatay düzlemde çevrilmesiyle kolayca sağlanır. Bir nolu kriterin sağlanması için aynanın Şekil 5.56'da görüldüğü gibi alfa açısıyla düşey olarak çevrilmesi gerekmektedir.



Şekil 5.56 Görüntüleme sisteminin aynaya ve yatay düzleme dik düşey düzlemdeki izdüşümü (Gümüştekin, 2005)

$$\alpha = \frac{\theta - \Phi + 180^\circ}{2} \quad (5.6)$$

θ ve Φ açıları Şekil 5.56'daki geometriden aşağıdaki gibi bulunur.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{h - h_{mo}}{d_\infty + d_m} \right) \quad \Phi = \tan^{-1} \left(\frac{h}{d_\infty} \right) \quad (5.7)$$

α açısı ve d uzaklığı aynanın istenen konumunu belirler.

$$h_{mo} = d_{mo} \tan(\phi) \quad (5.8)$$

$$d = d_{mo} + h_{mo} \cot(\alpha) \quad (5.9)$$

Bu geometride nesnenin sanal kameraya ve kameraya uzaklıklarının oranı iki görüntünün büyüklük oranını verir:

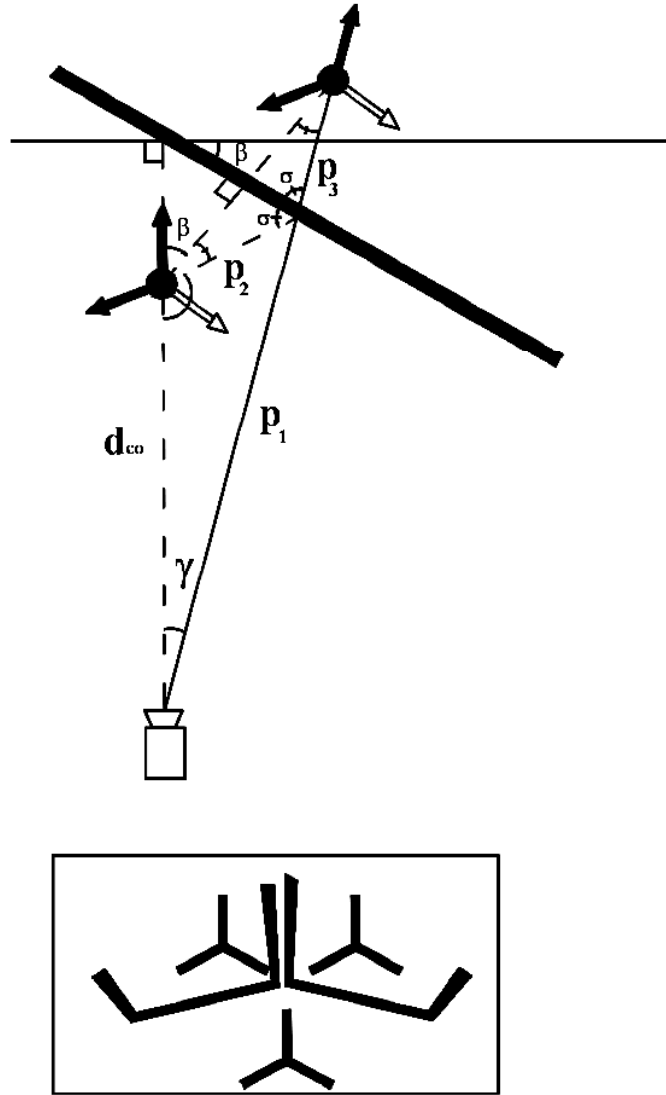
$$s = \frac{r_2 + r_3}{r_1} \quad (5.10)$$

r_1, r_2, r_3 uzaklıkları şu şekilde bulunabilir.

$$r_1 = \sqrt{d_{co}^2 + h^2}, \quad r_2 = \sqrt{d_{mo}^2 + h_{mo}^2},$$

$$r_3 = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos(180^\circ - 2\Phi)} \quad (5.11)$$

İki sanal kameralı durumda 2 nolu kriter için oluşan görüntülerin nesnenin 120° farklı açılardan alınmış görüntülerinin sağlanması gerekir. Şekil 5.57'de bu durumun nasıl oluştuğu görülebilir.



Şekil 5.57 Tek kamera ve 2 aynalı görüntüleme sisteminin yatay düzlemdeki izdüşümü ve çift ayna-tek kamera kullanan sistemde oluşan örnek görüntü

Şekilde aynalardan sadece bir tanesi görülmektedir. Şeklin kamera-nesne eksenine göre simetrisi diğer aynanın oluşturduğu geometriyi verir.

Şekil 5.57'e göre gerçek görüntü ile sanal görüntünün büyüklük oranı:

$$s = \frac{p_1 + p_2}{d_{co}} \quad (5.12)$$

Aynı şekil üzerinde cosinüs kuralı uygulandığında;

$$p_1^2 = d_{co}^2 + p_2^2 + d_{co} p_2 \quad (5.13)$$

5.12 nolu denklem şu şekilde yazılabilir:

$$sd_{co} = \sqrt{d_{co}^2 + p_2^2 + d_{co} p_2 + p_2} \quad (5.14)$$

Buradan,

$$p_2 = \frac{d_{co}(s^2 - 1)}{1 + 2s} \quad (5.15)$$

Yine cosinüs kuralının kullanılması ile:

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{d_{co}^2 + p_1^2 - p_2^2}{2d_{co}p_1} \right) \quad (5.16)$$

Aynı zamanda,

$$\gamma = 180^\circ - (120^\circ + 180^\circ - 2\sigma) = 2\sigma - 120^\circ = 2(\beta + 30^\circ) - 120^\circ = 2\beta - 60^\circ$$

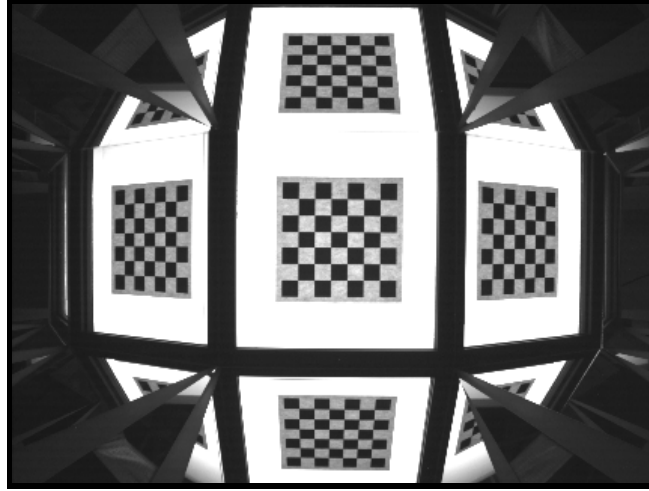
olduğundan aranan açı :

$$\beta = \frac{\gamma}{2} + 30^\circ \quad (5.17)$$

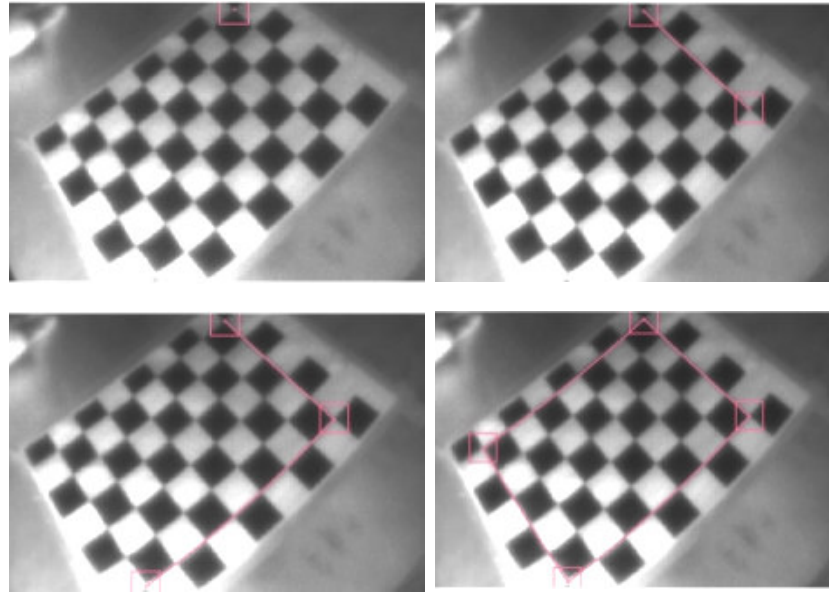
5.4.3.2 Kamera Kalibrasyonu

Görüntüleme platformunun üç boyutlu uzayda iyi tanımlanmış bir şekilde konumlandırılmasına karşın, bu geometrinin (yani dış kamera parametrelerinin) elde edilen görüntülerden doğrulanması ve iç kamera parametrelerinin de belirlenebilmesi için bir kalibrasyon işlemi gereklidir. Şekil 5.58’de görülen grid (ağ) deseni ve sanal

görüntüler içinde noktaların eşlenmesi yapılır. Jean-Vves Bouguet'in "Camera Calibration Toolbox for Matlab" yazılımı yardımı ile kamera kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.59).



Şekil 5.58 Kamera gridinin dört aynalı sistem ile görüntülenmesi

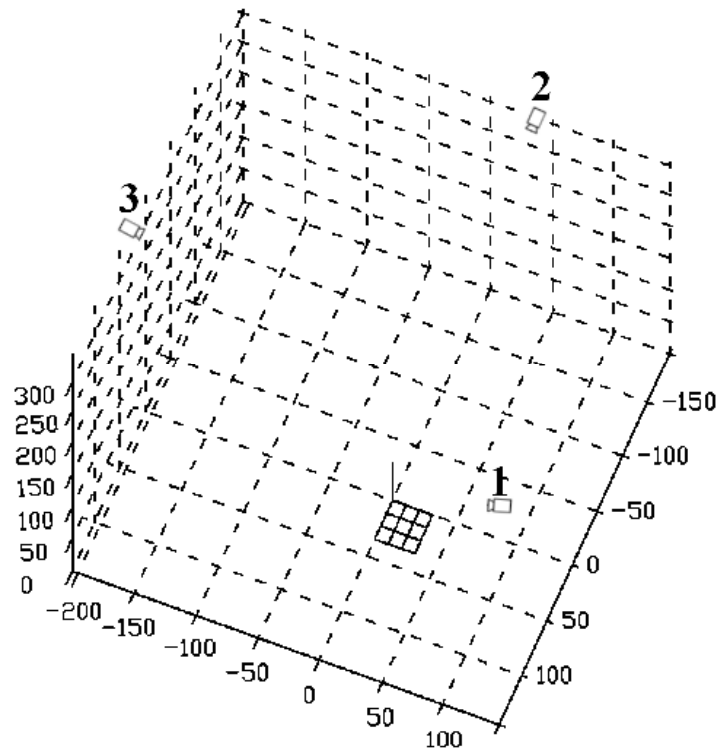


Şekil 5.59 Kalibrasyon işlemi

Gerçek ve sanal görüntülerinin maskelenmesi ile elde edilen görüntüler sanal görüntülerin yatay ekseninde çevrilmesinin ardından kalibrasyon işleminde kullanılır. Seçilen ve eşlenen köşe noktaları yardımıyla kalibrasyon gerçekleştirilir (Şekil 5.59).

Bu işlem odak uzaklığı ve çarpıtma katsayısı gibi iç kamera parametreleri ile birlikte kamera pozisyonu ile ilgili dış kamera parametrelerinin bulunmasını sağlar.

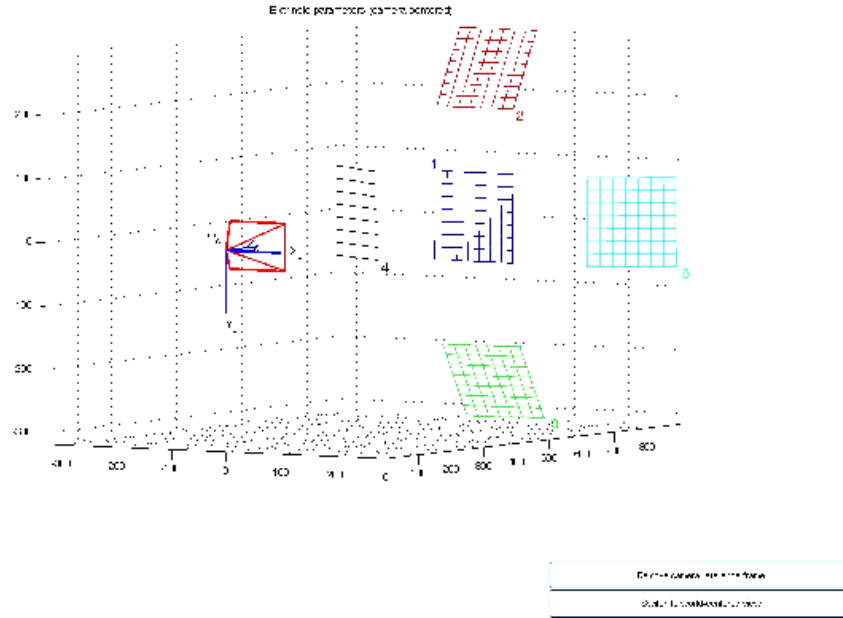
Kalibrasyon sonucunda elde edilen dış kamera parametreleri üç boyutlu çevirme matrisi ve yer değiştirme vektörü şeklindedir (Trucco ve Verri, 1998; Hartley ve Zisserman, 2002). Kalibrasyon şekli yeryüzü koordinatları üzerinde sabit tutulup, kameraların pozisyonları hesaplandığında, Şekil 5.60'da canlandırılan durum elde edilir. Kamera koordinat ekseninde kalibrasyon şeklinin farklı konumları hesaplandığında ise Şekil 5.60'da görülen durum gerçekleşir.



Şekil 5.60 Tek kamera ve 2 aynalı sistemde, kalibrasyon şeklinin, asıl kameranın (#1) ve sanal kameraların (#2 ve #3) yeryüzü koordinatları üzerindeki konumu.

Elde edilen kamera parametreleri, görüntüleme düzeneğini hakkında 1.bölümde bahsedilen kriterlerden, kayda değer bir sapma olduğu durumda düzeneğin tekrar yapılandırılması için kullanıcıya bir geri besleme vermesi için de kullanılır.

Sanal kameralı sistemde Kalibrasyon şeklinin (#1) ve sanal şekillerin (#2, #3, #4 ve #5) kamera koordinatları üzerindeki konumları Şekil 5.61'deki gibi belirlenmiştir. Aynı şekilde agrega görüntüleri de 3 boyutlu uzayda bu şekilde elde edilebilecektir.



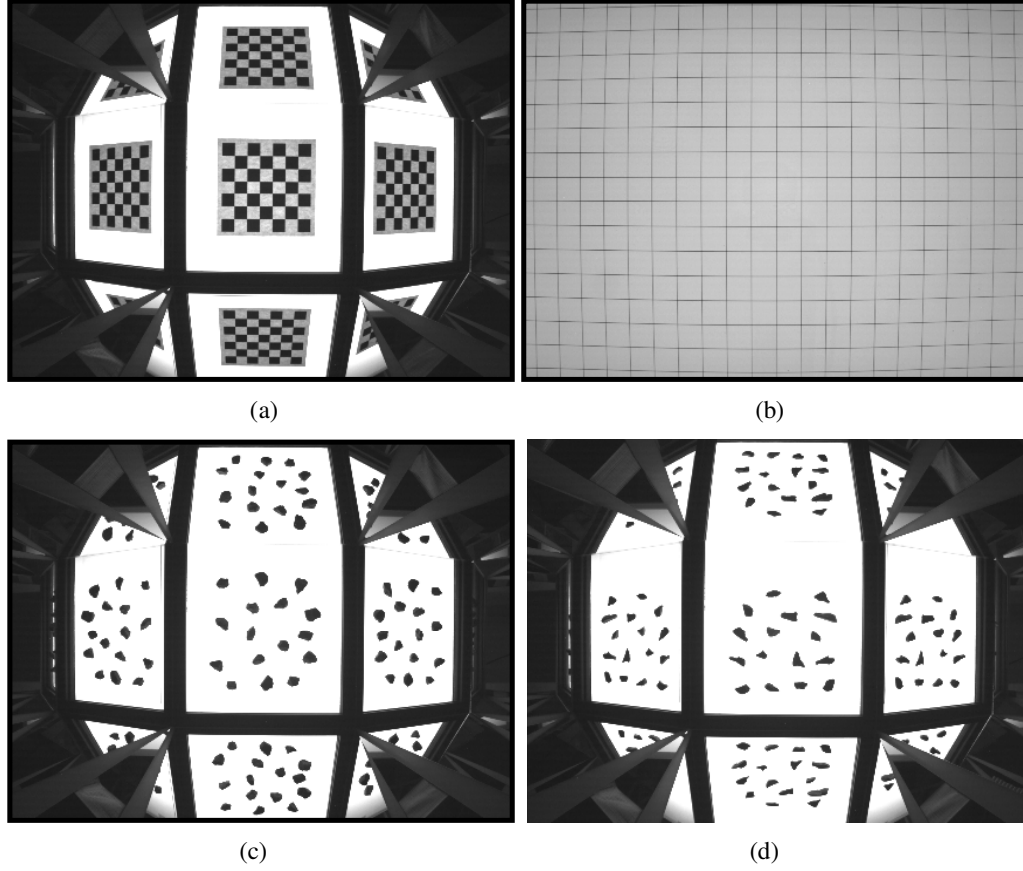
Şekil 5.61 Tek kamera ve 4 aynalı sistemde Kalibrasyon şeklinin (#1) ve sanal şekillerin (#2, #3, #4 ve #5) kamera koordinatları üzerindeki konumları

5.4.3.3 Üç Boyutlu Nesne Yüzeylerinin Denetlenmesi

Burada incelenen yüzeyler ancak birden fazla kamera kullanarak tümüyle ölçülebilir çok karmaşık geometrisi olan yüzeylerdir. Nesnenin ve kalibrasyonu yapılmış sanal görüntü yüzeyleri düzlem üzerine aktarıldıktan sonra elde edilen görüntüler üst üste çakıştırılır. Üst üste gelen piksellerin kendi imge uzaylarında, görüntünün sınırına olan uzaklığı ile orantılı olarak ağırlıklı ortalamaları alınarak bileşik görüntü oluşturulur. Kalibrasyon ve örnek agrega görüntüleri Şekil 5.62'de görüldüğü gibidir.

Çalışmanın bu bölümünde, sanal kameralarla üretim bandında hızlı bir şekilde çalışabilecek bir bilgisayarla görme sisteminin geometrisi tasarlanmıştır. Tek bir

kamera ve aynalarla kurulan bu sistem, düşük maliyetli olmasının yanında, kontrol parametrelerinin az olması nedeniyle de daha güvenilir ve bakımı kolay bir sistemdir.



Şekil 5.62 Sanal kameralarla 3B Görüntü Alımı

a) Kalibrasyon görüntüsü b) Kalibrasyon kontrolü c) Köşeli agregat görüntüleri
d) Biçimsiz agregat görüntüleri

5.5 İnce Agregalarda Görüntü Analizleri

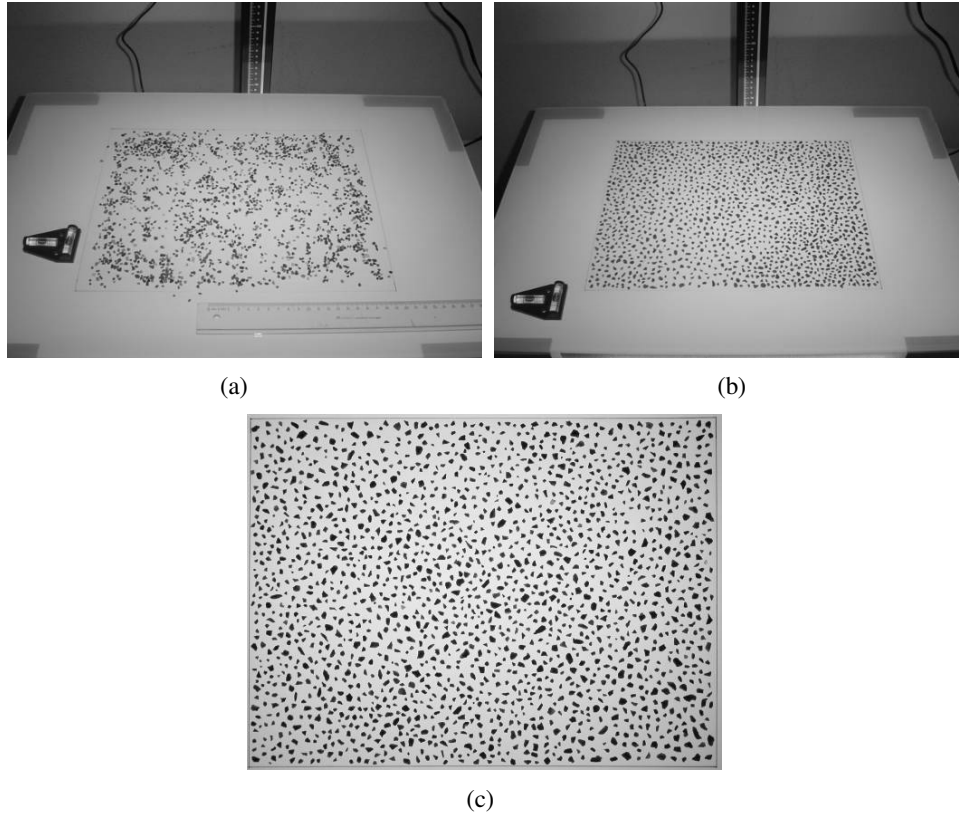
İnce agregalarda görüntü analizleri, aydınlatma panelli görüntüleme sisteminde alınan görüntülerde, Aggreganalysis adını verdiğimiz program kullanılarak yapılmıştır. Görüntü analizleri yapılacak ince agregalar, standart yöntemlerle şekil ve yüzey pürüzlülükleri belirlenen agregalardan rastgele örneklenerek, 4 mm ve 2 mm açıklıklı eleklerden elenmişlerdir. Her bir agregat grubu için 250 g ince agregat hazırlanıp etiketlenerek çekim gününe kadar muhafaza edilmek üzere poşetlenmiştir.

5.5.1 Aydınlatma Panelli Görüntüleme Sistemi ile Yapılan Analizler

Detayları Bölüm 5.4.1 de anlatılan sistemle, daha önce standart yöntemlerle şekil ve yüzey pürüzlülükleri belirlenen 27 farklı ince agrega örneğinde görüntü analizleri yapılmıştır. Aynı zamanda analizler, kökenleri aynı olan 3 farklı kırıcı tipi ile kırılmış kalker ve bazalt agregalarına da uygulanmıştır.

5.5.1.1 Görüntü Alma

Görüntü analizlerinin yapılabilmesi amacı ile hazırlanan ince agrega örnekleri, aydınlatma paneli üzerinde görüntüleme alanı olarak belirlenen 29,7x18,5 cm ebatlarındaki bölgeye konulmuştur (Şekil 5.63 a). Bu alan kameranın çözünürlüğüne bağlı olarak belirlenmiştir. Daha sonra bu agregalar birbirine temas etmeyecek şekilde dizilmiştir (Şekil 5.63 b). Görüntü alma işlemi her bir agrega grubu için 2 farklı pozlama hızında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.63 c).



Şekil 5.63 İnce agregaların aydınlatma paneli görüntü alanına dizilmesi ve görüntü alımı

Agregaların görüntüleri gruplandırılıp ait oldukları sınıfa dair bilgilerle birlikte TIFF (tagged image file format) formatında kaydedilmiştir. Her bir görüntüde yaklaşık 1350-1900 agregatanesi bulunmaktadır. İşlem kolaylığı açısından görüntüleme alanına az sayıda tane dizmek daha pratik olacaktır. Ancak, depolanacak görüntü alanı ve analiz işlemlerinin kolaylığı bakımından, görüntü alanının kullanımında ekonomik davranılmıştır. Böylece çok sayıda agregatanesi bir seferde analiz edilebilir. Analiz edilecek agregatanesinin çok olması, örneklerin bütünü temsil etmesi bakımından da önemlidir.

5.5.1.2 Görüntü İşleme

TIFF formatında alınan 2 boyutlu görüntüler 2272x1704 piksel çözünürlüğündedir (Şekil 5.64 a-b). Bu görüntüler öncelikle Leica Qwin® Plus görüntü işleme fonksiyonları kullanılarak işlenmiştir. Görüntü işlem adımları Bölüm 2’de detayları verilen parlaklık/karşıtlık optimizasyonu, arka planın çıkarılması (background subtraction), sınır bulma (Edge detection), eşikleme (thresholding), boşluk tamamlama ve 0/1 (binary) işlemleridir. Binary görüntülerde arka plan beyaz, agregataneleri siyah piksellerle ifade edilmektedir. Görüntüler 0/1 (binary) formatına dönüştürüldükten sonra (Şekil 5.64 c-d), birleşik komponentlerin etiketlenmesi (connected component labeling) işlemi sonucunda her bir agregatanesinin ayrı olarak kaydedilmesi sağlanmıştır. İşlenen görüntüler sıkıştırılmamış TIFF ve kayıpsız sıkıştırma kullanan GIF (Graphics Interchange Format) formatlarında kaydedilmiştir.

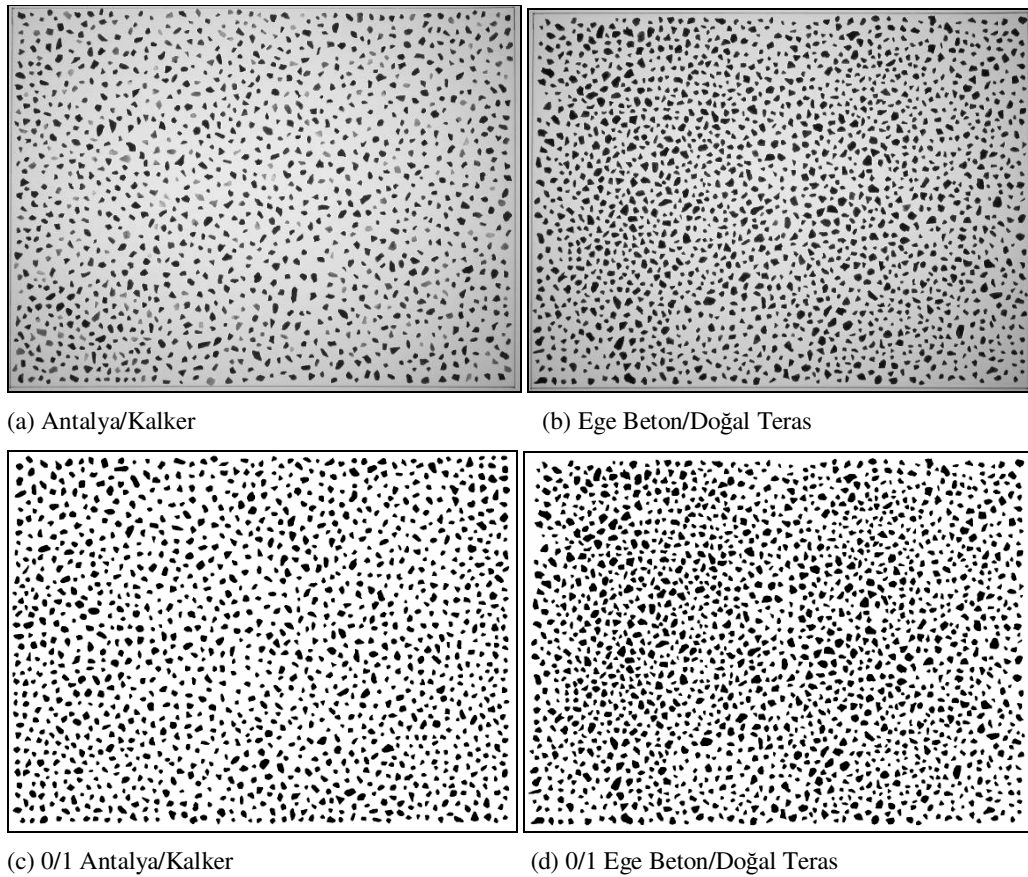
5.5.1.3 Qwin Görüntü Analiz Programı ile Agregatane Şekil Özelliklerinin Belirlenmesi

TIFF formatında kaydedilen ve 0/1 formatına dönüştürülen görüntülerdeki agregatanelerinin boyutları ve şekil özellikleri Qwin® Plus Programı ile analiz edilmiştir. Qwin® Plus ile belirlenebilecek agregatane özellikleri aşağıda verildiği gibidir:

Boyut; Alan, Dışbükey alan, Eşdeğer daire yarıçapı, Boy, En, Feret çapları, Eğrisellik, **Şekil;** Yuvarlaklık, En-boy oranı (Aspect Ratio), Tane yarıçapının tane

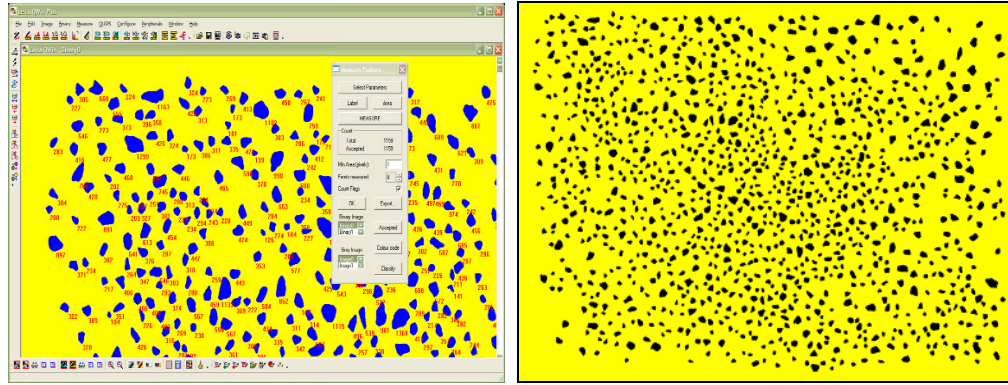
çevresine çizilebilen en küçük daire yarıçapına oranı (Fullratio-Yarıçaplar oranı), **Sınır**; Çevre, Dışbükey Çevre, Yatay ve düşey izdüşüm

Ayrıca görüntü alanındaki tanelerin Pozisyonu (X FCP, Y FCP, XCentroid, YCentroid) ve Yönlenmesi ile ilgili (Orientation, Derivative Orientation, Orthogonal Feret Angle) bazı öznitelikler de belirlenebilmektedir. Ancak bu öznitelikler farklı çalışma alanlarını ilgilendirildiğinden, çalışma kapsamında bu analizlere yer verilmemiştir.



Şekil 5.64 Görüntü analizinde alınan görüntüler (a), (b) ve işlenmiş 0/1 görüntüler (c), (d)

Alınan görüntülerde öncelikle (Şekil 5.65 a) Tanımlama (Detection) ve Etiketleme (Labeling) işlemleri yapılmıştır. Görüntüleme sisteminde uygun aydınlatma şartlarının sağlanması ile görüntü işleme adımlarının en aza indirilmesi sağlanmıştır. Böylelikle hatalı piksel eklentileri ve kayıplarından da kaçınılmıştır.

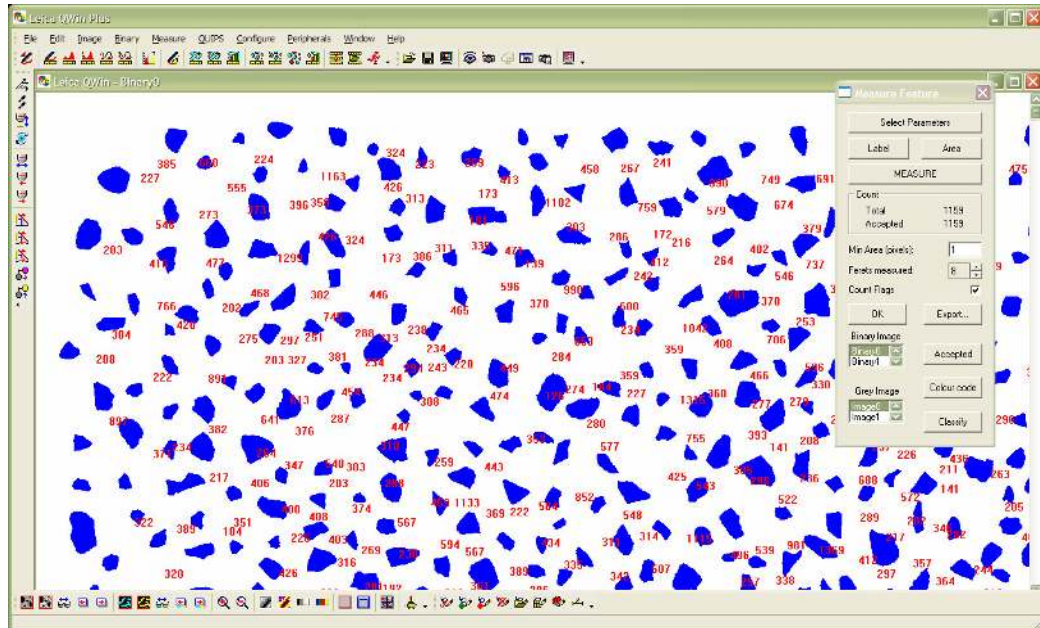


a) Tanımlama ve Etiketleme

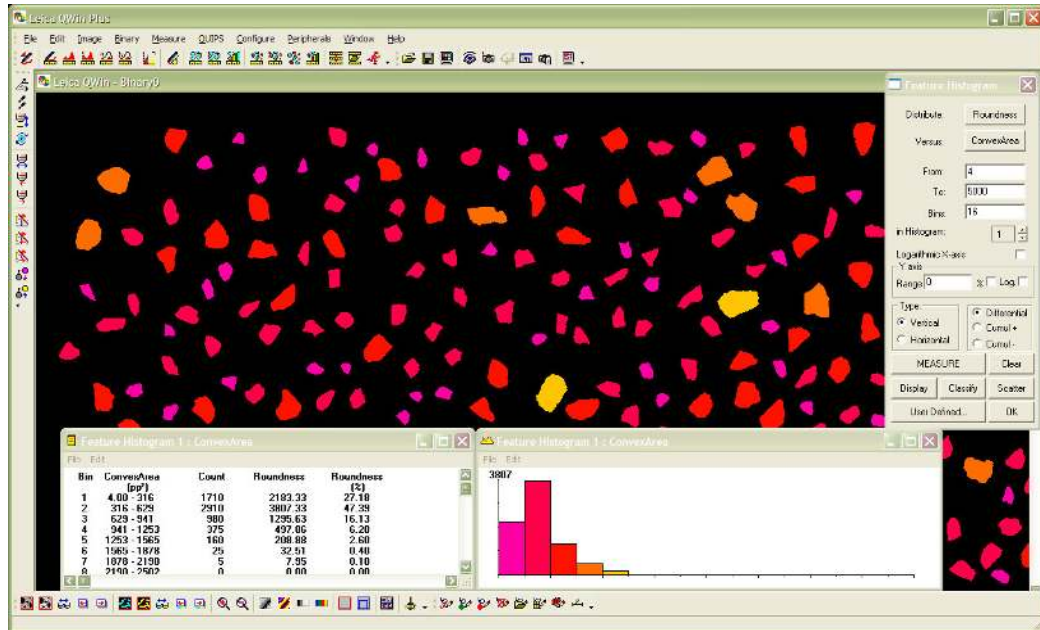
(b) 0/1 dönüşüm

Şekil 5.65 Görüntü işleme

Özellik ölçümü (measure feature) fonksiyonu kullanılarak ölçüm parametreleri seçilmiş ve analizleri yapılmıştır (Şekil 5.66). Şekil 5.67’de ise tanelerin konkav alan büyüklükleri 8 farklı aralığa ayrılmış ve farklı renklerle tanımlanmıştır. Analiz sonucunda ilgili boyut aralığına düşen agrega tane sayısı, konveks alan ve yuvarlaklığın ortalama değerleri belirlenmiştir. Görüntü alanındaki her bir agrega tanesinin ölçüm değerleri ve istatistikler ayrı bir çalışma (wordpad) sayfasında kaydedilmektedir.



Şekil 5.66 Etiketleme ve özellik ölçümü fonksiyonu



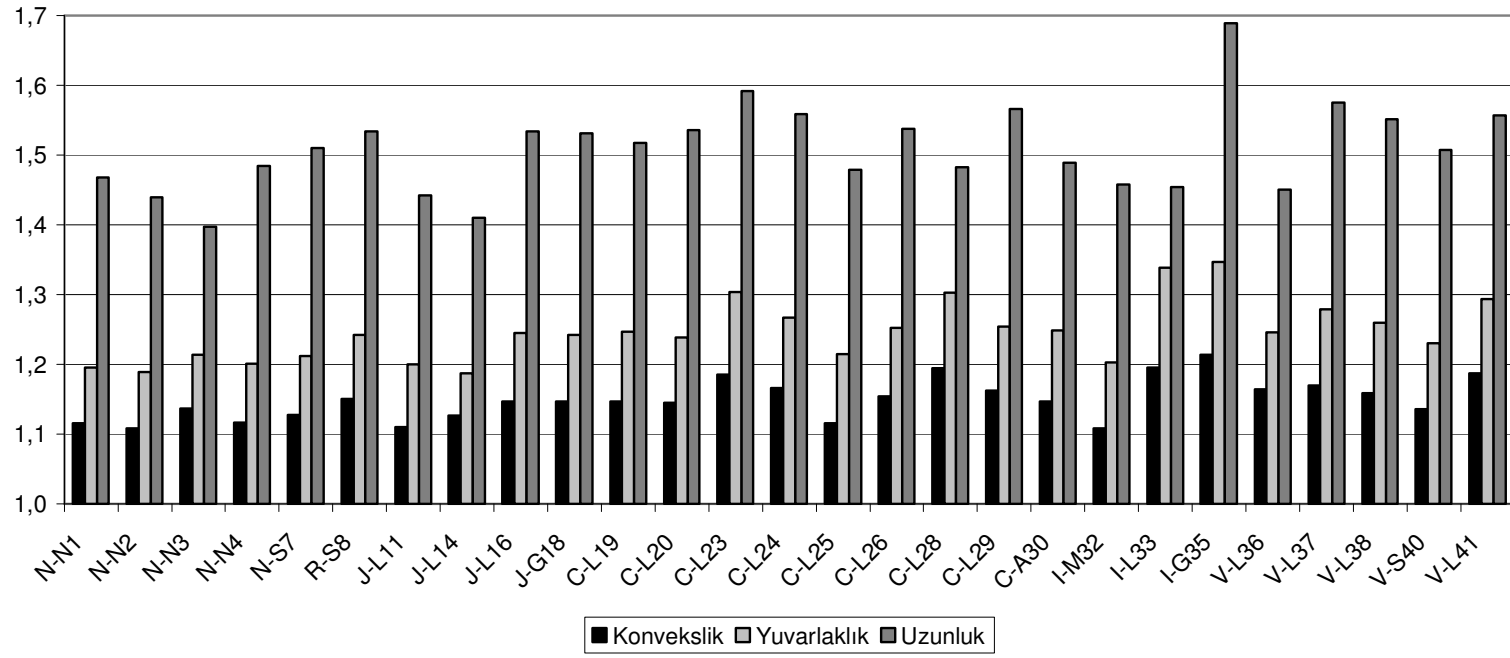
Şekil 5.67 Konveks alan ve Yuvarlaklık analizi

27 farklı agrega örneği için analiz sonuçlarının ortalama değerleri Tablo 5.21 ve Şekil 5.68’de görülmektedir. Tablo 5.21’deki analiz sonuçlarının istatistiksel değerlendirmeleri “Qwin® Plus Analiz istatistiksel değerler”de görüntülenebilir.

Qwin Plus görüntü analiz programı ile bulunan öznitelikler, agrega tanelerinin en, boy, çevre ve alan ölçümleri kullanılarak hesaplanan özniteliklerdir (Tablo 5.21). Dijital görüntü analizlerinde bu boyutlar piksel cinsinden veya piksel büyüklüklerinin görüntü çözünürlüğe bağlı olarak değişen uzunlukları (mm, cm, cm² vb.) cinsinden tanımlanabilir. Alan değerleri kullanılarak tane boyutu dağılımları belirlenebilir ve granülometri eğrileri için yüzdelere hesaplanabilir. Program, farklı amaçlar için (özellikle biyoloji ve tıp alanında) geliştirildiğinden, belirlenebilecek geometrik özellikler Yuvarlaklık ve Uzunluk (boy/en) öznitelikleri ile sınırlıdır. Bununla birlikte, elde edilen ölçüm değerleri kullanılarak, bilinen matematiksel fonksiyonlar yardımı ile konvekslik de hesaplanmıştır. Şekil 5.68’de 27 farklı agrega ocağından temin edilen ince agrega örneklerinin 3 farklı geometrik özelliği karşılaştırmalı olarak görülmektedir.

Tablo 5.21 Agregaların geometrik özelliklerinin ortalama değerleri

Agrega	Alan (piksel ²)	Boy (piksel)	En (piksel)	Feret yarıçapı (piksel)	Çevre (piksel)	Konveks çevre (piksel)	Yuvarlaklık	Boy/En oranı	Eşd. Daire yarıçapı (pp)	Konveks alan (pp ²)
N-N1	546.890	31.600	21.764	23.642	90.380	85.217	1.196	1.468	25.508	610.321
N-N2	498.002	29.894	20.959	22.614	86.008	81.023	1.189	1.440	24.348	551.840
N-N3	440.480	28.254	20.341	21.474	81.710	78.201	1.214	1.397	22.897	500.703
N-N4	469.165	29.466	20.056	21.745	83.807	78.925	1.201	1.484	23.599	524.070
N-S7	513.399	31.534	21.065	22.893	89.222	84.133	1.212	1.510	25.011	578.784
R-S8	520.212	32.241	21.277	23.201	90.991	85.631	1.242	1.534	25.191	598.441
J-L11	351.887	25.440	17.813	19.383	73.292	68.799	1.200	1.442	20.656	390.792
J-L14	432.074	27.956	20.030	21.007	80.256	77.276	1.188	1.410	22.728	486.843
J-L16	492.183	31.473	20.863	22.606	88.841	83.572	1.245	1.534	24.600	564.576
J-G18	573.777	33.668	22.350	24.097	95.073	89.454	1.242	1.531	26.337	658.304
C-L19	420.431	28.500	19.096	20.834	80.916	75.928	1.247	1.518	22.385	482.201
C-L20	453.841	29.971	19.794	21.375	84.564	79.453	1.239	1.536	23.432	519.899
C-L23	472.014	31.595	20.306	22.255	88.783	83.181	1.304	1.592	24.047	559.430
C-L24	489.586	31.163	20.358	22.148	87.735	82.399	1.267	1.559	24.069	570.762
C-L25	332.681	25.161	17.235	18.886	72.231	67.667	1.215	1.479	20.239	371.237
C-L26	414.220	28.497	18.814	20.665	80.640	75.711	1.253	1.538	22.243	478.243
C-L28	423.812	29.032	19.872	21.110	82.981	78.920	1.303	1.483	22.468	506.277
C-L29	594.582	34.304	22.300	24.268	96.226	90.710	1.254	1.566	26.529	691.267
C-A30	444.520	29.327	19.968	21.784	83.895	78.564	1.249	1.489	23.179	509.771
I-M32	351.661	25.943	17.979	19.468	74.532	69.884	1.203	1.458	20.973	389.773
I-L33	486.068	30.901	21.523	22.802	90.340	84.511	1.339	1.454	24.095	581.034
I-G35	612.178	36.552	22.165	24.140	101.100	94.421	1.347	1.689	26.913	743.190
V-L36	492.259	30.593	21.356	22.543	87.289	83.650	1.246	1.451	24.160	573.154
V-L37	421.152	28.996	18.777	20.643	81.705	76.558	1.279	1.575	22.317	492.603
V-L38	441.173	29.830	19.522	21.358	84.147	79.065	1.260	1.552	23.149	511.492
V-S40	386.766	27.543	18.487	20.225	78.290	73.539	1.230	1.508	21.790	439.171
V-L41	547.715	33.942	22.115	24.150	95.737	89.795	1.294	1.557	25.982	650.375



Şekil 5.68 Agregaların geometrik özellikleri (Qwin® Plus)

Şekil 5.68 incelendiğinde, konvekslik özellikle Düşey milli (V) ve Konik (C) kırıcı ile kırılmış kireçtaşı (L) agregalarında daha büyük olduğu görülmektedir. Gözle yapılan kontrollerde çok pürüzlü olduğu bilinen grovak (I-G35) için en büyük değerini almış olup, yine iri kristalli andezit (C-A30) için konveksliğin 1,00'den uzaklaştığı görülmektedir. Doğal agregalar için konvekslik en küçük değerlerini almaktadır. Ancak bazı kırmataş agregalarda (J-L11, C-L25, I-M32) da bu özellik düşük değerler almıştır. Bunun nedeni düzgün çokgenlerde konveksliğin 1,00 değerini alması ile açıklanabilir. Konvekslik tek başına agrega köşeliliğini ifade etmek için yetersiz görülmektedir. Konvekslik düzgün olmayan şekilli taneler için kaba pürüzlülüğü (roughness) daha iyi ifade eder. Konvekslik (Dışbükeylik), tane alanının tane içine çizilen konveks alanına oranı olarak tanımlandığından, elde edilen değerler merteye olarak konkavlıktan elde edilen değerlere yakın olacaktır.

Yuvarlaklık, beklendiği üzere doğal agregalar için 1,00'e yakın değerler almıştır. Kırmataş agregalarda, özellikle düşey milli (V) ve konik kırıcılarla kırılmış agregalar için yuvarlaklık 1,00 den uzak değerler almıştır.

Boy/En (Uzunluk) oranı, lamine yapıda olan, yassı ve uzun taneler içeren Grovak (I-G35) agregası için en büyük değerini almıştır. Doğal agrega ve bazı kırmataş agregalarda bu özellik en küçük değerlerini (1,40-1,50) almaktadır. Buradan anlaşılmaktadır ki tabakalı kayalarda yassı tane oranı yüksek olmaktadır. Doğal agregalar ise doğanın aşındırıcı etkileri sonucu yuvarlak olma eğilimindedirler.

Mineralojik kökeni aynı olan Ege Beton teras ocağı agregalarında, en büyük konvekslik ve uzunluk merdaneli kırıcıda kırılmış R-S8 agregasında elde edilmiştir. Yuvarlaklık Doğal teras agregası N-S7 için 1,00'e en yakın değerini almıştır. Ara değerler ise düşey milli kırıcı ile kırılmış V-S40 agregasında elde edilmiştir.

Tablo 5.21 ve Şekil 5.68'den de görüleceği üzere, agregalar mineralojilerine ve kırma yöntemlerine bağlı olarak farklı şekil özelliklerinde olabilmektedir. Ancak agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğünü ifade etmek için farklı geometrik özelliklere ihtiyaç vardır.

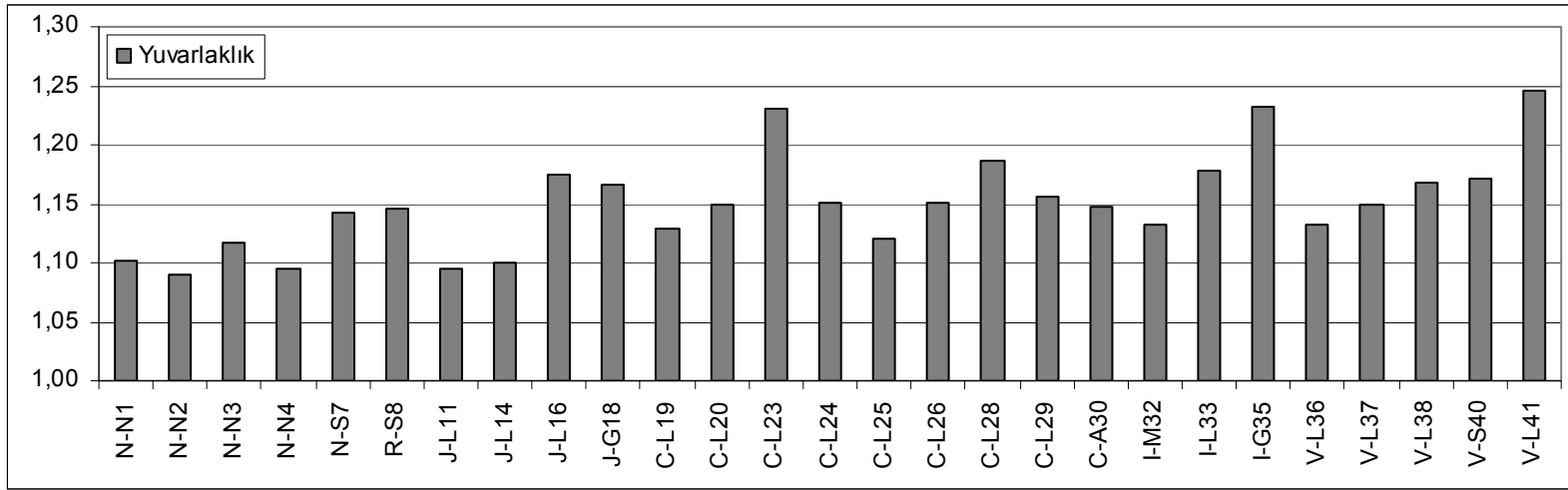
5.5.1.4 Aggreganalysis Programı ile Görüntü Analizleri

Agregaların şekil ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerini belirlemek için geliştirilen görüntüleme sistemi ile uyumlu çalışabilecek ve agreg a şekil özniteliklerinin belirlenmesinde kullanılacak Aggreganalysis programı C++ programlama dilinde yazılmıştır. Bu program, kolay kullanım açısından geliştirilen bir arayüze entegre edilmiştir. Analizi yapılacak görüntü arayüze yüklendikten sonra, agreg a geometrik özelliklerini ifade eden 4 farklı şekil özniteliği kolayca hesaplanabilmektedir. Sonuçlar, istatistiksel büyüklükler ve normalize edilmiş histogram aynı arayüz ekranında görülebilmektedir. Analiz sonuçları ve istatistiksel sonuçlar ayrı wordpad dosyalarında, histogram ise .jpg dosyasında kaydedilmektedir.

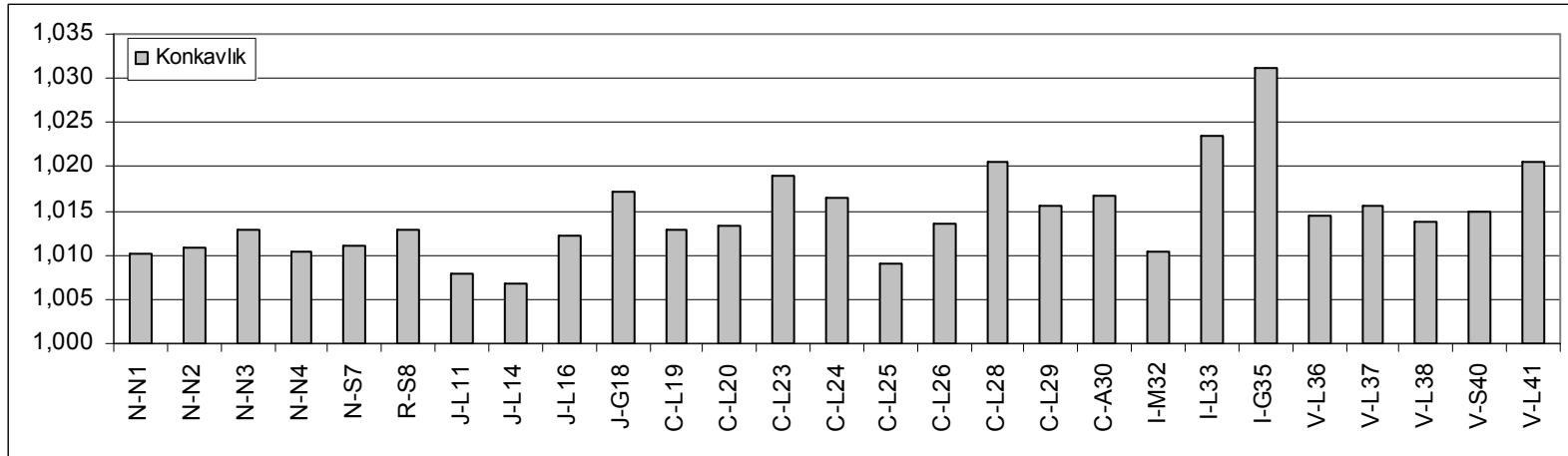
Aydınlatma panelinde uygun aydınlatma koşullarında alınarak GIF formatında kaydedilen görüntüler, Aggreganalysis programı ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçların ortalama değerleri Şekil 5.69-5.72’de görüldüğü gibidir.

Agregalarda doğal ve kırmataş agregaların geometrik özelliklerinin (Konkavlık, Dışmerkezlik, Yuvarlaklık) 3 boyutlu düzlemdeki konumları ise Şekil 5.73 ve Şekil 5.74’de görülmektedir.

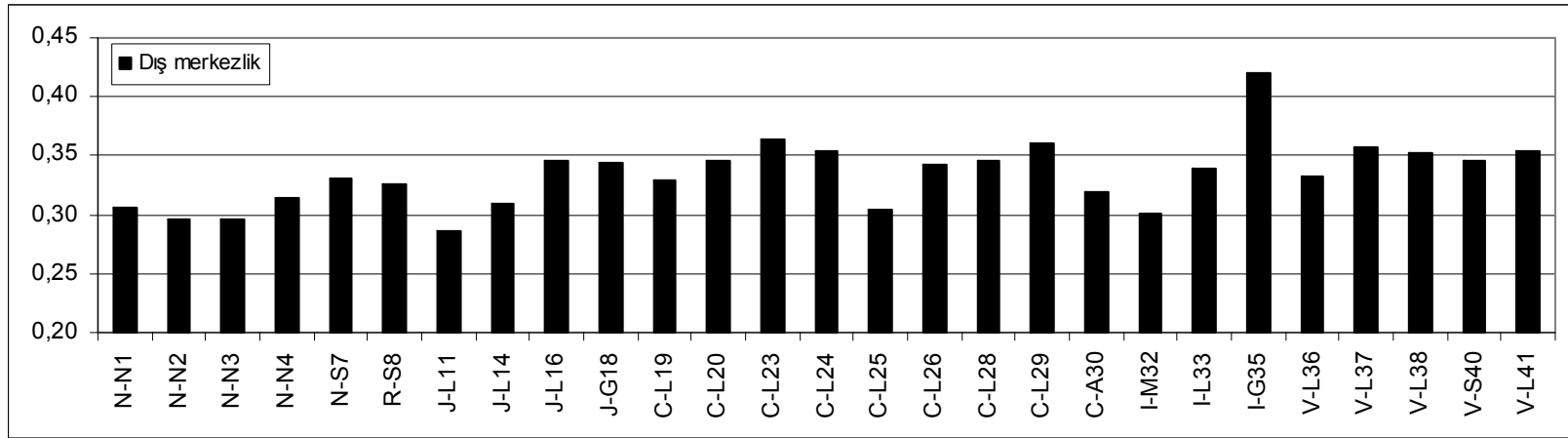
Görüntü analiz sonuçları incelendiğinde, Şekil 5.69’da Yuvarlaklık doğal agregalar için 1’e yakinken kırmataş agregalar için genel olarak 1’den uzaklaşmaktadır. En yüksek Yuvarlaklık değerleri sırasıyla V-L41, I-G35, C-L23, C-L28 ve I-L33 agregalarında elde edilmiştir. Daha pürüzlü yüzey yapısı özelliklerinde olduğu bilinen doğal teras ocağı agregasının (N-S7) yuvarlaklık değeri diğer doğal agregalardan daha büyüktür. Bu agreganın merdaneli kırıcıda (R-S 8) ve düşey milli kırıcıda (V-S40) kırılması ile yuvarlaklık değerleri daha da artmıştır. Bu durum kırma işleminin tanelerin şekil özelliklerini değiştirdiğinin bir diğer göstergesidir. J-L11 ve J-L14 agregalarının yuvarlaklık değerleri (1,09-1,10), (N) grubu doğal agregaların yuvarlaklık değerlerine (1,08-1,12) yakındır. Diğer geometrik öznitelik sonuçları incelendiğinde de benzer durumlar görülmüştür. Her kırmataş agreg a uygun köşelilik ve şekil özelliklerinde olmayabilir.



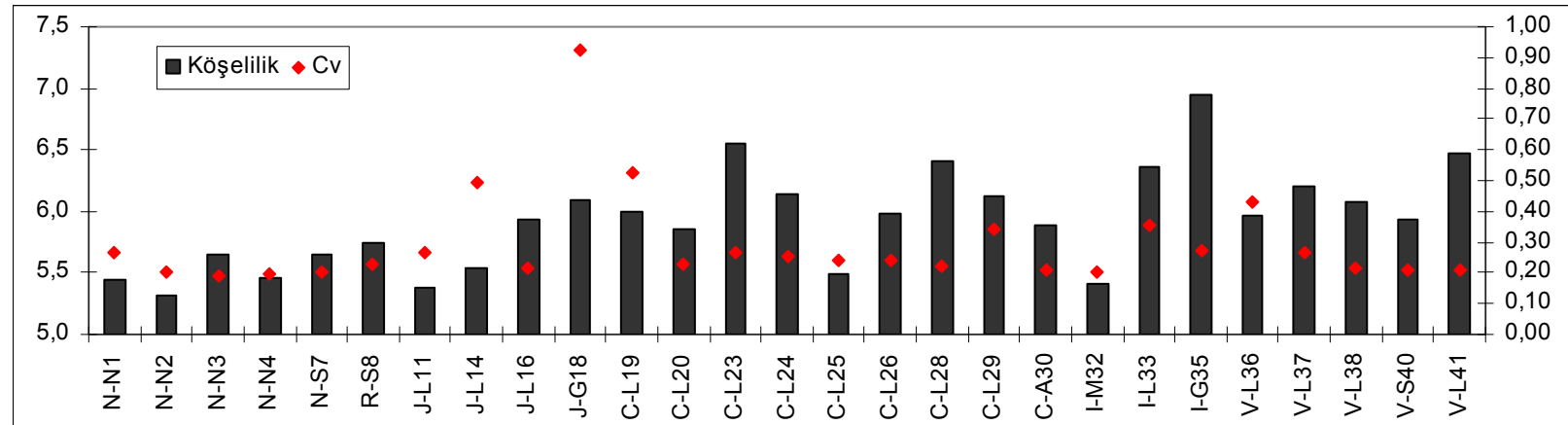
Şekil 5.69 İnce Agregalarda Yuvarlaklık Analizi (Aggreganalysis)



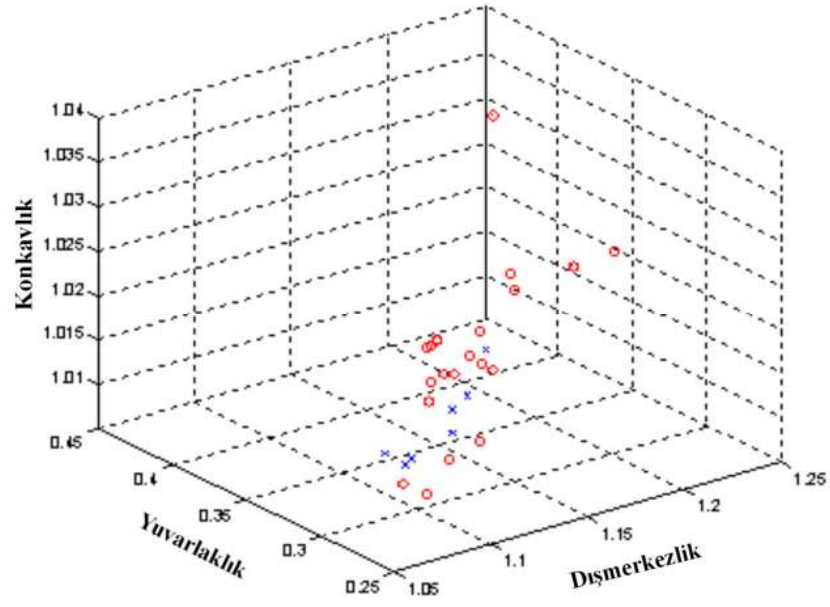
Şekil 5.70 İnce Agregalarda Konkavlık Analizi (Aggreganalysis)



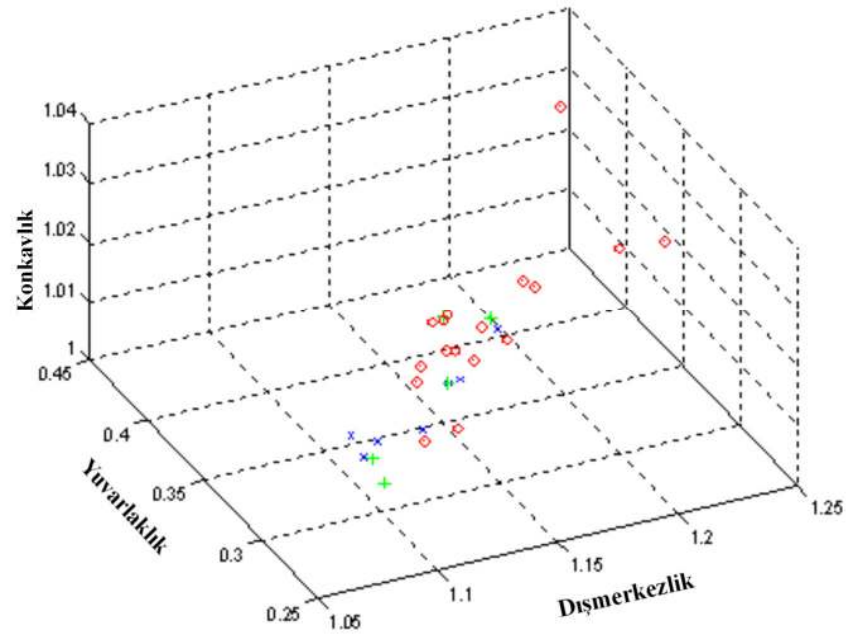
Şekil 5.71 İnce Agregalarda Dışmerkezlik Analizi (Aggreganalysis)



Şekil 5.72 İnce Agregalarda Köşellilik Analizi(Aggreganalysis)



Şekil 5.73 Agregalar geometrik özellikleri, doğal ve kırmataş değerlendirmesi



Şekil 5.74 Agregalar geometrik özellikleri mineraloji değerlendirmesi

Konkavlık, (Şekil 5.70) düzgün çokgen görünüşlerinde 1'e yakın değerler alacaktır. Ancak agregaya yüzeylerinin pürüzlü olması durumunda bu değerlerin bir miktar artması beklenir. Temin edilen agregalarda konkavlık değerlerinin 1,005-1,035 aralığında değiştiği görülmektedir. İnce agregalarda konkav alanların çok küçük olması nedeniyle konkav alan/alan oranları düşük mertebelerdedir. Konkavlığın yüksek değerleri biçimsiz tane şeklinin göstergesidir. En yüksek konkavlık değeri I-G35 agregasında, elde edilmiştir. Daha sonra sırası ile I-L33 ve C-L28 agregaları gelmektedir. Konkavlığın en küçük değerleri 1'e çok yakın olup çeneli kırıcılarla kırılmış J-L11 ve J-L14 agregalarında elde edilmiştir. Kalker agregasının pürüzlü yüzeylere sahip olduğu bilindiğinden, tanelerin düzgün çokgenleri ifade ettiği söylenebilir. Ancak aynı agregaların diğer geometrik özniteliklerine bakıldığında, köşelilik değerlerinin en alt seviyelerde olduğu görülmektedir. Geometrik özelliklerden biri sağlanmadığından, bu iki agreganın örneğinin köşelilik açısından uygun olmadığı sonucu ortaya çıkar. Aynı durum I-M32 ve C-L25 agregaları için de geçerlidir.

Dış merkezlik, tanelerin şekilce uzun ve biçimsiz olması ile ilgili bir özellik olduğundan, dış merkezliğin yüksek değerleri şekilce kusurlu taneleri işaret eder. Dış merkezliğin "0" değeri daireyi "1" değeri ise çizgiyi ifade eder. Örneklenen agregalarda ise dış merkezlik değerlerinin genellikle 0,30-0,50 aralığında değiştiği görülmektedir. En yüksek dış merkezlik değeri I-G35 agregasında elde edilmiştir. Bu agreganın dış merkezlik yanında konkavlık açısından da uygun olmadığı görülmektedir.

Tane çevresinin 3° açı ile 120 eşit dilimde taranarak elde edilen köşelilik değerleri 5-7 arasında değerler almıştır. En küçük köşelilik değerleri doğal agregalarda, en yüksek köşelilik değerleri ise düşey milli, darbeli ve bazı konik kırıcılarla kırılmış kireçtaşı agregalarında elde edilmiştir. Ortalamaları farklı olan iki değişkenin hangisinde yayılmanın büyük olduğunu anlamak için standart sapmaları karşılaştırmak yeterli olmaz. Bu durumda boyutsuz bir katsayı olan varyasyon katsayısını kullanmak uygun olur. Şekil 5.72'deki grafik üzerinde görülen varyasyon katsayıları, agreganın taneleri arasında köşelilik değerlerindeki değişimi göstermektedir.

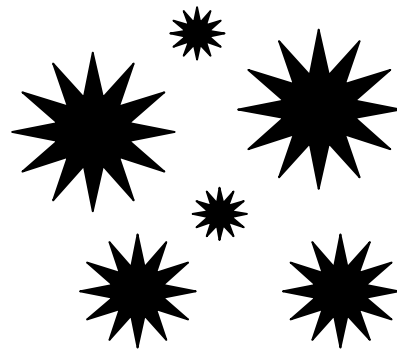
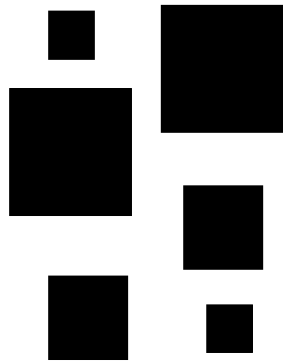
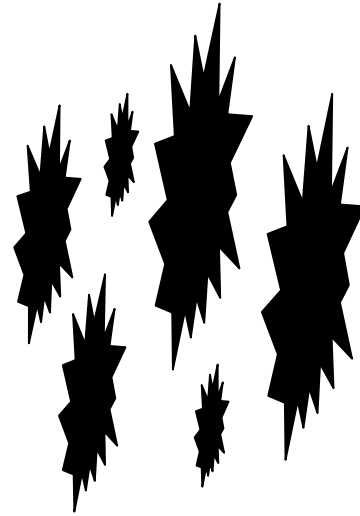
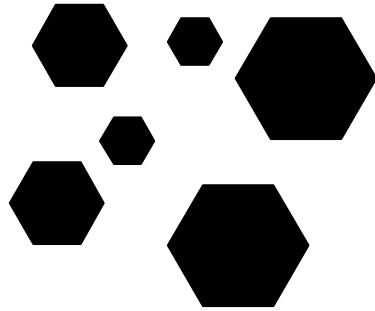
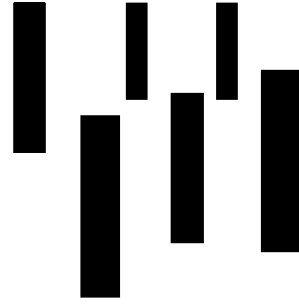
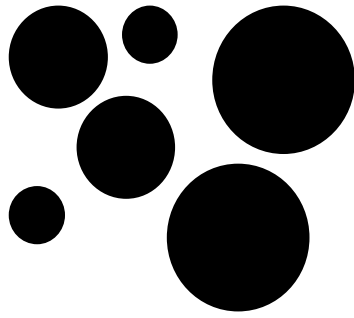
Varyasyon katsayısı, tabakalı kayaç olduğu bilinen J-L18 agregasında en yüksek değerini almıştır.

Görüntü analizlerinden elde edilen öznitelik değerleri ile düzgün geometrik şekillerin öznitelik değerlerini karşılaştırmak amacı ile görüntü analizleri Şekil 5.75’de referans olarak belirlenen geometrilere uygulanmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlar merteye olarak Şekil 5.76’da görülmektedir. Geometrik öznitelikler düşükten yükseğe doğru sıralanmıştır.

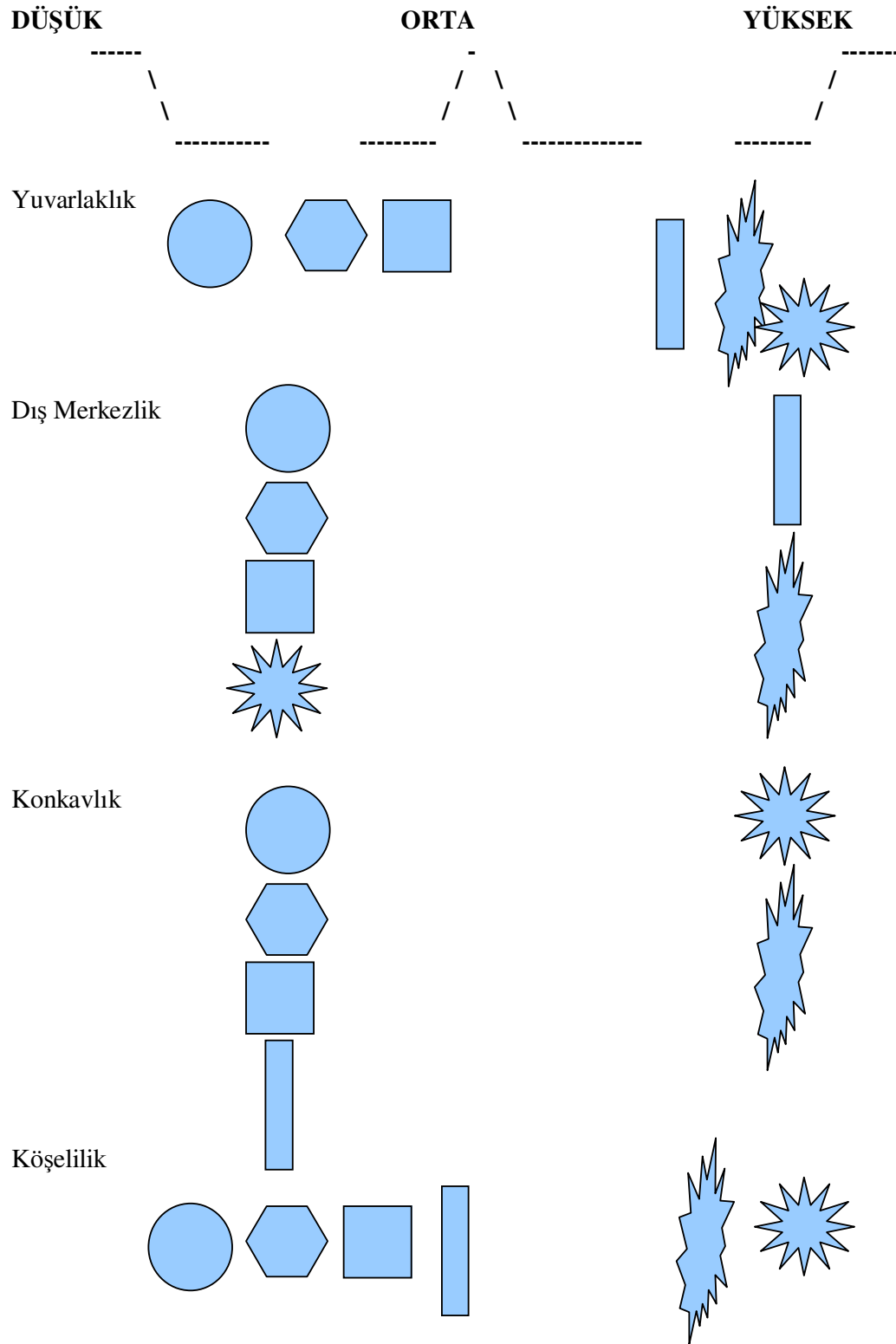
Yuvarlaklık ve köşeliliğin en büyük değerleri köşeli ve biçimsiz geometrilerde, en küçük değerleri ise yuvarlak geometrilerde elde edilmiştir. Dış merkezlik yassı ve uzun geometriler için en büyük değerlerini almaktadır. Agregalar köşeli ve biçimsiz özelliklere sahip olsalar da, dış merkezlik uzun tane oranını belirlemekte kullanılabilir. Konkavite köşeli agregalarda en büyük olmaktadır. Agregalı şekilleri düzgün geometride olduklarında geometrik öznitelik değerleri giderek küçülmektedir.

5.5.1.4.1 Farklı Kırıcılarla Kırılmış Doğal Agregalarda Yüksek Çözünürlüklü Görüntülerle Köşelilik Analizleri

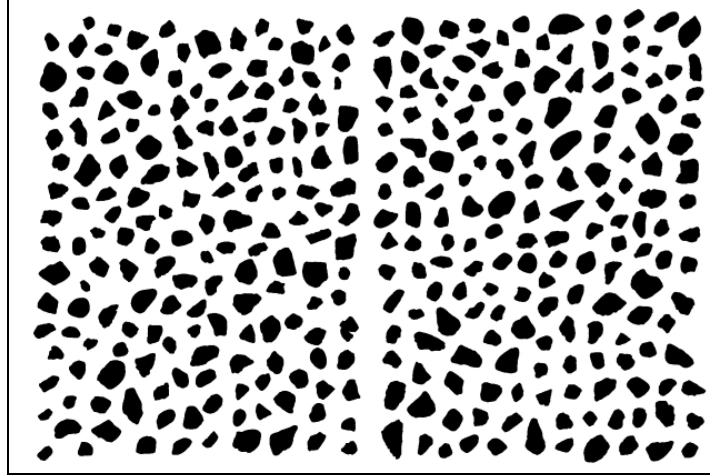
Yüksek çözünürlüklü görüntü analizleri, Ege Beton agrega ocağı doğal teras (N-S7) ve 2 farklı kırıcı ile kırılmış teras agregaları (V-S40; R-S8) ile Kepsut doğal dere malzemesi (N-N2) agregalarında uygulanmıştır. Yüksek çözünürlük için, aydınlatma panelinde daha küçük bir görüntüleme alanında alınan 2’şer ayrı çekimde elde edilen görüntüler birleştirilerek, 0/1 dönüşüm sonucu Şekil 5.77-5.80’deki görüntüler elde edilmiştir. Bu görüntülerde, Aggreganalysis programı ile farklı çevrit açılarında yapılan köşelilik analiz sonuçları Tablo 5.22’de görüldüğü gibidir. En yüksek köşelilik değerleri kırmataş agregalarda (V-S40; R-S8) elde edilmiştir. Teras agregaları dere kumuna göre daha köşelidir. Köşelilik analizinde açı derecesinin küçük seçilmesi ile köşelilik değerleri düşmekte, açı derecesinin artması ile birlikte köşelilik değerleri artmaktadır. Bu nedenle düşük açı dereceleri tanenin yüzey pürüzlülüğünü, daha yüksek dereceden açılsa tanenin köşeli olma durumunu göstermektedir.



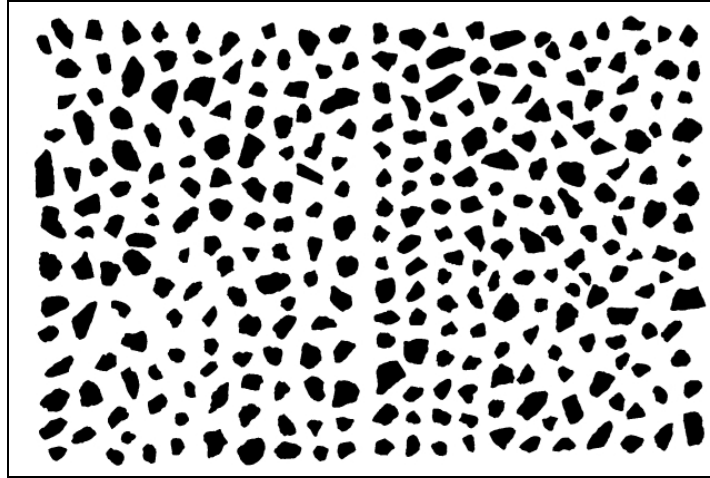
Şekil 5.75 Referans geometriler



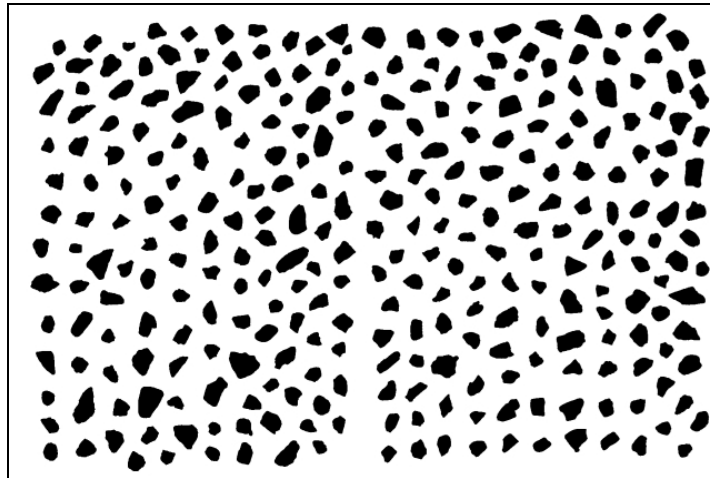
Şekil 5.76 Geometrik öznitelik mertebeleri



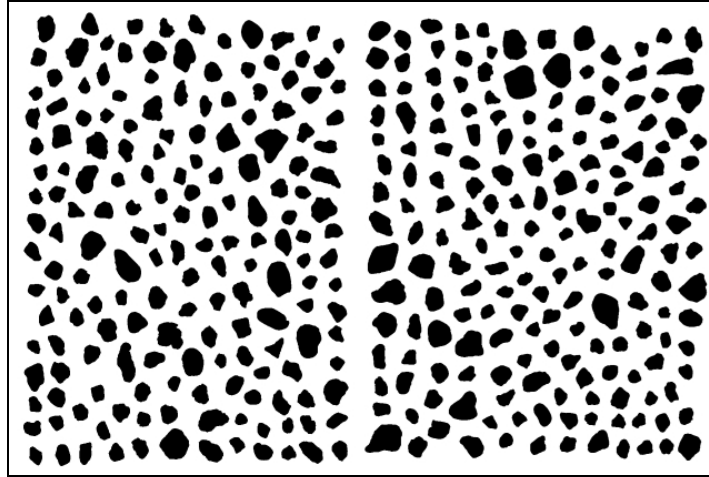
Şekil 5.77 Ege Beton doğal teras agregası (N-S7)



Şekil 5.78 Ege Beton düşey milli teras agregası (V-S40)



Şekil 5.79 Ege Beton-Merdaneli teras agregası (R-S8)



Şekil 5.80 Kepsut Doğal Dere kumu (N-N2)

Tablo 5.22 Farklı kırıcılarla kırılmış agregaların farklı açılardaki köşelilik değerleri

AGREGA	Köşelilik (1°)		Köşelilik (5°)		Köşelilik (10°)	
	Ort.	S.S.	Ort.	S.S.	Ort.	S.S.
N-S7	2,894	1,056	12,309	3,366	22,038	6,521
V-S40	3,076	0,562	13,382	3,069	24,197	6,490
R-S8	2,976	0,505	12,997	2,797	23,198	5,999
N-N2	2,713	0,478	11,526	2,600	20,321	5,586

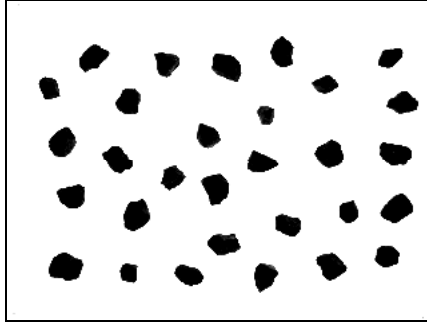
5.6 İri Agregalarda Görüntü Analizleri

Geliştirilen sistemlerle iri agregalarda yapılan görüntü analizleri aşağıda açıklanmıştır.

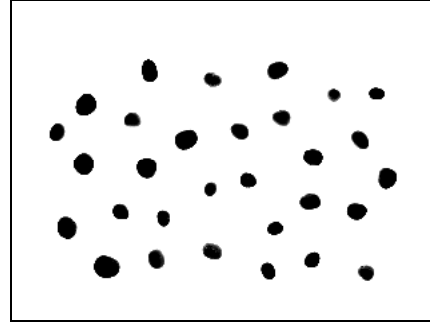
5.6.1 Aydınlatma Panelinde Görüntü Alma ve Analizler

Aydınlık alan tablasında yapılan görüntü analizleri 2 boyutlu analizler ve derinlik bilgisi içeren analizler olmak üzere 2 grupta incelenmiştir. İlk grupta, aydınlık alan panelinde tek kamera ile çekilen agrega görüntü analizleri değerlendirilecektir.

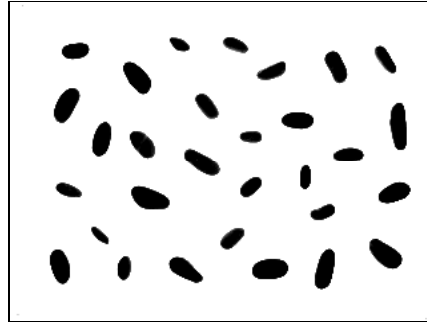
Dalaman doğal agregasından görsel olarak seçilmek sureti ile ayrılan 5 farklı şekil özelliğindeki agregalar ile pürüzlü ve parlak yüzey özelliklerindeki bilyalar, şekil ve pürüzlülük açısından değerlendirilmiştir. Aydınlik alan panelinde alınan görüntülerinde yapılan bu analizler, daha sonra farklı tip agregalarla yapılacak analizler için mertebe tayini amacıyla kullanılacaktır. Bu analizlerden sonra, 3 farklı



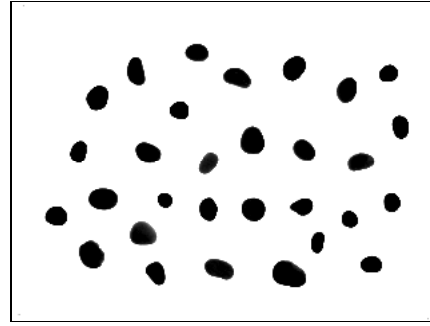
(a) Köşeli



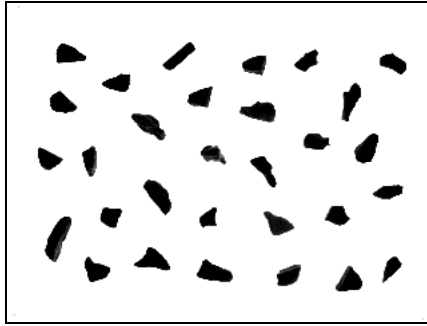
(b) yuvarlak



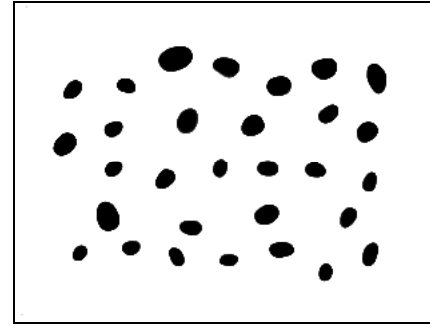
(c) Uzun (Torpil)



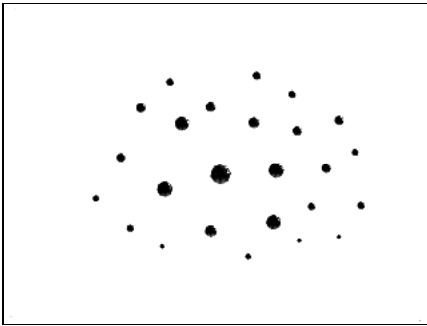
(d) Yassı



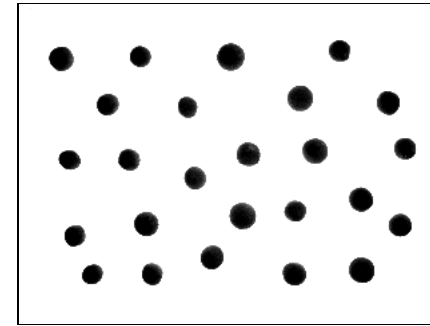
(e) Biçimsiz



(f) Oval

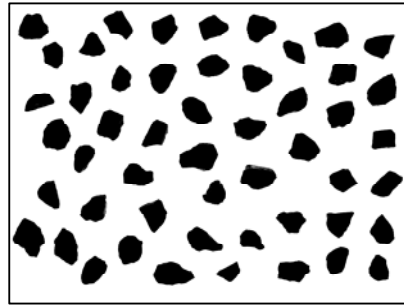


(g) Parlak Bilya

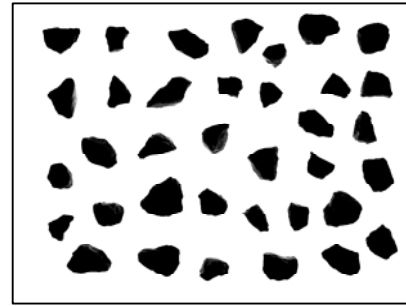


(h) Pürüzlü Bilya

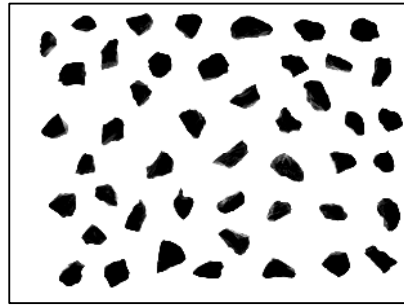
Şekil 5.81 Farklı şekil ve pürüzlülüklerdeki agrega (a-f) ve bilya (g-h) örnekleri



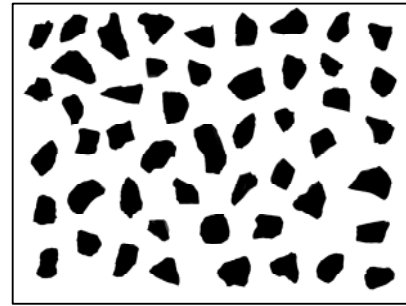
(KD)



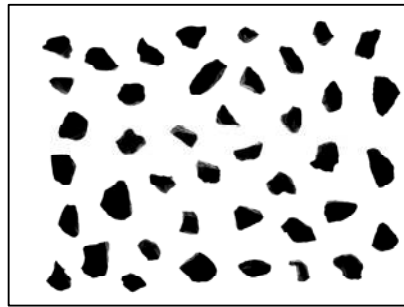
(BD)



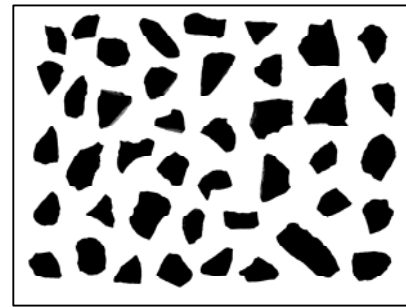
(KC)



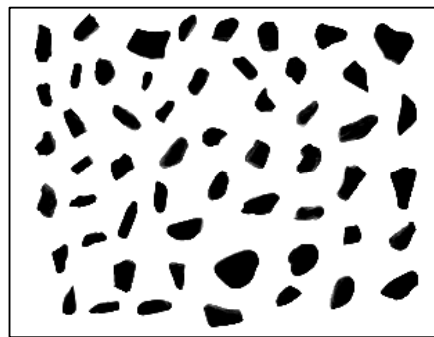
(BC)



(KM)



(BM)



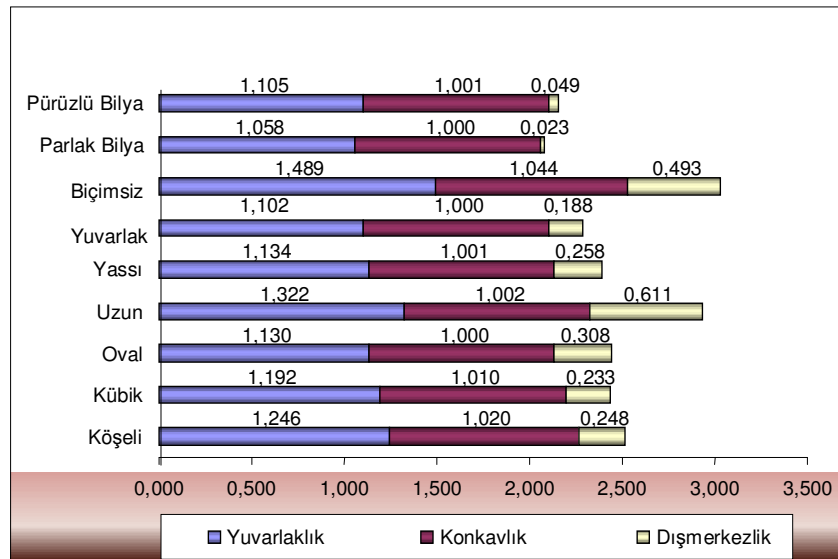
(YU)

Şekil 5.82 Farklı kırıcılarla kırılmış kireçtaşı ve bazalt agregaları

K : Kireçtaşı B : Bazalt D :Düşey milli kırıcı C : Çeneli kırıcı M : Merdaneli kırıcı
YU : Yassı & Uzun

kırıcı ile kırılan kireçtaşı ve bazalt agregaları ile görüntü analizleri yapıp, kırıcı tipine göre agrega şekil ve pürüzlülük özelliklerindeki değişimler değerlendirilecektir.

Görüntü analizinde kullanılacak agrega taneleri Şekil 5.81-5.82’de görülmektedir. Şekil 5.81’deki pürüzlü bilyalar, parlak yüzey özelliğindeki bilyaların 2 mol hidroklorik asit 1 mol nitrik asit karışımında 3 gün süre ile bekletilmesi ve çubuklu değirmende 200 devir cevrimi ile elde edilmiştir. Aggreganalysis programı kullanılarak yapılan görüntü analiz sonuçları ise Şekil 5.83 ve 5.84’de verilmiştir.



Şekil 5.83 Agregaların ortalama Yuvarlaklık & Konkavlık & Dışmerkezlik analizleri

Şekil 5.83’den görüldüğü gibi **Yuvarlaklık**; parlak bilya, yuvarlak agrega ve pürüzlü bilyalarda en küçük değerleri almıştır. Köşeli, Uzun ve Biçimsiz agregalarda sırasıyla değeri artmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü, yuvarlaklık değerinin parlak bilyaya (1,058) göre pürüzlü bilyada (1,105) bir miktar artması ile ayırt edilebilmektedir. Buna göre, Yuvarlaklık değeri 1,000’e yaklaştıkça tanelerin daireselliği artar. Yuvarlaklığın 1,000’den uzaklaşan değerleri önce yüzey pürüzlülüğünü, daha sonra köşeli formu temsil eder. Yuvarlaklık özneliği için köşeli agregaların aldığı değer (1,246)’dır. Bu değerden daha büyük yuvarlaklık değerleri ise uzun formu (1,322) ve biçimsiz formu (1,489) temsil etmektedir. Bu sonuçlar, Şekil 5.76’daki geometrik öznitelik mertebeleri sonuçları ile de paralellik göstermektedir.

Konkav alan değerleri göz önüne alındığında, düzgün geometrik taneler için konkavlık değeri “1,000” ve bire yakın değerler almaktadır. Kübik (1,010), Köşeli (1,020) ve Biçimsiz (1,044) tanelerde ise konkavlık değeri gittikçe artmaktadır. Pürüzlülük özelliği de tanenin çevresine çizilen konkav alan üzerinde etkilidir. Pürüzlü bilyaların parlak bilyalara göre konkavlığı 0,001 birim artmıştır. Tane formunun kübik ve köşeli olması durumunda konkav alan değeri artacaktır. Biçimsiz taneler için bu değer en büyük olacaktır. Şekil 5.76’daki geometrik öznitelik mertebe sonuçları da konkavlık analizlerinden elde edilen sonuçları doğrulamaktadır.

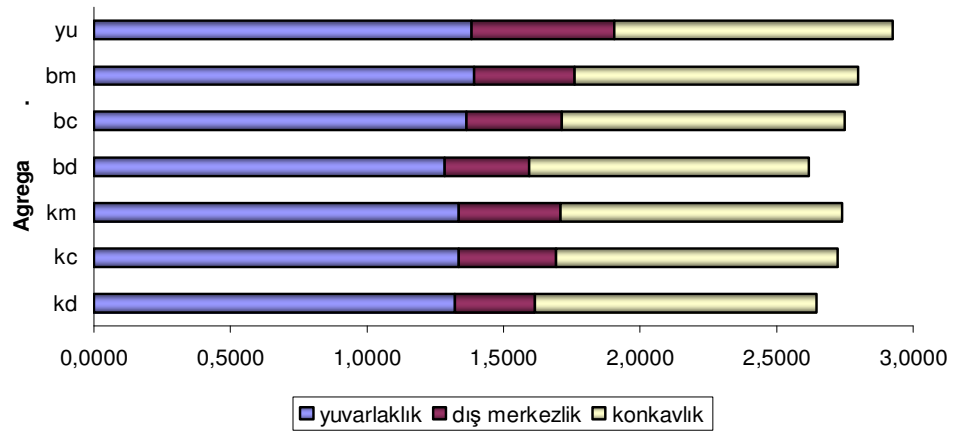
Dışmerkezlik, tanenin uzun formunun göstergesidir. Bu nedenle tam yuvarlak olduğu bilinen parlak bilyada en küçük değerini almıştır (0,023). Pürüzlü bilyalarda tane yüzeyinin pürüzlülüğü nedeniyle dış merkezlik değerinde bir miktar artış görülmektedir (0,049). Beklendiği üzere, dışmerkezlik Uzun (0,611) ve Biçimsiz (0,493) taneler için en büyük değerleri almıştır. Tane formu yuvarlaktan ovale döndükçe dışmerkezliğin değeri artar (0,188 - 0,308). Kübik ve köşeli taneler için dışmerkezlik (0,233-0,248) arasında değerler almıştır. Agrega tane yüzeyinde girinti ve çıkıntılar arttıkça dışmerkezlik değeri de artmaktadır.

Tablo 5.23 ve Şekil 5.84’de darbeli, çeneli ve merdaneli kırıcılarla kırılmış kalker ve bazalt agregalarında, aydınlatma panelli sistem ve aggreganalysis programı ile yapılan görüntü analiz sonuçları görülmektedir. Yassı ve uzun formdaki Dalaman doğal agrega taneleri (yu) de analize dahil edilmiştir.

Tablo 5.23 Farklı kırıcılarla kırılmış kalker ve bazalt agregalarında görüntü analiz sonuçları

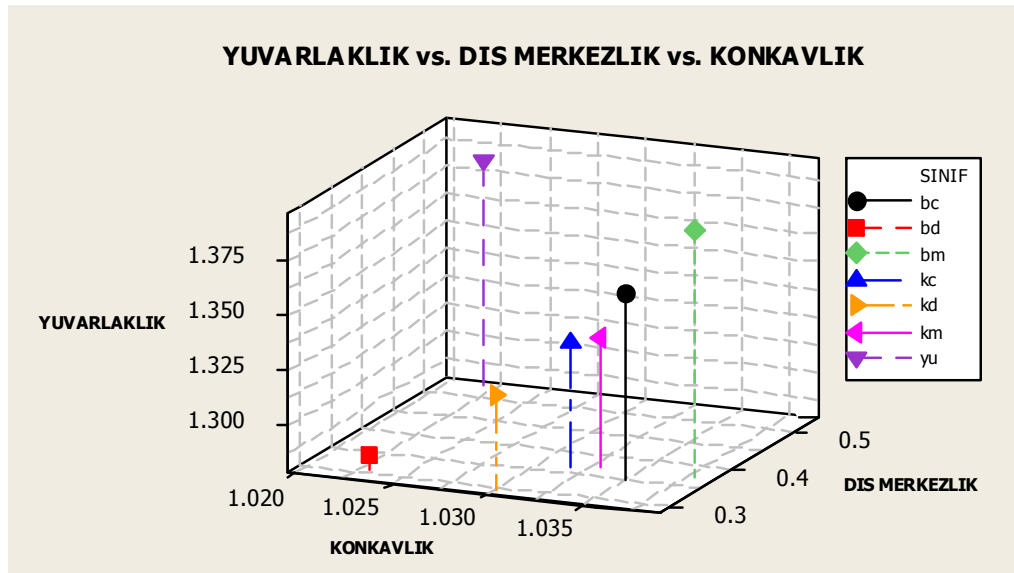
Agrega	Alan		Yuvarlaklık		Dışmerkezlik		Konkavlık	
	Öznitelik	S.S.*	Öznitelik	S.S.	Öznitelik	S.S.	Öznitelik	S.S.
kd	6,957	342	1,321	0,015	0,295	0,022	1,030	0,0028
kc	4,711	142	1,337	0,015	0,355	0,023	1,032	0,0031
km	5,177	248	1,338	0,017	0,369	0,022	1,033	0,0052
bd	5,538	161	1,285	0,009	0,309	0,017	1,023	0,0017
bc	6,016	221	1,364	0,015	0,349	0,022	1,035	0,0030
bm	8,237	455	1,391	0,020	0,370	0,024	1,038	0,0054
yu	3,958	234	1,382	0,016	0,522	0,023	1,022	0,0023

*S.S. = standart sapmalar



Şekil 5.84 Farklı kırıcılarla kırılmış kalker ve bazalt agregalarında görüntü analiz sonuçları

Analiz sonuçlarının 3 eksenli uzaydaki konumları ise Şekil 5.85’de görüldüğü gibidir.



Şekil 5.85 Farklı kırıcılarla kırılmış Kalker ve bazalt agregalarında görüntü analiz sonuçlarının üç eksenli uzayda gösterimi

Şekil 5.84’deki analiz sonuçları Şekil 5.83’deki sonuçlarla karşılaştırıldığında; darbeli kırıcı ile kırılmış bazalt (BD) ve kalker (KD) agregalarının Yuvarlaklık (1,285-1,321), Konkavlık (1,023-1,030) ve Dışmerkezlik (0,309-0,295) öznelikleri köşeli formu işaret etmektedir. Çeneli kırıcılarla kırılmış (BC) ve (KC), merdaneli kırıcılarla kırılmış (BM) ve (KM) agregaların Yuvarlaklık, Konkavlık ve

Dışmerkezlik öznitelik değerleri gittikçe artmaktadır. Yassı ve uzun (kusurlu) olduğu bilinen (YU) agregasında ise Konkavlık dışındaki öznitelik değerleri çok artmıştır. Konkavlık düzgün geometrik şekillerde en küçük değeri aldığından, bu sonuç Şekil 5.85'deki sonuçlar ile de doğrulanmaktadır. Bu durum, tanelerin kübik ve köşeli formdan kusurlu forma doğru özelliklerinin değiştiğine işaret etmektedir.

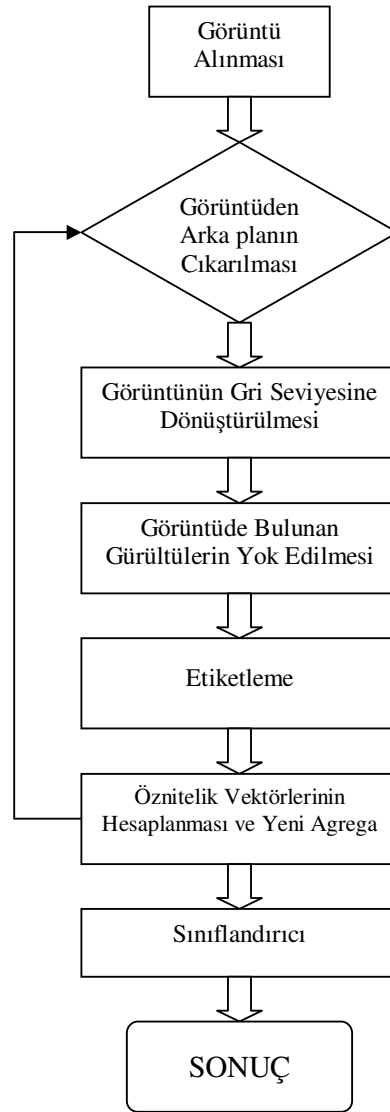
5.6.2 Derinlik Bilgisi İçeren Stereo Görüntü Analizleri

Derinlik bilgisi içeren görüntü analizlerinde işlem adımları Şekil 5.86'daki akış diyagramında görülmektedir. Yapılan analizlerde toplam 7 farklı sınıfa ait agregalar görüntülenmiş ve her sınıfa ait 13 öznitelik vektörü hesaplanmıştır. Başarım testi için Birini Dışarıda Bırak (Leave One Out) (Jaakkola ve Haussler, 1999) yöntemi kullanılmış ve sonuç olarak sınıflandırma başarımı %84,8 bulunmuştur (Tablo 5.25).

Görüntü alımı ve görüntü işleme adımları Bölüm 5.4.1.5'de anlatıldığından burada tekrar edilmemiştir.

5.6.2.1 Öznitelik Vektörü Seçimi

İki boyutlu ve derinlik bilgisi içeren görüntü analizleri ile elde edilen özniteliklerden ortak öznitelik vektörü oluşturmak için, hesaplanan özniteliklerden ayırım gücü en iyi olanlar ($p < 0.001$) t-test ile seçilmiştir. Bu vektör içinden en iyi ayırım gücüne sahip öznitelik kombinasyonunu bulmak ve vektör boyutunu azaltmak için ardışık ileri seçim yöntemi kullanılmıştır. Ardışık ileri seçim yönteminde öncelikle en iyi özniteliği seçip, daha sonra, her defasında yeni bir öznitelik eklenerek kriter fonksiyonunu iyileştiren öznitelik bileşimi bulunmuştur. Bulunan öznitelik vektörleri kullanılarak agrega sınıflandırılması için gerekli sınıflandırıcı tasarlanmıştır.



Şekil 5.86 Görüntü analizi akış şeması

Programın adımları Bölüm 5.3.2.2’de açıklandığı gibidir.

5.6.2.1.1 Sınıflandırıcı Tasarımı:

Sınıflandırma, bir örüntü tanıma sisteminin son aşamasıdır ve bu çalışmada agregaları geometrik özelliklerine göre sınıflandırmak için kullanılacaktır. Sınıflandırıcıların tümü de gözeticilidir ve özellikleri Tablo 5.24’de özetlenmiştir. Sınıflandırıcıların kullanılmadan önce eğitilmeleri gerekmektedir. Eğitim sonucunda

sınıflandırıcı, öznitelik uzayındaki örüntü sınıfları arasında karar sınırları oluşturur. Sınıflandırıcı istatistiksel ise, sınırlar oluşturulurken istatistiksel karar teorisi kullanılır. Bayes karar kuralı, en büyük olabilirlik kuralı ve Neyman-Pearson kuralı iyi bilinen karar kurallarıdır.

Tablo 5.24 Sınıflandırıcıların özellikleri (OKH: ortalama karesel hata)

Sınıflandırıcı	Özellik
Yapay Sinir Ağı	İki veya daha fazla katmanlı sinir ağının transfer fonksiyonlarını kullanarak iteratif OKH optimizasyonu.
Doğrusal Ayırıcı	OKH optimizasyonu kullanan doğrusal sınıflandırıcı.
K-En Yakın Komşu	Başarımı optimize edilmiş bir k değerini kullanarak örüntüyü komşular arasında çoğunluğa sahip gruba atar.
En Yakın Merkez	Örüntüyü, merkezi en yakın gruba atar.
Destek Vektör	Destek vektörlerini kullanarak genel hatayı en aza indirmek için gruplar arasındaki uzaklığı en yüksek düzeye getirir.

5.6.2.1.2 Sınıflandırıcı Başarımı:

Sınıflandırıcı başarımını ölçmek için test verileri kullanılmıştır. Bu yöntemde, örneklerin bir kısmı test amacı ile ayrılır ve sınıflandırıcı, geri kalanların tümü kullanılarak eğitilir. Eğitim sonucunda, ayrılan test grubu ile sınıflandırıcı test edilir ve başarımı ölçülür. Genel başarımı hesaplamak için bu işlem eğitim ve test grupları birden fazla defa rastgele seçilerek tekrarlanır. Sınıflandırıcı başarımı üç temel bileşene sahiptir: Bunlar: Hassasiyet, belirleyicilik ve genel başarımdır. Sınıflandırıcı başarımını karşılaştırmak için, hassasiyet, belirleyicilik ve genel başarımlar oranları yanında sınıflandırıcı etkinlik eğrileri de kullanılacaktır. Bu eğriler, hassasiyet ve belirleyicilik oranları kullanılarak oluşturulur.

Doğrusal ayırıcı (DA), birimlerin gözlenen nitelik değerlerine göre uygun sınıflarına atanması işlemidir. Doğrusal ayırıcı, birimlerin çok sayıdaki özelliğini dikkate alarak, bu özelliklere göre birimlerin doğal ortamdaki gerçek sınıflarına en uygun düzeyde atanmaları amacıyla uygulanır (Özdamar, 2002). Dolayısıyla doğrusal ayırıcı, grupların birbirlerinden en iyi şekilde ayrımını sağlar.

Birimleri iki ya da daha fazla gruba sınıflandırmak için en çok kullanılan istatistiksel yöntem, Fisher'in geliştirdiği "Fisher's Lineer Discriminant analysis" yöntemidir. Fisher, iki ya da daha fazla gruptan gözlenmiş birimleri gruplardan birine sınıflandırmak için, değişkenler üzerinden tanımlanacak doğrusal fonksiyonlar önermiştir. Bu doğrusal fonksiyonlar, gruplar arası farklılığı maksimum yapacak şekilde alınır (Bal ve Örkcü, 2005).

Sınıflama tekniği olan diskriminant analizinde amaç, gruplar arası varyansın grup içi varyansa oranını maksimum kılmaktır. Diskriminant fonksiyonu Denklem 5.18'deki gibidir:

$$D = w_0 + w_1 X_1 + \dots + w_n X_n \quad (5.18)$$

D diskriminant değerini, w_0 sabit değerini, w_i ($i=1,2,\dots,n$) ise, bağımsız değişkenlerin X_i ($i=1,2,\dots,n$) katsayı değerini göstermektedir. Model tahmin edildikten sonra veri seti için diskriminant değerleri hesaplanır ve her bir grubun ortalama değeri bulunur.

Grupların ortalama diskriminant değerlerinden bir kritik değer elde edilir. Test verisi kullanılarak elde edilecek olan diskriminant değerleri, kritik değer ile karşılaştırılır ve gözlemin hangi sınıfa ait olduğuna karar verilir (Çinko, 2006).

Doğrusal programlama teknikleri hiçbir varsayım gerektirmeyen, parametrik olmayan yöntemler iken, istatistiksel DA yöntemleri verinin normal dağıldığını varsayar. Doğrusal programlama teknikleri ile sınıflandırma probleminin incelenmesi ilk defa Fred ve Glover., (1981) tarafından yapılmıştır. Fred ve Glover, sapmalar toplamının minimizasyonuna dayanan bir sınıflandırma modeli önermişlerdir. Bajgier ve Hill, (1982) sınıflandırma probleminde, doğrusal programlama teknikleri ile istatistiksel tekniklerin deneysel bir karşılaştırmasını vermiştir. Bu çalışmalardan sonra, sapmalar toplamının en aza indirgenmesine, yanlış sınıflandırılmış birimlerin en büyük değerlere atanması gibi sınıflandırma kriterlerine dayalı bir çok teknik geliştirilmiştir (Bal, 1999; Erenguc, Koehler, 1990; Lam, Choo ve Moy, 1996). Önerilen model, her birimin sınıflandırma değerini kendi etkinlik değeri ile

ilişkilendiren ve sapmalar toplamının minimizasyonunu da garanti eden bir sınıflandırma modelidir.

Elde edilen bu öznitelik vektörlerinin değerlerine bağlı olarak Fisher doğrusal ayırıcı (Morales ve Fernandez, 2004) fonksiyonlarının katsayıları hesaplanarak, sınıflandırma başarımı hesaplanmıştır. Daha önce Şekil 5.26'da tanımlanmış olan 7 farklı şekil özelliğindeki agregalarda 90° açı ile çekilmiş görüntülerde yapılan sınıflandırma sonuçları Tablo 5.25'de görüldüğü gibidir. Sınıflandırma ve analiz işlemleri Ek-3 ve Ek-4 "Agregalarda Fisher Doğrusal Ayırıcı Analizi"nde görülebilir.

Tablo 5.25 Fisher doğrusal ayırıcı analizi ile agregaların şekil özelliklerine göre sınıflandırılması

		A*	Tahmin Edilmesi Gereken Grup Üyelikleri							Toplam
			1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	
Sınıflandırma Sonucu	Sınıf Sayısı	1,0	13	3	0	0	0	0	0	16
		2,0	2	14	0	0	0	0	0	16
		3,0	0	0	16	0	0	0	0	16
		4,0	1	0	0	12	0	3	0	16
		5,0	0	0	0	0	16	0	0	16
		6,0	0	1	0	0	0	15	0	16
		7,0	0	3	0	0	0	4	9	16
	%	1,0	81,3	18,8	0	0	0	0	0	100,0
		2,0	12,5	87,5	0	0	0	0	0	100,0
		3,0	0	0	100,0	0	0	0	0	100,0
		4,0	6,3	0	0	75,0	0	18,8	0	100,0
		5,0	0	0	0	0	100	0	0	100,0
		6,0	0	6,3	0	0	0	93,7	0	100,0
		7,0	0	18,8	0	0	0	25	56,2	100,0
	Ortalama % = (Toplam grup üyelik %'leri / 7)									84,8

*1,0 = Pürüzlü bilya 2,0 = Parlak 3,0 = Köşeli Agregat 4,0 = Biçimsiz Agregat
 5,0 = Uzun Agregat 6,0 = Yassı Agregat 7,0 = Yuvarlak Agregat

Sonuçlar incelendiğinde, grup içerisine dahil edilen pürüzlü ve parlak bilyaların bile % 81-87,5 oranında doğru olarak sınıflandırdığı görülmektedir. Bu nedenle sistem, farklı geometrik özniteliklere bağlı olarak tane yüzeylerinin pürüzlü olup olmadığını yüksek bir doğrulukta belirleyebilmektedir. Köşeli ve uzun agregalar

%100 doğru olarak sınıflandırılabilir. Ancak, (7) nolu yuvarlak agreganın sınıflandırma sonuçlarına bakıldığında, yuvarlak agregalardan bir kısmının yassı agregaya ve parlak bilya olarak sınıflandırıldığı görülmektedir. Geometrik yapıları benzer olan yuvarlak agregalarla bilyaların sınıflandırma sonuçlarının karışması doğaldır. Analize bilyalar dahil edilmediği takdirde ortalama başarımlar % 91'e yükselmektedir. Agregaların beton ve asfalt karışımlarında kullanım açısından kabul kriterleri dikkate alındığında; yassı, uzun ve biçimsiz agregaların beton karışımlarında bulunmasının uygun olmadığı dikkate alınarak, kabul ve ret koşulları düşünüldüğünde başarımlar % 98'e yükselmektedir.

Sınıflandırmada, yassı agregalardan (6) bazılarının parlak bilyalarla, bazı biçimsiz agregaların da uzun agregalarla karıştırıldığı görülmektedir. Başarımlar daha yüksek bir sınıflandırma için 2 farklı açıdan çekilen görüntülerde derinlik bilgilerinin çıkarılmasının gerekliliği ortadadır.

Sınıflandırma başarımlarını arttırmak için, agreganın tanelerinin derinlik bilgileri ile 3. boyutuna dair bilgilerin elde edilmesi gereklidir. Bu nedenle görüntü analizlerinde, derinlik bilgilerini içerecek şekilde 45° açı ile çekilen görüntüler de sınıflandırıcıya dahil edilmiştir. Çok sayıda agreganın 45° ve 90° açılarda çekilen görüntüleri ile yapılan, görüntü işleme ve öznitelik vektörlerinin çıkarılması işleminden sonra, Fisher Lineer Discriminant analizi ile agregaların şekil özelliklerine göre sınıflandırma sonucu Tablo 5.26'de görülmektedir.

Stereo yöntemle agregalarda derinlik bilgilerinin çıkarılabileceği iki boyutlu analiz için yüksek çözünürlüklü CCD kameralar kullanılmıştır. Bu kameralardan 45° ve 90° açı ile alınan görüntülerden her bir açı için 9 adet olmak üzere toplam 18 öznitelik vektörü hesaplanmıştır. Bu özellikler, agregaların geometrik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan en iyi özellik ayrımı yapan Fisher Lineer Discriminant analizleri kullanılmıştır.

Analiz sonuçları 5 farklı geometrik şekil sınıflandırmasında orijinal görüntü gruplarının % 96,2'si çapraz üyelik grupları %95,4'ü doğru olarak sınıflandırılmıştır (Ek. B). Bu agregalardan uzun ve yuvarlak agregalar %100 başarımlarında

sınıflandırılabilir. Köşeli ve biçimsiz agregalar sınıflandırmasında bazı agregaların sınıflandırma sonuçlarının karıştığı görülmektedir. Bu durumun nedeni biçimsiz agregalardan bazılarının da köşeli özellikler gösterebilmesidir. Ancak genel olarak sistemin sınıflandırma başarıları çok yüksektir.

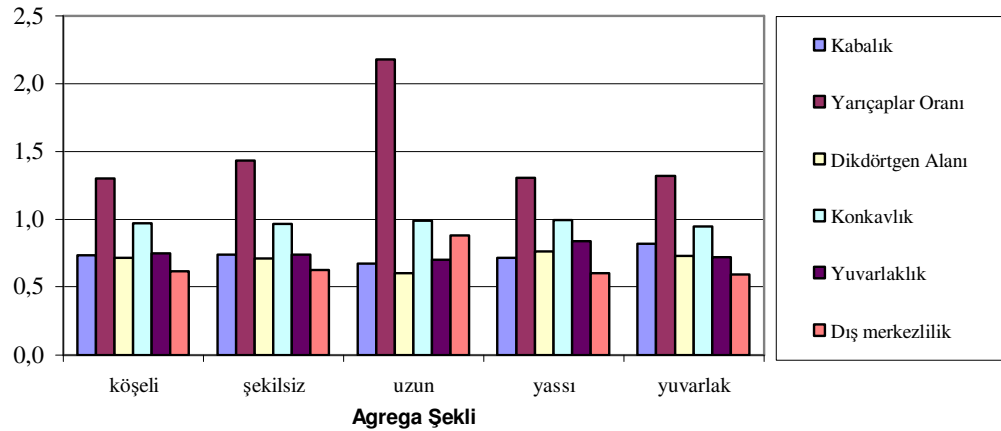
Tablo 5.26 Fisher doğrusal ayırıcı analizi ile agregaların şekil özelliklerine göre sınıflandırılması

		A	Tahmin edilen grup üyelikleri					Toplam
			1	2	3	4	5	
Orijinal	Sımf sayısı	1	46	2	0	0	0	48
		2	5	46	0	0	0	51
		3	0	0	17	0	0	17
		4	0	0	2	46	0	48
		5	0	0	0	0	73	73
	%	1	95,8	4,2	0	0	0	100,0
		2	9,8	90,2	0	0	0	100,0
		3	0	0	100,0	0	0	100,0
		4	0	0	4,2	95,8	0	100,0
		5	0	0	0	0	100,0	100,0
Başarım		Ortalama % = (Toplam grup üyelik %'leri / 5)					96,2	
Çapraz üyelik	Sımf sayısı	1	46	2	0	0	0	48
		2	7	44	0	0	0	51
		3	0	0	17	0	0	17
		4	0	0	2	46	0	48
		5	0	0	0	0	73	73
	%	1	95,8	4,2	0	0	0	100,0
		2	13,7	86,3	0	0	0	100,0
		3	0	0	100,0	0	0	100,0
		4	0	0	4,2	95,8	0	100,0
		5	0	0	0	0	100,0	100,0
Başarım		Ortalama % = (Toplam grup üyelik %'leri / 5)					95,4	

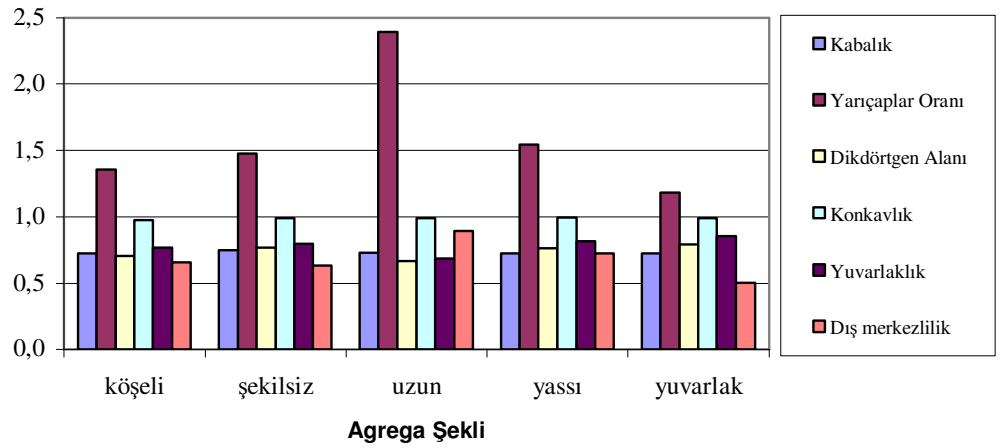
*1 = Köşeli Agregalar 2 = Biçimsiz Agregalar 3 = Uzun Agregalar 4 = Yassı Agregalar 5= Yuvarlak Agregalar

5.6.2.2 Farklı Geometrik Özelliklerdeki Agregaların Öznitelikleri

Farklı şekil özelliğindeki agregalar örneklerinde, iki farklı açıdan çekilen stereo görüntülerden MatLab® Image Processing Toolbox kullanılarak yapılan görüntü analizlerinde 5 farklı geometrik öznitelige ait değerler Şekil 5.87 ve 5.88'de verilmiştir.



Şekil 5.87 45° açı ile çekilen agregâ görüntülerinin analiz sonuçları



Şekil 5.88 90° açı ile çekilen agregâ görüntülerinin analiz sonuçları

Kabalık (Rugosity) yuvarlak agregalar için en büyük değerini almakta, uzun agregalar için en düşük olmaktadır. Yarıçaplar oranı farklı şekildeki taneleri değerlendirmede sonuçları açısından en belirgin olan sınıflandırma ölçüsünü vermektedir. Yüksek dereceden düzgün olmayan taneler en küçük yarıçapa sahip olacaklar ve yarıçaplar oranı da artacaktır. Bu nedenle, uzun agregalar en büyük yarıçaplar oranını vermektedir. Dikdörtgen alanı (%)’si biçimsiz ve yuvarlak (aynı zamanda parlak ve pürüzlü bilyalar için) agregalar için en büyük değerlerini almaktadır. Uzun agregalar için % dikdörtgen alanı en küçük değerini almaktadır.

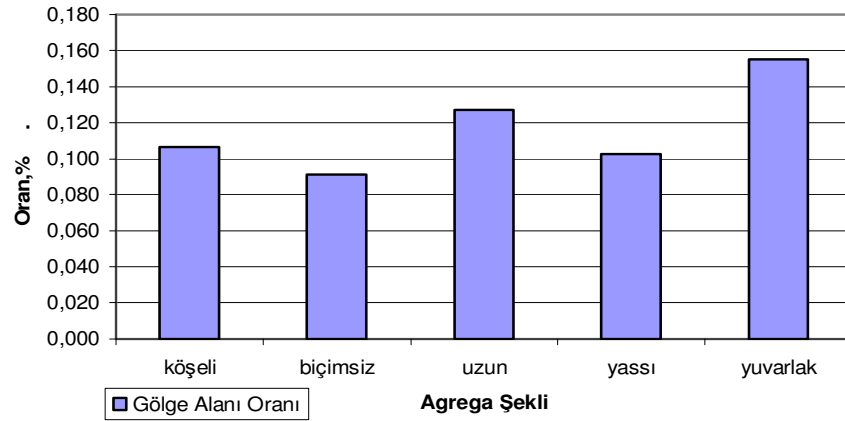
Konkav alanının özellikle köşeli, biçimsiz ve pürüzlü agregalarda en küçük değerleri vermesi beklenmektedir. Çünkü tane köşeleri ve pürüzlülük konkav alanını büyütmektedir. Yapılan analizde, özellikle 45° açı ile çekilen görüntülerin analiz sonuçları köşeli ve biçimsiz taneler için minimum olmakla birlikte, yuvarlak agregalar için de düşük değer almaktadır. Bu bakımdan daha çok örnekleme sayısı artırılarak sonuçların tekrar değerlendirilmesi gerekmektedir.

Yuvarlaklık beklendiği üzere, bilya örnekleri ve yuvarlak agregalarda en büyük değerleri almaktadır. Ancak 45° açı ile çekilen örneklerde yassı agregalar da yuvarlaklık yüksek değerler alabilmektedir. Bu nedenle, gölge alanları oranının bulunması ile yassı örneklerde gölge alanını minimum olacağından yassı ve yuvarlak agregalar sınıflandırılabilir.

Dışmerkezlik; uzun, yassı, köşeli ve biçimsiz agregalarda sırası ile en büyük değerleri almakta, yuvarlak agrega ve bilyalarda değeri düşmektedir.

Bütün bu sonuçlar daha önce ince agregalarda yapılan ve mertebe belirleme de kullanılan şekil özelliklerinden elde edilen sonuçlarla paralellik göstermektedir.

Öznitelik vektörlerinden biri de Şekil 5.89’de görülen gölge alan oranlarıdır. En büyük gölge alanı oranı, yüksekliği en fazla olan yuvarlak örneklerde elde edilmiştir. Uzun ve köşeli tanelerde bu oran azalmaktadır. Yassı taneler için gölge alanı oranı daha da azalmakta ve biçimsiz agregalarda en küçük değerini almaktadır.



Şekil 5.89 Farklı şekilli agrega ve bilyalarda gölge alanı oranları

5.6.2.3 Farklı Kırıcı Tipleri ile Kırılmış Agregalarda Görüntü Analizleri

Farklı kırıcı tipleri ile kırılmış kalker ve bazalt agregalarından aydınlatma panelinde yapılan görüntü analizleri Bölüm 5.5.1’de verilmişti. Aynı agregalarda stereo görüntüleme sistemi ile yapılan Fisher doğrusal ayırıcı analizlerde sonuçları Tablo 5.27’de görüldüğü gibidir. Her bir farklı kırıcı ile kırılmış agrega örneği için tanelerin şekil özelliklerine göre sınıflandırılması bu şekilde yapılabilmektedir.

Fisher doğrusal ayırıcı analizinde kullanılan öznitelik değerleri 45° ve 90° kamera açıları için Şekil 5.90 ve 5.91’de verilmiştir. Elde edilen özniteliklerin değişim (varyasyon) katsayıları ise Şekil 5.92 ve Şekil 5.93’da görülmektedir.

Şekil 5.94’de Ek-3 ve Ek-4 de detayları verilen farklı kırıcı tipleri ile kırılmış agregaların kanonik diskriminant fonksiyonları verilmiştir

Tablo 5.27 Fisher doğrusal ayırıcı analizi ile kırmataş agregaların şekil özelliklerine göre sınıflandırılması

		A	Tahmin Edilen Grup Üyelikleri						Toplam
			1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	
Orijinal	Sayı	1.0	20	2	7	0	4	3	36
		2.0	6	14	9	1	6	3	39
		3.0	6	12	15	1	0	2	36
		4.0	1	1	0	38	4	5	49
		5.0	0	2	1	13	20	14	50
		6.0	2	1	1	11	10	24	49
	%	1.0	55.6	5.6	19.4	.0	11.1	8.3	100.0
		2.0	15.4	35.9	23.1	2.6	15.4	7.7	100.0
		3.0	16.7	33.3	41.7	2.8	.0	5.6	100.0
		4.0	2.0	2.0	.0	77.6	8.2	10.2	100.0
		5.0	.0	4.0	2.0	26.0	40.0	28.0	100.0
		6.0	4.1	2.0	2.0	22.4	20.4	49.0	100.0
Çapraz üyelik	Sayı	1.0	16	5	7	0	5	3	36
		2.0	8	8	11	1	8	3	39
		3.0	8	13	11	1	1	2	36
		4.0	1	1	0	37	5	5	49
		5.0	0	4	1	15	13	17	50
		6.0	2	2	1	11	12	21	49
	%	1.0	44.4	13.9	19.4	.0	13.9	8.3	100.0
		2.0	20.5	20.5	28.2	2.6	20.5	7.7	100.0
		3.0	22.2	36.1	30.6	2.8	2.8	5.6	100.0
		4.0	2.0	2.0	.0	75.5	10.2	10.2	100.0
		5.0	.0	8.0	2.0	30.0	26.0	34.0	100.0
		6.0	4.1	4.1	2.0	22.4	24.5	42.9	100.0

*1,0 = KD

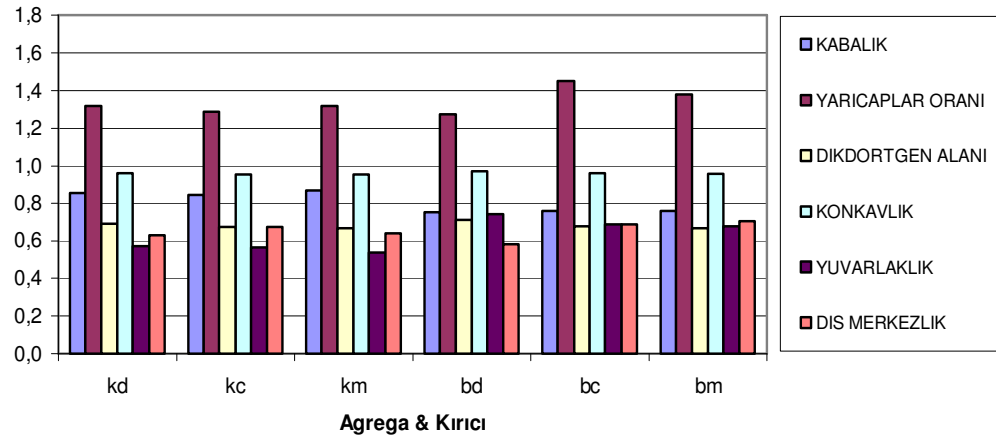
2,0 = KÇ

3,0 = KM

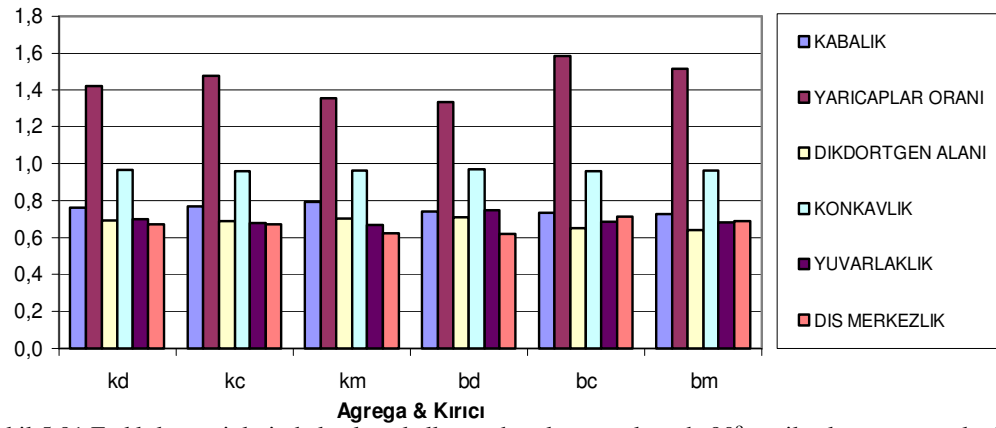
4,0 = BD

5,0 = BÇ

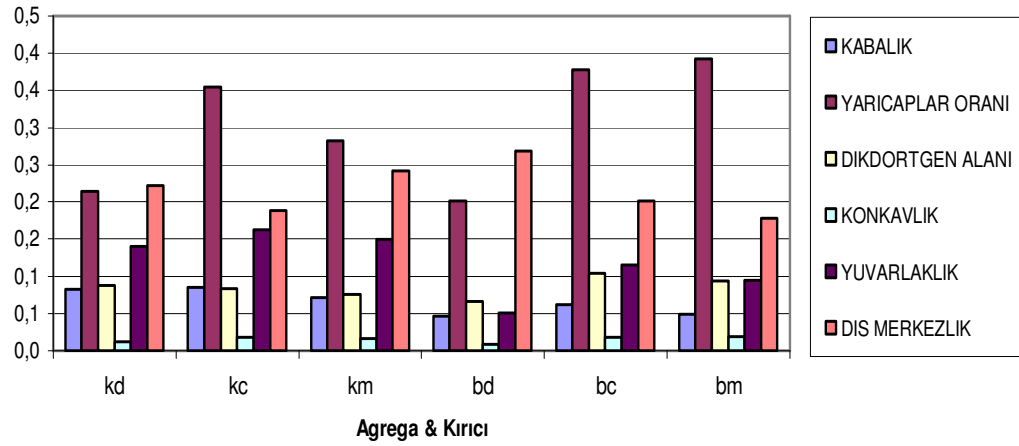
6,0 = BM



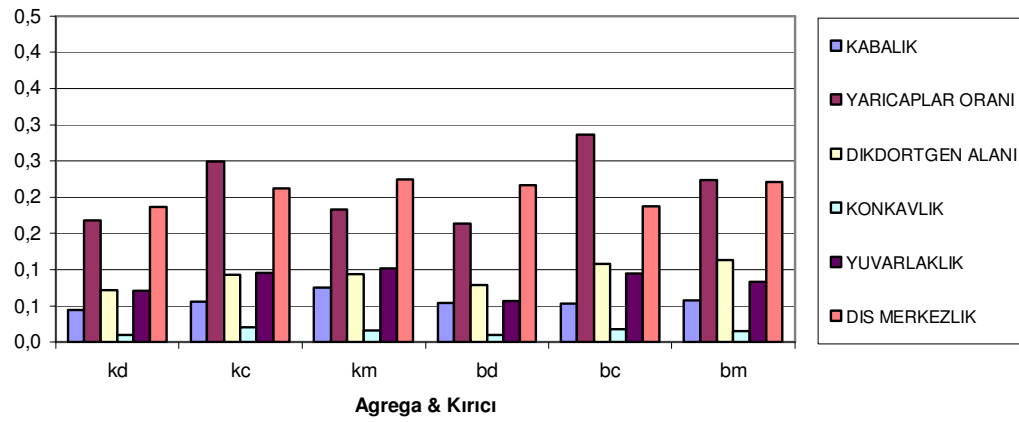
Şekil 5.90 Farklı kırıcı tiplerinde kırılmış kalker ve bazalt agregalarında 45° açı ile alınan görüntülerde yapılan görüntü analizleri sonuçları



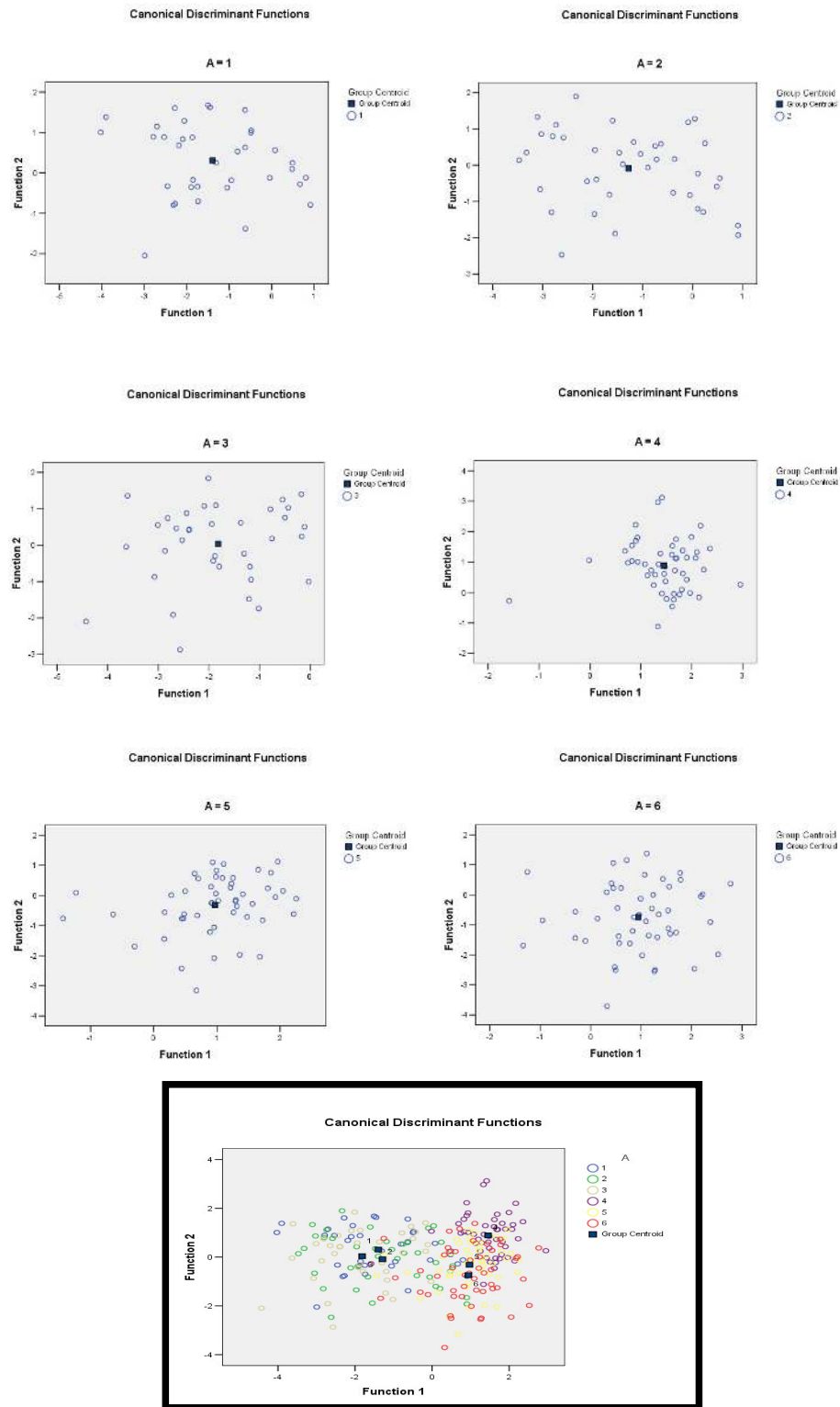
Şekil 5.91 Farklı kırıcı tiplerinde kırılmış kalker ve bazalt agregalarında 90° açı ile alınan görüntülerde yapılan görüntü analizleri sonuçları



Şekil 5.92 Farklı kırıcı tiplerinde kırılmış kalker ve bazalt agregalarında 45° açı ile alınan görüntülerde yapılan görüntü analizlerinde özniteliklerin değişim katsayıları



Şekil 5.93 Farklı kırıcı tiplerinde kırılmış kalker ve bazalt agregalarında 90° açı ile alınan görüntülerde yapılan görüntü analizlerinde özniteliklerin değişim katsayıları



Şekil 5.94 Farklı kırıcı tipleri ile kırılmış agregaların kanonik diskriminant fonksiyonuna göre ağırlık merkezleri

5.7 Sonuç ve Öneriler

Agrega şeklinin ve yüzey pürüzlülüğünün ölçüsü olan mekanik deney yöntemlerinin (TS EN 933-6, ASTM C1252) en önemli problemi agreganın şekli, köşeliliği ve yüzey pürüzlülüğünü tek tek ifade edememeleri ve bu özellikler arasında doğrudan bir ilişki kuramamalarıdır. Görüntü analiz yöntemleri ile mekanik yöntemlere kıyasla çok daha kısa sürelerde daha yüksek doğrulukla agreganın geometrik özellikleri belirlenebilmektedir. Aynı zamanda taneler geometrik özelliklerine göre sınıflandırılabilir. Agregaların çeşitli tane özelliklerinin otomatik olarak ölçülebilmesi, mekanik olarak yapılan standart yöntemlerde yaşanan olumsuzluklarının giderilmesi açısından büyük öneme sahip olacaktır. Görüntü analizleri, ince ve iri agregalarda Bölüm 2.2 de tanımlanan agreganın geometrik özellikleri ile ilgili şekil ve yüzey dokusu tanımlamalarının belirlenmesine olanak tanıyacaktır.

Agregalarda görüntü analizi amacıyla hazırlanan aydınlatma panelli sistemde, öncelikle literatürde gözlenen hatalardan sakınılması amaçlanmıştır. Deneme çekimleri sırasında görüldüğü üzere, hızlı ve güvenilir bir analiz için homojen aydınlatma gereklidir. Agregaların düzensiz şekilleri nedeni ile aydınlatmanın yan yüzeylerden ya da üstten yapılması durumunda tane kenarları boyunca ve tane şekline bağlı olarak gölge oluşumları meydana gelmektedir. Bu nedenle görüntü alımında bu çalışmaya özgü olan aydınlatma panelli sistem geliştirilmiştir. Aydınlatma paneli alttan aydınlatılmaktadır. Agreganın taneleri bu panel üzerinde belirlenen alana dizilerek görüntüleme uygun aydınlatma koşullarında yapılabilmektedir. Homojen aydınlatmanın sağlanması, görüntü işleme süresini azalttığı gibi aynı zamanda görüntü işleme sırasında oluşacak muhtemel veri kayıplarının giderilmesi açısından önemlidir.

Qwin[®] Plus gibi ticari programlar agregaların bazı geometrik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Ancak sistemler agregalarda görüntü analizi amacıyla yönelik geliştirilmediğinden, özellik ayrımını daha iyi yapacak analiz programına ve sınıflandırıcıya ihtiyaç vardır. Elde edilecek şekil özelliklerinin çeşitlendirilmesi bakımından C++ de programla dilinde yazılan AGGREGANALYSIS programı

agrega geometrik özelliklerini belirlemek amacıyla alternatif ve daha etkili bir çözüm olarak verilmiştir. Bu program sayesinde, birbiri ile doğrusal korelasyonu olmadığı belirlenen 4 farklı geometrik özellik belirlenebilmektedir. Agregada köşeliliğinin belirlenmesinde literatürde tanımlanandan farklı olarak yeni bir köşelilik fonksiyonu tanımlanmıştır. Hazırlanan arayüz programı ile sisteme kullanım kolaylığı özelliği de eklenmiştir. Bölüm 2 Literatür’de açıklanan mevcut sistemler ince ya da iri agregalarda analiz yapılmasına imkan veren sistemlerdir. Bununla birlikte, geliştirilen Aydınlatma panelli sistem ve Aggreganalysis programı hem ince hem de iri agregalarda görüntü analizi için kullanılabilecektir.

İri agregalarda tanelerin 3. boyutu ile ilgili veri alabilmek ve taneleri şekil özelliklerine göre sınıflandırabilmek amacıyla aydınlatma panelli sistem 2 farklı açıdan (stereo yöntem) görüntü alabilmek üzere modifiye edilmiştir. Stereo görüntüleme sistemi insan gözünün yapay bir modelidir. Stereo görüntü, nesnelerin iki farklı açıdan örüntülenmesi ile sağlanır. Bu nedenle yöntemde agregaların yükseklik bilgileri de değerlendirilmektedir. Elde edilen görüntülerin derlenmesi sonucu agregada yapılarını en iyi tanımlayan, öznitelik vektörleri bulunmuş ve agregada yapılarını en iyi tanımlayan öznitelik vektörleri Fisher doğrusal ayırıcı analizi ile seçilmiştir.

Bu yöntemle, öncelikle 7 farklı sınıfa ayrılan agregalardan (Pürüzlü bilya, parlak bilya, Köşeli, Biçimsiz, Uzun, Yassı, Yuvarlak) tek kamera ile 90°’den alınan görüntüler alınmış ve yapılan analizlerde her sınıfa ait 13 öznitelik vektörü hesaplanmıştır. Fisher doğrusal ayırıcı analizinde “Leave One Out” yöntemi kullanılarak yapılan başarımlar testinde, agregalar tane şekline göre %84,8 oranında başarı ile sınıflandırılmıştır. Sınıflandırıcı başarımlar oranını arttırmak amacıyla, iki farklı açıdan çekilen görüntülerde yapılan analizlerde ise, Fisher doğrusal ayırıcılığı sınıflandırma başarımları %95,8’e yükselmiştir. Bu bakımdan, iri agregaların geometrik özelliklerinin belirlenmesi ve sınıflandırılmasında derinlik bilgileri içeren görüntü analizlerinin yapılması uygun olacaktır.

Agregalarda görüntü analizi işlemleri için öznitelik belirleme ve sınıflandırma işlemleri, beton ve asfalt üretimi için uygun özelliklerde agregada temini, agregada üretim

denetimi ve kusurlu tane oranlarının belirlenmesi gibi çeşitli amaçlar için kullanılacak işlemlerin ilk basamağını teşkil etmektedir. Bu çalışmanın geliştirilmesi ile kırıcıdan çıkan ve bant üzerinde ilerleyen agregalardan görüntüler alma, bu görüntülerin analizi mümkün olabilecektir. Bu sayede kırma yöntemi, eleme sistemi ve tane boyut dağılımı düzenlemelerinin kontrollü olarak yapılabileceği otomasyon sistemlerinin geliştirilmesi ve kullanım amacına uygun olarak agrega üretimi ve denetimi yapılabilecektir.

Bölüm 5.4.2’de prototipi hazırlanan lazer kameralı sistem, agregalarda 3 boyutlu görüntü analizi için yüzey tarama amacıyla kullanılabilecektir. Bu amaçla MatLab Programı kullanılarak hazırlanan yazılım ve arayüz geliştirilmiştir. Arayüz kullanım kolaylığı açısından işlem hızını ve güvenilirliğini arttırmaktadır. Az sayıda yapılan agrega analizlerinde, ASTM D 4791 yöntemi ile birebir uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ancak sistemin kullanılabilir olması için hızlı analize imkan vermesi açısından modernize edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmaya özgü olarak tasarlanan görüntüleme sistemlerinden biride Sanal kameralı sistemdir. Literatürde incelenen birçok sistemde 3. boyutlu görüntüleme için birden fazla kamera kullanan sistemler kullanılmaktadır. Bu durum kamera maliyetleri yanında kameraların senkronize çalışabilmesi için ilave donanım ve aydınlanma koşullarının sağlanması gerektirmektedir. Kontrol parametrelerinin fazla olması yazılımın hızını da olumsuz yönde etkiler. Geliştirilen sistemle bir kamera ve sanal kamera olarak kullanılacak 4 ayna ile 3. boyuta en yakın öznitelikler çok daha az donanım ve maliyetlerle sağlanabilecektir. Sistemin kalibrasyonu yapılmış ve örnek agregalarda deneme çekimleri yapılmıştır. Sistematik analizlerin yapılması ile yöntemin kısa zamanda etkin olarak kullanılması planlanmaktadır. Yöntem, agregalar dışında obje tanımlama ve kalite kontrol amacı ile farklı uygulama alanlarında da kullanılabilir.

Tez kapsamında geliştirilen ve Bölüm 2’de tanımlanan sistemlerle ilgili genel bir değerlendirme Tablo 5.28’de verilmiştir. Tabloda performanslar “0” için en düşük “2” için en yüksektir.

Tablo 5.28 Agregâ geometrik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan ve geliştirilen yöntemlerin performans

	Yöntem	Agregâ Boyutu	Ölçüm	Güvenilirlik	Donanım	Maliyet	Otomasyon	Zaman	Uygulama Kolaylığı	TOPLAM
Mekanik Yöntemler	Akış katsayıları, TS EN 933-6	2	0	0	0	2	0	0	0	4
	İnce agregalarda sıkışmamış boşluk oranı, ASTM C1252	2	0	0	0	2	0	0	0	4
	Sıkışmış agregâ mukavemeti, CAR test	0	1	1	1	1	0	0	1	5
	Agregâ tane şekli ve pürüzlülüğü indeksi, ASTM D3398	2	0	0	0	2	0	0	0	4
	Yassı ve Uzun tane oranı, TS EN 933-3, ASTM D4791	0	2	1	0	2	0	0	0	5
	İri agregâda kırılmış tane yüzdesi, TS EN 933-5 ASTM D5821	0	0	1	0	2	0	0	0	3
	İri agregâ tane şeklinin belirlenmesi-Yassılık indeksi BS 812, Bölüm 105	0	2	1	0	2	0	0	0	5
Görüntüleme yöntemleri	VDG-40 Video Grader	1	1	1	2	1	2	2	2	12
	Illinois üniversitesi agregâ görüntü analiz sistemi, UIAIA	2	2	2	2	1	2	2	2	15
	Lazer Esaslı agregâ analiz sistemi, LASS	2	2	2	2	1	2	2	2	15
	Agregâ görüntüleme sistemi, AIMS	1	1	1	2	1	2	1	2	11
	Bilgisayarlı tane analiz cihazı, W.S.Tyler Co	1	1	1	1	1	2	1	2	10
	X-ray CT	2	2	2	2	0	2	0	0	10
	Aydınlatma panelli sistem +Stereo	2	2	2	2	2	1	1	1	13
	Lazer kameralı sistem	1	2	2	2	1	2	1	2	13
	Sanal kameralı sistem	2	2+	2+	2+	2+	2	2	2	16

*Performans derecelendirmesi “0” için en düşük, “2” için en yüksektir.

Tablo 5.28 incelendiğinde, geliştirilen yöntemler arasında yapılan performans değerlendirmesinde sanal kameralı sistemin diğer yöntemlere göre daha avantajlı olduğu görülmektedir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda; her bir agrega tanesinin geometrik özellikleri; alan, çevre, en, boy, yuvarlaklık, konkavlık, köşelilik, dış merkezlik gibi temel geometrik özellikleri ile ifade edilmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda üzerinde çalışılması önerilen konular aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Temel geometrik özellikler yanında çeşitli agrega tanelerinin radiometrik ve derinlik görüntüleri üzerinde doku analizleri uygulanarak dokusal özellikleri (Birlikte bulunma matrisi üzerinde tanımlanan klasik öznitelikler gibi) belirlenmesi.
- Moment yöntemi, Fourier tanımlayıcıları, Dalgacık dönüşümü yöntemi, Eğrisel büyüklük uzayı (Curvature scale space), Ortak oluşum (co-occurrence) matrisi, Gauss-Markov rassal alan (GMRF) model yöntemi gibi dönüşümlerin de kullanılmasıyla kolayca belirlenemeyen bazı geometrik özelliklerin de ortaya çıkarılması.

BÖLÜM ALTI

ÇİMENTO HARCİ VE BETON DENEYLERİ

Bölüm 5’de, agregâ temini ve agregâ fiziksel özelliklerinin belirlenmesi çalışmalarından elde edilen veriler doğrultusunda; farklı şekil ve yüzey dokusu özelliklerindeki agregalar, çimento harcı ve beton karışımlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesine yönelik deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere seçilmiştir. Bu amaçla çalışma kapsamında, farklı şekil ve yüzey dokusu özelliklerindeki agregalar değerlendirilecektir.

6.1 Çimento Harcı Deneyleri

Çimento harcı deneyleri kapsamında, öncelikle farklı kırıcılarda kırılmış kireçtaşı ve teras ocağı ince agregalarının şekil ve yüzey pürüzlülükleri dolaylı yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Karışımlarda kullanılacak malzemelerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri verildikten sonra, hazırlanan çimento harçlarının mekanik özellikleri değerlendirilmiştir.

Çimento harçlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesinde çeşitli ülke standartlarında farklı yöntemler önerilmektedir. Ülkemizde ise TS EN 196-1’de “Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım” çimento harcının basınç dayanımının 40 mm ayrıtlı eşdeğer küpler üzerinde test edilmesi önerilmektedir. Örnekler, hazırlanan 40x40x160 mm boyutlu prizmalarda önce eğilme deneyi uygulanması ile elde edilir. Eğilme deneyi sonrasında iki parçaya ayrılan yarım prizmalar üzerinde basınç deneyi yapılır. Bu amaçla, yarım prizmalar sert metalden iki levha arasına bir aparat yardımı ile konularak tek eksenli basınç deneyine tabi tutulur. Deney standardında karışımların CEN (European Committee for Standardization-Avrupa Standard Komitesi) standart kumu kullanılarak hazırlanması gerektiği belirtilmektedir. Ancak çalışma kapsamında agregâ şekli ve yüzey dokusu özelliklerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çimento harcının dayanımı; çimentonun özelliklerine, su/çimento (S/Ç) oranına, agregâ-çimento hamuru aderansına, agregâ granülometrisi ve şekil özelliklerine ve kür koşulları vb.

faktörlere bağlıdır. Bu nedenle yalnızca agregalar çeşitlendirilerek, tüm karışımlar aynı karışım oranlarında üretilmiş ve kür edilmiştir.

6.1.1 Karışımlarda Kullanılan Malzemeler

Çimento harcı karışımlarında kullanılan malzeme özellikleri aşağıda verilmektedir.

6.1.1.1 İnce Agregalar

Bölüm 5’de verilen agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğü ile ilgili dolaylı ölçüm yöntemlerinin sonuçları göz önünde bulundurularak, birbirleri ile yakın sonuçlar veren agregalar elenmiştir. Çimento harcı üretiminde kullanılmak üzere Tablo 5.2’de bazı özellikleri verilen V-L38, V-S40, R-S8, N-S7, N-N2 agregaları seçilmiştir.

Bu agregalar mineralojik kökenlerine göre 2 farklı gruba ayrılmıştır. Birinci grup; Dere Madencilik A.Ş.’den temin edilen, darbeli kırıcı ile kırılmış kireçtaşı (V-L38), ve aynı agreganın ocaktan işlenmemiş halde alınarak laboratuvar tipi çeneli ve merdaneli kırıcılarda kırılması ile elde edilen C-L38 ve M-L38 agregalarıdır. İkinci grup ise; Ege Beton A.Ş.’den temin edilen doğal teras agregası (N-S7), bu agreganın düşey milli ve merdaneli kırıcılarla kırılması ile elde edilen (V-S40, R-S8) agregaları ve doğal nehir agregasıdır (N-N2). Bu sayede, mineralojik kökeni aynı, kırma yöntemleri farklı olan agregaların geometrik özelliklerindeki değişim ve bu değişimin çimento harcı örneklerinin dayanımına etkisi araştırılabilecektir.

Teras kumu, doğal nehir ve kireçtaşı agregalarının Ege Beton A.Ş. laboratuvarlarında yapılan deneylere göre kimyasal kompozisyonları Tablo 6.1’de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi, teras ve nehir agregaları silis kökenlidir.

Tablo 6.1 Agregaların kimyasal kompozisyonları

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	K.K	Kalıntı
N-S7	80,22	5,99	2,48	1,52	0,64	1,17	0,70	-	-	7,28
N-N2	82,10	5,65	2,70	1,10	0,54	1,23	0,71	-	-	5,97
V-L38	0,1	0,4	0,3	54,9	0,5	0,2	-	-	42,9	1,0

6.1.1.1.1 İnce Agregası Şekli ve Yüzey Pürüzlülüğünün Dolaylı Ölçüm Yöntemleri ile Belirlenmesi.

İnce agregaların şekil ve yüzey pürüzlülüklerine bağlı sıkışmamış boşluk oranı, akış katsayıları ve agregası kayma mukavemeti 3 ayrı deney yöntemi ile belirlenmiş olup, deney verileri Tablo 6.2’de görülmektedir.

Tablo 6.2 İnce agregası şekli ve yüzey pürüzlülüğü ile ilgili dolaylı yöntem sonuçları

Agregası	Sıkışmamış Boşluk, % (ASTM C1252)	Akış Katsayısı, s (TS EN-933/6)		Car Test, lb
	Metod A	No.5-No.200	No.10-No.200	Standart Grd.
V-L38	45	24	42	≥2500
C-L38	48	26	42	2420
M-L38	49	29	45	2258
V-S40	46	17	35	742
R-S8	44	17	33	687
N-S7	42	15	28	384
N-N2	38	15	27	312

V-L38 agregasının kırma yöntemi, Bölüm 5’de düşey milli kırıcı olarak belirtilmekle birlikte, ocakta kırıcı değişikliği yapılmıştır. Harç deneyleri için ocaktan alınan agregalar darbeli kırıcılarla kırıldığından, şekil ve yüzey pürüzlülü ile ilgili deneyler yeniden yapılmıştır. Deney sonuçları arasındaki farklılık bundan kaynaklanmaktadır.

Akış katsayıları ve agregası kayma mukavemeti deney sonuçlarına göre şekil ve yüzey dokusu açısından kireçtaşı agregaları köşeli ve pürüzlü agregaları işaret etmektedir. V-S40 agregasının sıkışmamış boşluk oranı ve akış katsayıları, aynı agreganın farklı kırıcılarla kırılması ile elde edilen C-L38 ve M-L38 agregalarından daha düşük olmasına rağmen, kayma mukavemeti değeri daha yüksektir. Diğer agregalardan V-S40, R-S8, N-S7 ve N-N2 için her üç deney yöntemine göre değerler sırası ile azalmaktadır. Boşluk oranları yakın değerlerde olan V-L38, V-S40 ve R-S8 agregalarının akış katsayıları ve kayma mukavemeti değerleri birbirinden çok farklıdır. Bu durum Bölüm 5’deki deney sonuçlarını destekler bir biçimde, dolaylı deney yöntemleri arasında ilişki olmadığını göstermektedir.

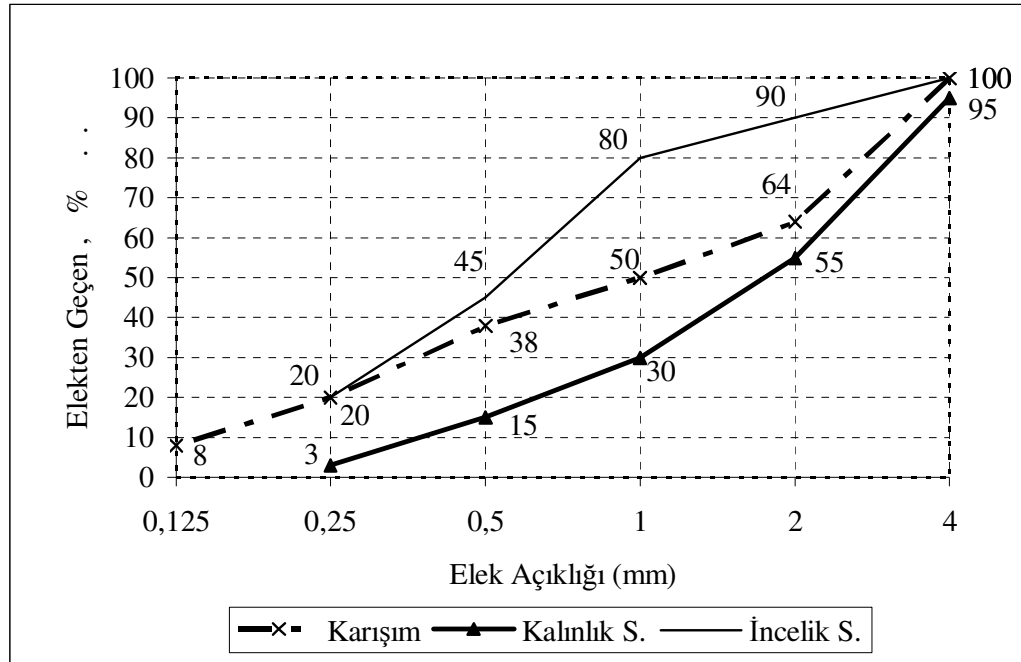
6.1.1.1.2 Granülometri

Agrega tane boyut dağılımı farklılığının çimento harcı mekanik özelliklerine etkisini en aza indirilebilmek için, agregalar elenerek Tablo 6.3'deki granülometriye getirilmiştir. Agregalar uygun granülometriye getirilmek amacıyla, öncelikle yıkanıp 105 ± 5 °C'lik etüvde sabit ağırlığa gelinceye dek 24 saat süre ile kurutulmuştur. Kuru numuneler TS EN 933-2'ye uygun kare gözlü elek serisi kullanılarak TS 3530 EN 933-1'e göre elek analizleri yapılmıştır. İnce agregaların TS 3530 EN 933-1'de tanımlanan kalınlık ve incelik sınırları ile granülometrisi Şekil 6.1 de verilmiştir.

Her bir harç karışımı için gerekli olan agregalar, Tablo 6.3'de verilen tane boyutu aralıkları için istenilen oranlarda 0,1 g hassasiyetinde tartılarak plastik poşetlere doldurulmuştur. V-L38, V-S40, R-S8, N-S7 ve N-N2 agregalarından sabit granülometride 15'er adet (+1 yedek) 1350'şer gramlık 80 paket malzeme hazırlanmıştır. C-L38 ve M-L38 agregalarından ise 5 (+1 yedek) toplam 12 paket malzeme hazırlanmıştır. Agregaların havadan nem almasını engellemek için poşet ağızları bağlanarak kapatılmış ve harç döküm gününe kadar muhafaza edilmişlerdir.

Tablo 6.3 Agregaların granülometri şartları

Elek No, #	Elek Açıklığı (mm)	Geçen, (%)	Kalan, (%)	Kümülatif Kalan (%)
4	4	100	0	0
8	2	64	36	36
16	1	50	14	50
30	0,5	38	12	62
50	0,25	20	18	80
100	0,125	8	12	92
200	0,063	0	8	100
İncelik modülü, I_m				3,20



Şekil 6.1 Harç karışımları için ince agrega granülometri eğrisi

6.1.1.1.3 Özgül Ağırlık, Birim Hacim Ağırlık, Su Emme ve Doluluk

Çimento harcı karışımlarında kullanılacak ince agregalarda kuru ve kuru yüzey doymun (KYD) özgül ağırlık, sıkışmış ve gevşek birim hacim ağırlık (BHA), Doluluk (komposite) ve su emme yüzdesi deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 6.4'de görülmektedir.

Tablo 6.4 Kullanılan ince agreganın bazı fiziksel özellikleri

Agrega	Özgül ağırlık	BHA, t/m ³		Doluluk (Gevşek)	Su emme, %
		Gevşek	Sıkışık		
V-L38	2,687	1,40	1,52	0,52	1,270
C-L38	2,685	1,39	1,50	0,52	1,270
M-L38	2,672	1,37	1,48	0,51	1,272
V-S40	2,566	1,30	1,41	0,51	1,760
R-S8	2,565	1,35	1,44	0,53	1,950
N-S7	2,571	1,41	1,51	0,55	1,950
N-N2	2,472	1,47	1,60	0,60	0,900

Özgöl ağırlık, belli hacim ve sıcaklıktaki bir malzemenin havadaki kuru ağırlığının aynı hacim ve sıcaklıktaki damıtık suyun havadaki ağırlığına oranıdır. Özgöl ağırlık, kısmen agreganın uygunluğunu belirtir. Düşük özgöl ağırlık sağlam olmayan malzemeyi, yüksek özgöl ağırlık ise kaliteli boşluksuz agregayı tanımlar. Normal beton üretiminde kullanılacak agreganın özgöl ağırlığının 2,20 – 2,70 arasında olması istenir. Karışımlarda kullanılmak üzere seçilen tüm agregaların özgöl ağırlıklarının bu değerler arasında olduğu görülmektedir (Tablo 6.4).

Belirli bir hacmi dolduran agreganın ağırlığına birim hacim ağırlık (BHA) denir. Agregayı kuru halde iken gevşek olarak bir kaba boşaltarak bulunan birim ağırlığa “gevşek BHA” ve yine kuru iken belli sayıda çubuk darbesi ile sıkıştırılarak bulunan birim ağırlığa ise “sıkışık BHA” denir. Bu değerın küçük olması o cismin ya da malzemenin gözenekli ve boşluklu bir yapıda olduğunu gösterir. BHA kullanılarak agregalar arasındaki boşluk miktarı hesaplanabildiği gibi, özel amaçlar için agreganın uygunluğu da değerlendirilebilir.

Birim hacim ağırlık, agreganın granülometrisi ve kusurlu malzemenin varlığı hakkında da fikir vermektedir. Agreganın şekline ve granülometrisine bağlı olarak boşluk miktarı değişmektedir. Boşluk miktarının az olması BHA’yı artırır. Ancak, kusurlu malzemenin fazla miktarda olması boşluk oranını arttıracığından BHA düşürecektir. Seçilen agregalar aynı granülometride olduklarından BHA değişimi sadece kusurlu malzeme yüzdesi hakkında bilgi verecektir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken, agreganın özgöl ağırlığının farklı olması durumunda BHA’nın değişeceğidir. Bu nedenle BHA-kusurlu malzeme yüzdesi ilişkisi değerlendirilirken özgöl ağırlığı aynı veya çok yakın olan agregalar dikkate alınmalıdır.

V-S40 kırmataş agregası $1,30 \text{ kg/dm}^3$ ile en düşük BHA değerindedir. Mineralojik kökenleri aynı olması nedeniyle, benzer özgöl ağırlıklardaki üç teras ocağı malzemesi karşılaştırıldığında, V-S40’a göre R-S8’de BHA $1,35 \text{ kg/dm}^3$ ’e N-S7’de $1,41 \text{ kg/dm}^3$ ’e yükseldiği görülmektedir. N-S7 doğal teras ocağı malzemesi olup piyasada dişli kum olarak isimlendirilmektedir. Kırmataş agregalara göre nispeten daha yuvarlak tane şeklinde olup kusurlu tane oranı düşüktür. Bu nedenle N-S7’e göre R-S8 ve V-S40 agregalarının sırası ile BHA’larındaki azalma, agreganın şeklinin

köşeli olmasından ya da kusurlu malzeme oranının fazla olmasından kaynaklanabilir. V-S40'ın BHA'sının daha düşük olması (sıkışmamış boşluk oranı da daha yüksektir) R-S8 agregasına göre daha köşeli ya da kusurlu malzeme yüzdesinin fazla olduğuna işaret etmektedir. Gerçek durum, agregaların kullanıldıkları karışımlardaki performansları değerlendirilerek ortaya konmaya çalışılacaktır.

Agreganın doluluğu (kompasitesi) ile birim hacimdeki agregada tanelerin işgal ettiği hacmin toplamı anlaşılmaktadır. Agreganın özgül ağırlığı ve BHA bilinmek suretiyle doluluk hesaplanabilir. Agreganın birim hacim ağırlığı her zaman için özgül ağırlıktan küçüktür. Dolayısıyla doluluk birden küçüktür. V toplam hacim, V_d dolu hacim olmak üzere, BHA; $\Delta = W/V$ ve yoğunluk $\delta = W/V_d$ olduğuna göre doluluk (kompasite) $k = \Delta/\delta$ 'den hesaplanabilir. Agreganın sıkıştırma işlemine tabi tutulmadan yerleştirilmesi sonucunda doluluk 0,51 – 0,60 arasında değerler almıştır.

Belirli bir granülometriye sahip agreganın doluluk değerlerinin düşük olması, kusurlu malzeme yüzdesinin fazla olduğunu gösterir. Düşük kompasiteli agrega ile üretilen betonun kompasitesi de düşük olur. Bu da işlenebilme özelliğine etkileyerek dayanımın düşmesine neden olur, kullanılması gereken çimento miktarı artar ve dış etkilere karşı dayanıklılık azalır.

N-N2 doğal agregası 0,60 değeri ile en yüksek doluluk değerini vermiştir. Doğal teras ocağı agregası N-S7'nin doluluğu 0,55 ve kırma kireçtaşı agregalarından V-L38 ve C-L38'in doluluğu 0,52'dir. Merdaneli kırıcıda kırılmış M-L38'i için bu değer 0,51'e düşmektedir. Bu durum M-L38 agregasında kusurlu tane yüzdesinin arttığı şeklinde yorumlanabilir. Kırmataş teras ocağı agregaları R-S8 ve V-S40'ın doluluk değerleri de N-S7'ye göre sırasıyla 0,53 ve 0,51'e düşmektedir.

6.1.1.2 Çimento

Karışımlarda, günümüzde oldukça fazla tüketimi olan TS EN 197 standartına uygun CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 6.5'de görülmektedir. Deney sonuçları üretici firmadan temin edilmiştir.

Tablo 6.5 Harç karışımlarında kullanılan çimentonun analizi

Çimento Tipi		CEM I 42,5 R			
Numunenin alındığı yer		Çimento siloları			
Kimyasal Analiz Test Sonuçları					
Özellik	Birim	Deney metodu	Uygunluk kriteri (TS EN 197-1)		Değer
Çözünmeyen kalıntı	%	TS EN 196-2	≤ %5,0		0,66
Klorür muhtevası (Cl ⁻)	%	TS EN 196-2	≤ %0,1		0,0076
Sülfat miktarı (SO ₃)	%	TS EN 196-2	≤ %4,0		3,04
Kızdırma kaybı	%	TS EN 196-2	≤ %5,0		3,76
Fiziksel Analiz Test Sonuçları					
Özellik	Birim	Deney metodu	Uygunluk kriteri (TS EN 197-1)		Değer
Priz başlama süresi	dk	TS EN 196-3	≥ 60		145
Priz bitiş süresi	dk	TS EN 196-3	-		205
Özgül yüzey (Blaine)	cm ² /g	TS EN 196-6	-		3587
Hacim genleşmesi	mm	TS EN 196-3	≥ 10		1
Basınç Dayanım Test Sonuçları					
Özellik	Birim	Deney metodu	Uygunluk kriteri (TS EN 197-1)		Değer
Erken dayanım (2gün)	N/mm ²	TS EN 196-1	≥ 20,0	-	24,1
Standart dayanım(28gün)	N/mm ²	TS EN 196-1	≥ 42,5	≤ %62,5	45,7

6.1.1.3 Karışım Suyu

Karışım suyu olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü’nde yapılan kimyasal analizi Tablo 6.6’da verilmiştir. Analiz sonucuna göre şehir şebeke suyu TS EN 1008 “Beton-karma suyu-numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları” standardına uygundur.

Tablo 6.6 Karışım suyu kimyasal analizi

Özellik/Bileşen	Miktar/Değeri
PH	6,90
İletkenlik	370
Tuzluluk (‰)	0,18
Klorür (mg/l)	124
Sertlik (CaCO ₃ /l)	158
CaO (mg/l)	49
MgO (mg/l)	18
SO ₃ (mg/l)	26

6.1.2 Çimento Harcı Karışımlarının Hazırlanması

Çimento harcı karışımları TS EN 196-1 uygun olarak hazırlanmıştır. Her bir dökümde 3 adet 40x40x160 mm ebatlarındaki prizma örneğini dolduracak kadar malzeme hazırlanmıştır. Karışıma giren malzeme miktarları; 1350 g ince agrega, 450g çimento ve 225 g su şeklindedir. Bu miktarlara göre agrega/bağlayıcı (A/Ç) oranı 3, S/Ç oranı 0,5'dir.

Granülometri düzenlemesi yapılan agregalar poşet içinde 2-3 dk sallamak sureti ile ön karıştırma işlemine tabi tutulmuşlardır. Burada amaç agrega tane dağılımı homojenliğini sağlamaktır. Karışımlar standart Rilem-Cembureau (Hobart mikser) karıştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil 6.2). Hazırlanan çimento harçlarının işlenebilirlikleri yayılma çapları ölçülerek tespit edilmiştir. Karışımlar, temizlenmiş ve ince şekilde yağlanmış kalıplara 2 kademe halinde ve her kademe 1'er dakika sarsma uygulanarak yerleştirilmiştir. Kalıbına yerleştirilen harç karışımlarının yüzeyleri perdahlanmış ve artan malzeme miktarları sıkıştırma kontrolü açısından tartılarak kaydedilmiştir.

Hazırlanan toplam harç prizması sayısı (5x16x3 + 2x5x3) 270 adettir. Bir döküm için karıştırma, yerleştirme, sıkıştırma ve perdahlama süresi yaklaşık 30 dakikadır. Karışımların hazırlandığı oda sıcaklığı 20 ± 2 °C ve bağıl nem 60 ± 5 olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.2 Çimento harcı karışımlarında kullanılan mikser

Kalıplarına yerleştirilen örnekler etiketlenmiştir. Nem kaybını önlemek için kalıplar ıslak bezle sarılarak, bağıl nemi yüksek kür kabineye yerleştirilmiştir. Kalıplarından 24 saat sonra çıkarılan harç prizmaları tartılmış ve deney gününe kadar 21 ± 2 °C'deki kür havuzunda kür edilmişlerdir.

6.1.3 Çimento Harcı Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Çimento harcı karışımlarında taze ve sertleşmiş mekanik özellikler incelenmiştir. Taze harç karışımlarında ortalama yayılma çapı, sertleşmiş harç numunelerinde ise BHA, eğilme ve basınç deneyleri yapılmıştır.

Çimento harç prizmaları, eğilme deneyinden 1 saat önce kür havuzundan alınarak havlu ile yüzey nemleri alınmıştır. Her bir agrega grubu için 15'er örnek üzerinde 7 günlük ve 30'ar örnek üzerinde 28 günlük eğilme ve eğilme sonrası basınç deneyleri yapılmıştır (Şekil 6.3).



(a) Deney aleti,



(b) Üç nokta yükleme



(c) Sehim ölçümü ve kırılma anı



(d) Deney sonrası prizma örnekleri

Şekil 6.3 Harç prizmalarında eğilme deneyi

Eğilme deneyi Şekil 6.3-a'da görülen 20 ton kapasiteli deney aleti ile yapılmıştır. Anlık yük ve sehım değişimleri bilgisayar ekranından izlenebilmekte ve elektronik ortamda kaydedilmektedir. Sehımler, prizma altına yerleştirilen deplasman ölçer yardımı ile ölçülmüştür. (Şekil 6.3 b-c). Eğilme deneylerinde mesnet açıklığı 12 cm olmak üzere üç noktadan yükleme yapılmıştır. Yükleme hızı 0,5-1kgf/s aralığında seçilmiştir.

Eğilme deneyi sonucu iki parçaya ayrılan prizma örneklerinde basınç deneyleri Şekil 6.4-a'da görülen yükleme hızı ayarlanabilen dijital basınç deney cihazı ile yapılmıştır. Prizmalar iki çelik plaka arasında yerleştirilmiş ve 40x40 mm²'lik bir alanda eğilme sonrası basınç deneyine tabi tutulmuşlardır (Şekil 6.4-b).



(a) Basınç deney cihazı

(b) Yükleme aparatı

Şekil 6.4 Basınç deney cihazı ve yükleme aparatı

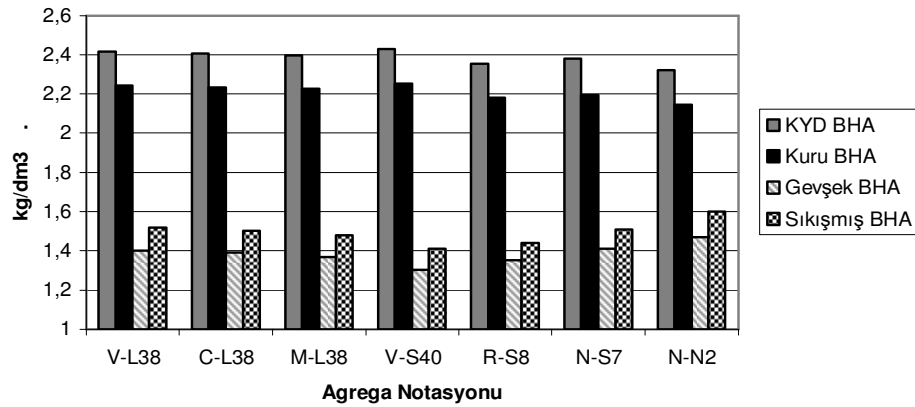
Harç prizmaları kürden çıkarıldıktan sonra yüzeyleri kurularak 0,1 gram hassasiyetinde elektronik tartı ile tartılmış ve KYD BHA'ları belirlenmiştir. Eğilme ve eğilme sonrası basınç deneylerinden sonra prizma parçaları etüvde 105±5 °C'de 24 saat süre ile kurutularak kuru BHA'lar belirlenmiştir.

6.1.4 Çimento Harcı Deney Sonuçları

Çimento harç prizmalarının KYD ve Kuru BHA'ları ile agrega örneklerinin gevşek ve sıkışmış BHA'ları Tablo 6.7 verilmiştir. BHA'lar Şekil 6.5'de karşılaştırmalı olarak görülebilir.

Tablo 6.7 Çimento harç prizmaları ve agregalarda birim hacim ağırlıklar (t/m^3)

Örnek	Çimento Harcı		Agrega	
	KYD BHA	Kuru BHA	Gevşek BHA	Sıkışmış BHA
V-L38	2,417	2,244	1,40	1,52
C-L38	2,406	2,234	1,39	1,50
M-L38	2,398	2,228	1,37	1,48
V-S40	2,429	2,252	1,30	1,41
R-S8	2,353	2,182	1,35	1,44
N-S7	2,382	2,196	1,41	1,51
N-N2	2,320	2,147	1,47	1,60



Şekil 6.5 Çimento harç prizmaları ve agregalarda birim hacim ağırlıklar

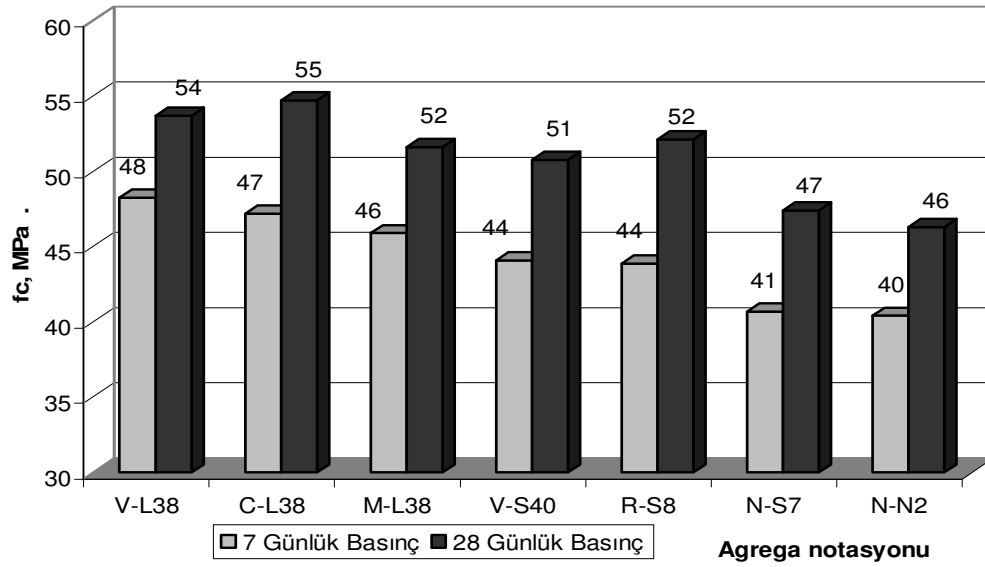
V-L38'e göre C-L38 ve M-L38 agregalarının sıkışmış ve gevşek BHA'ları bir miktar düşüktür. Teras ocağı malzemelerinde ise doğal teras malzemesi (N-S7) en yüksek BHA değerini vermektedir. Merdaneli kırıcıda kırılmış (R-S8) ve düşey milli kırıcıda kırılmış (V-S40) için sırasıyla değerler düşmektedir. Doğal agregaların (N-S7, N-N2) BHA'ları kırmataş agregalara göre yüksektir. Bunun nedeni doğal agregaların daha iyi yerleşebilmesi ve sıkışabilmesidir.

Teras ocağı agregalı harç karışımlarında, V-S40'ın gevşek ve sıkışmış BHA'ları, R-S8 ve N-S7'ye göre daha yüksektir. Merdaneli kırıcı da kırılan R-S8 ile hazırlanan karışımlarda BHA'lar daha çok düşmüştür. Bunun nedeni agregada kusurlu malzeme yüzdesinin fazla olması olabilir. Yassı ve uzun tanelerin altında hava kesecikleri kalarak karışımın BHA'ını düşürebilir. Bu sonuçlara göre; kırmataş agregalarla üretilen harç karışımlarının BHA'ları doğal agregalarla hazırlanan harç karışımlarının BHA'larına göre daha yüksektir. Ancak agregada kusurlu malzeme yüzdesinin fazla olması durumunda bu durum tersine dönebilir.

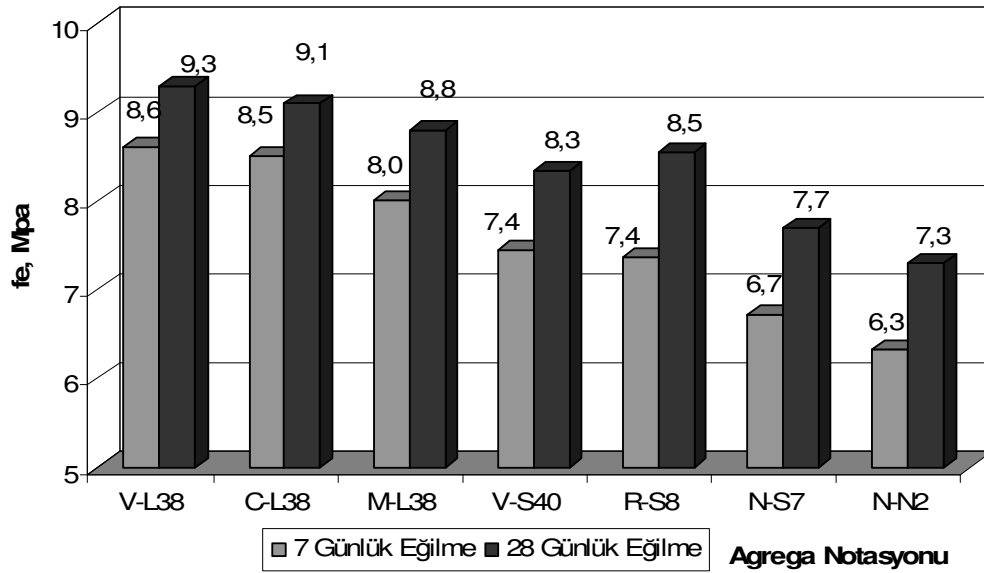
Taze ve sertleşmiş harç örnekleri üzerinde yapılan 28 günlük mekanik deney sonuçlarının ortalama değerleri ve standart sapmalar Tablo 6.8 ve Şekil 6.6-6.7'de verilmiştir.

Tablo 6.8 Çimento harcı deney sonuçlarının ortalama değerleri

Numune yaşı:28 gün		Numune boyutları: 40x40x160 mm				Mesnetler arası açıklık: 120 mm	
Geometri katsayısı: 0,281		Yükleme hızı:	Eğilme : 0,5-1kgf/s			Basınç : 50kgf/s	
Notasyon	Yayılma Çapı (mm)	Gün	EĞİLME			BASINÇ	
			Ort. Dayanım (MPa)	Std. Sapma (MPa)	Sehim (mm)	Ort. Dayanım (MPa)	Std.Sapma (MPa)
V-L38	115	7	8,6	0,74	0,27	48,26	2,57
		28	9,3	0,55	0,29	53,69	3,20
C-L28	116	7	8,5	0,54	0,27	47,20	2,12
		28	9,1	0,65	0,29	54,70	3,05
M-L28	115	7	8,0	0,43	0,28	45,90	2,23
		28	8,8	0,33	0,29	51,60	2,98
V-S40	110	7	7,4	0,46	0,27	44,1	2,28
		28	8,3	0,27	0,27	50,7	2,,57
R-S8	106	7	7,4	0,37	0,29	43,9	3,39
		28	8,5	0,46	0,23	52,1	2,37
N-S7	111	7	6,7	0,31	0,27	40,7	1,23
		28	7,7	0,34	0,30	47,4	1,83
N-N2	122	7	6,3	0,29	0,26	40,4	1,58
		28	7,3	0,30	0,30	46,3	1,96



Şekil 6.6 Çimento harç prizmalarının ortalama basınç dayanımları



Şekil 6.7 Çimento harç prizmalarının ortalama eğilme dayanımları

Kireçtaşı agregaları değerlendirildiğinde, çimento harçlarının yayılma çapları arasında belirgin bir fark görülmemektedir. Bununla birlikte Tablo 6.2’de görülen dolaylı ölçüm yöntemlerine göre; agregaların şekil ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı sıkışmamış boşluk oranı, akış katsayıları ve kayma mukavemetleri farklıdır.

Silis kökenli teras agregaları değerlendirildiğinde, kırmataş agregalı V-S40 ve R-S8 karışımlarının yayılma çapları N-S7 doğal teras agregalı karışıma göre daha düşüktür. Bunun nedeni yuvarlak agregaların kırılması ile agrega yüzeylerinin köşeli ve pürüzlü hale gelmesidir. Agregası şekil ve pürüzlülük özelliklerindeki değişim Tablo 6.2’de verilen dolaylı yöntem sonuçlarından da görülebilmektedir. Yuvarlak agrega tanelerinin yüzey alanı daha küçük olduğundan karışımın su ihtiyacı azalmış ve işlenebilirlik artmıştır. Ayrıca, ASTM C1252 deney yöntemi sonuçlarından da görüldüğü üzere (Şekil 5.4-5.6), serbest sıkışmaya bırakılan doğal agregalar aralarında en az boşluk kalacak şekilde yerleşirler. Yuvarlak agregalarda agregaların temas noktaları azdır ve taneler arasında nispeten daha az sürtünme oluşur.

Kireçtaşı çimento harcı prizmalarında en yüksek eğilme ve eğilme sonrası basınç dayanımı darbeli kırıcı ile kırılmış V-L38 agregasında ölçülmüştür. C-L38 ve M-L38 agregalarında dayanımlar azalmaktadır. Bu durum, agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki mekanik bağın agrega şeklinden etkilendiği göstermektedir. Agregası kökeni aynı ve hepsi kırılmış agrega olduğundan yüzey pürüzlülükleri baskın bir faktör olarak değerlendirilmemiştir. Bu nedenle kireçtaşı agregaları için harç prizmalarında A/Ç oranı 3, S/Ç oranı 0,5 için agrega şekline bağlı basınç dayanımı kaybı %4, eğilme dayanımı kaybı %5 mertebelerindedir.

Teras agregaları değerlendirildiğinde, en yüksek eğilme ve eğilme sonrası basınç dayanımı R-S8, V-S40 agregalı çimento harcı prizmalarında ölçülmüştür. Doğal teras ve nehir agregaları ile üretilen harç prizmalarının eğilme ve basınç dayanımları ise kırmataş agregalara göre daha düşüktür.

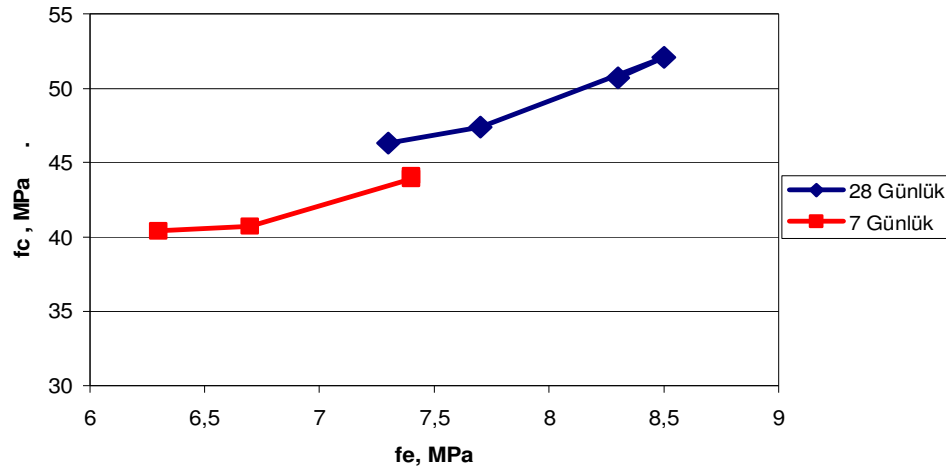
Mineralojik kökenleri aynı olan kırmataş V-S40 ve R-S8 ile üretilen çimento harcı örneklerinin eğilme ve basınç dayanımları arasında dikkate değer bir değişiklik görülmemektedir. Kırılmamış doğal teras kumu N-S7 ile üretilen çimento harcı örnekleri, teras ocağı agregaları arasında en düşük basınç dayanımına sahiptir. Eğilme dayanımı kaybı 7 ve 28 günlük örnekler için %10, basınç dayanımı kaybı ise 7 ve 28 günlük örnekler için sırasıyla %8 ve %9 mertebelerindedir. Bu sonuçlara göre, dayanım kayıplarının basınç dayanımına göre eğilme dayanımı açısından biraz daha kritik olduğu görülmektedir. Kökenleri aynı olmakla birlikte, N-S7 doğal

agrega olduğundan tane yüzeyleri daha pürüzsüzdür. R-S8 kırmataş agregası ise köşeli ve kırılmış yüzeyleri pürüzlüdür. Bu nedenle çimento harcı örneklerindeki dayanım kaybı, agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanmaktadır.

Kırmataş teras agregaları arasında, merdaneli kırıcı da kırılmış R-S8 agregasının sıkışmamış boşluk oranı daha düşük olmasına rağmen, bu agrega ile üretilen çimento harcı örneklerinin eğilme ve eğilme sonrası basınç dayanımları daha fazladır. Bu durum V-S40 agregasında kusurlu tane yüzdesinin fazla olduğu şeklinde yorumlanabilir. Bölüm 5’de detayları verilen, agregalarda görüntü analiz sonuçları değerlendirildiğinde, V-S40 agregasında yassı ve uzun tane oranının (dış merkezlik) R-S8’e göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bu nedenle dayanımlarda küçük de olsa var olan bu değişikliğin nedeni, 3 noktadan yüklemeli eğilme dayanımı deneyinde, en büyük moment bölgesi olan prizmanın ortasında bulunması muhtemel kusurlu malzemelerdir. Sıkışmamış boşluk oranı deney sonuçları, köşeli agrega şekli ve yüzey dokusunun yanı sıra, yassı ve uzun kusurlu malzeme yüzdesinden de etkilenebilmektedir.

Dayanımlar arasında oldukça iyi bir doğrusal ilişki söz konusudur. Neville (1995)’e göre, eğilme sonrası basınç dayanımı eğilme dayanımından yaklaşık 5 kat fazladır. Deney sonuçları incelendiğinde, 7 ve 28 günlük örnekler için bu oranın 5,6-6,4 aralığında değiştiği görülmektedir.

Yedi ve 28 günlük eğilme deneyi sonrası basınç dayanımlarının, eğilme dayanımlarına oranı sırasıyla 5,98 ve 6,09 dur. Yedi ve 28 günlük eğilme dayanımı ve eğilme sonrası basınç dayanımı ortalamaları arasındaki ilişki Şekil 6.8’de görülmektedir. Benzer ilişki kireçtaşı agregaları için de kurulabilir. Ancak örnek sayısı az olduğundan böyle bir ilişki aranmamıştır.



Şekil 6.8 Silis kökenli agregalı çimento harcı örneklerinin eğilme dayanımı ve eğilme sonrası basınç dayanımı ilişkisi

Agrega tane şekli ve yüzey pürüzlülüğü ile çimento harçlarının mekanik özellikleri arasında, aynı mineralojik kökene sahip agrega çeşitliliğinin fazla olmaması nedeniyle ilişki kurulamamıştır. Bunun yerine, Tablo 6.9 ve 6.10'da kırıcı tipine bağlı olarak kireçtaşı ve teras ocağı agregaları değerlendirilmektedir. Tablolarda çimento harçlarının mekanik özellikleri, agrega geometrik özellikleri ile ilgili görüntü analiz sonuçları, dolaylı yöntem sonuçları, fiziksel özellikler vb. değerler arasında mertebe (0-1-2) değerlendirmesi yapılmıştır.

Tablo 6.9'dan görüldüğü gibi, kireçtaşı agregaları için, üç kırıcı tipi arasında darbeli kırıcılar avantajlı gözükmemektedir. Tablo 6.10 incelendiğinde, teras ocağı agregaları için, merdaneli kırıcı yerine düşey milli kırıcılar tercih edilmelidir. Agregaların uygun kırıcılarla kırılması, agrega özelliklerini iyileştirmekte ve agregaların çimento hamuru ile bağ dayanımının artmasını sağlamaktadır.

Tablo 6.9 Kireçtaşı agregaları için kırıcı tipi değerlendirmesi

Özellik		Kırıcı Tipi		
		Darbeli	Çeneli	Merdaneli
Çimento Harcı Özelliği	Basıç dayanımı	2*	1	0
	Eğilme dayanımı	2	1	0
	İşlenebilirlik	1	2	1
	Terleme	2	2	2
	KYD, BHA	2	1	0
	Kuru, BHA	2	1	0
Agrega özelliği	Yuvarlaklık	2	1	0
	Konkavlık	2	1	2
	Dış merkezlik	2	1	0
	Köşelilik	2	1	0
	Pürüzlülük	2	2	2
	Sıkışmamış boşluk, %	0	1	2
	Akış katsayıları	0	1	2
	CAR test	2	1	0
	Gevşek BHA	2	1	0
	Sıkışık, BHA	2	1	0
Kırıcı	Toz oranı	1	0	2
	Kapasite	2	1	0
	Kırma oranı	2	1	0
	Granülometri	2	1	0
	Çatlak, gerilme	2	0	1
	Enerji	0	1	2
	Bakım	2	1	0
	Ebat	2	1	0
	Maliyet	2	1	0

*Performans derecelendirmesi “0” için en düşük “2” için en yüksektir.

Tablo 6.10 Doğal teras ocağı agregaları için kırıcı tipi değerlendirmesi

Özellik		Kırıcı Tipi		
		Düşey milli	Merdaneli	Doğal
Çimento Harcı Özelliği	Basıç dayanımı	2*	1	0
	Eğilme dayanımı	2	1	0
	İşlenebilirlik	1	0	2
	Terleme	2	2	1
	KYD, BHA	2	0	1
	Kuru, BHA	2	0	1
Agrega özelliği	Yuvarlaklık	2	1	0
	Konkavlık	2	1	0
	Dış merkezlik	0	2	1
	Köşelilik	2	1	0
	Pürüzlülük	2	1	0
	Sıkışmamış boşluk, %	2	1	0
	Akış katsayıları	2	1	0
	CAR test	2	1	0
	Gevşek BHA	0	1	2
	Sıkışık, BHA	0	1	2
Kırıcı	Toz oranı	1	2	-
	Kapasite	2	1	-
	Kırma oranı	2	1	0
	Granülometri	2	1	0
	Çatlak, gerilme	2	2	1
	Enerji	1	2	-
	Bakım	2	1	-
	Ebat	2	1	-
	Maliyet	2	1	-

*Performans derecelendirmesi “0” için en düşük “2” için en yüksektir.

1.1 Beton Deneyleri

Agrega geometrik özelliklerinin çimento harcı ve beton dayanımına etkisini değerlendirmek gerekirse, araştırmacıların elde ettiği sonuçları karşılaştırmada sorunlar olduğu görülmektedir. Agregalar daha çok kaynaklarına göre doğal ve

kırmataş olarak sınıflandırılır. Kırmataş olduğu halde uygun kırma yöntemi seçilmemesi nedeniyle, agregalarda kusurlu tane yüzdesi fazla olabilmektedir. Bu durum, agreganın kullanıldığı betondan beklenen performansı etkiler.

Beton karışımlarında kullanılan agregalar, şekil açısından genellikle iri tane boyutlarında kusurlu tane yüzdesi açısından değerlendirilmektedir. Kusurlu taneler, iri agregaların en kısa ve en uzun ebatları arasında üç kat fark olması durumuna göre belirlenir. Uzunluk ölçme aletleri ile yapılan bu ölçümler zaman alıcı olup, deneyler az sayıda agregata tanesi ile yapılmaktadır. Agregata tane şekli ile ilgili subjektif değerlendirmeler, geometrik özelliklerin beton performansı açısından değerlendirilmesini güçleştirmektedir. Bu nedenle, beton karışımlarında kusurlu tane oranı, şekil, yüzey dokusu gibi geometrik özelliklerin beton performansına etkisinin mertebesini belirlemek amacıyla bazı çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar, değişken sayısının çok olması nedeni ile sistematik olmayan denemelerden ibarettir. Elde edilecek sonuçlar, beton agregalarının geometrik özellikleri ile ilgili standartlar açısından değerlendirilecektir. İri ve ince agregata geometrik özelliklerinin betonun mekanik özelliklerine etkisinin mertebesi 4 aşamada değerlendirilmeye çalışılmıştır.

- 1- **Agregata şekli ve yüzey pürüzlülüğü etkisi;** Farklı kırıcı tipleri ile kırılmış kireçtaşı ve bazalt agregaları ile hazırlanan karışımlar,
- 2- **Kusurlu agregata yüzdesinin etkisi;** Farklı yüzdelerde (Kontrol, %15, %30, %50) kusurlu tane içeren karışımlar,
- 3- **İri agregata şeklinin etkisi;** Farklı şekil özelliklerindeki (köşeli, biçimsiz, yassı, uzun, yuvarlak) iri agregalarla hazırlanan karışımlar,
- 4- **İri agregata yüzey pürüzlülüğünün etkisi;** Parlak ve pürüzlü bilyalar kullanılarak hazırlanan karışımlar.

6.2.1 Karışım Malzemeleri

Beton karışımlarının hazırlanmasında izlenen yol ve yapılan deneysel çalışmalar Şekil 5.2'deki akış şemasında özetlenmişti. Beton karışım bileşenlerinden agregalar, araştırılmak istenen şekil ve doku özelliğine göre her bir karışım için farklı

özelliklerde seçilmiştir. Beton karışımlarında iri ve ince agrega özellikleri değişmekle birlikte, diğer bileşenler (çimento, su, kimyasal katkı) tüm karışımlar için aynı alınmıştır. Beton karışımlarında ortak kullanılan malzemeler ve özellikleri aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

6.2.1.1 Çimento

Deneyisel çalışmalarda CEM I/42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentonun üretici firmadan alınan fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 6.11’de verildiği gibidir. Analiz sonuçlarından görüldüğü gibi kullanılan çimento TS EN 197 “Çimento deney metodları” standardına uygundur.

6.2.1.2 Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı

Beton karışımlarında düşük su/bağlayıcı oranı seçildiğinden, yeterli işlenebilmeyi sağlamak amacı ile modifiye polikarboksilat esaslı polimer yüksek performanslı hiperakışkanlaştırıcı katkı Sika® ViscoCrete® Hi-Tech 22 kullanılmıştır. Kullanılan katkı ASTM C 494-81 “Beton kimyasal katkıları için standart özellikler” ve TS EN 934-2 “Kimyasal Katkılar-Beton, harç ve şerbet için-Bölüm 2: Beton katkıları-tarifler ve özellikler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme” standartlarına uygundur. Üretici firmadan temin edilen kimyasal katkı özellikleri Tablo 6.12’de görülmektedir.

6.2.1.3 Karışım Suyu

Karışım suyu olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü’nde yapılan kimyasal analizi Tablo 6.6’da verilmişti. Analiz sonucuna göre şehir şebeke suyu TS EN 1008 “Beton-karma suyu-numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları” standardına uygundur.

Tablo 6.11 Beton karışımlarında kullanılan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik analizi

Çimento Tipi		CEM I / 42,5 R			
Kimyasal Analiz Test Sonuçları					
Kimyasal kompozisyon	Birim	Deney metodu	Uygunluk Kriteri (TS EN 197-1)		Değer
SiO ₂	%	TS EN 196-2	-		18,76
Al ₂ O ₃			-		4,18
Fe ₂ O ₃			-		3,08
CaO			-		63,08
MgO			-		2,4
Na ₂ O			-		0,11
SO ₃			≤ %4,0		3,04
Cl ⁻			≤ %0,1		0,018
Serbest CaO			≤ %10		1,43
Çözünmeyen kalıntı			≤ %5,0		0,66
Kızdırma kaybı			≤ %5,0		3,24
Ölçülemeyen			-		0,002
Fiziksel Analiz Test Sonuçları					
Özellik	Birim	Deney metodu	Uygunluk Kriteri (TS EN 197-1)		Değer
Priz başlama süresi	dk	TS EN 196-3	≥ 60		145
Priz bitiş süresi			-		205
Özgül yüzey (Blaine)	cm ² /g	TS EN 196-6	-		3587
Özgül ağırlık					3,12
Hacim genleşmesi	mm	TS EN 196-3	≤ 10		1
Basınç Dayanım Test Sonuçları					
Özellik	Birim	Deney metodu	Uygunluk Kriteri (TS EN 197-1)		Değer
2 günlük dayanım	N/mm ²	TS EN 196-1	≥ 20,0	-	24,1
7 günlük dayanım			-	-	37,9
28 günlük dayanım			≥ 42,5	≤ 62,5	44,5

Tablo 6.12 Hiperakışkanlaştırıcı kimyasal katkının fiziksel özellikleri

Katkı	Yoğunluk (g/cm ³)	Özgül ağırlık	pH	Çözünebilir Cl %'si
Hi-Tech 22	1,10± 0,02	1,16	3-7	En fazla 0,1

6.2.2 Taze ve Sertleşmiş Beton Deneyleri

Beton deneyleri, agrega geometrik özelliklerinin taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisini belirlemek amacı ile yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda incelenen beton özelliğine göre; deney yöntemi, uygulama yaşı ve deney sayıları Tablo 6.13 ve Tablo 6.14'de görüldüğü gibi özetlenmiştir.

Taze beton örneklerinde TS EN 12350 “Beton - Taze beton deneyleri” standartına göre Tablo 6.13’de belirtilen Çökme (Slump), taze birim hacim ağırlık (BHA) ve hapsolmuş hava %’si (basıncılı kap yöntemi) deneyleri yapılmıştır. Ortam sıcaklığı ve beton sıcaklığı elektronik termometre yardımı ile kontrol edilmiştir (Şekil 6.9).

Tablo 6.13 İncelenen taze beton özellikleri

Beton özelliği	Deney yöntemi	Uygulama yaşı	Deney sayısı
Beton sıcaklığı	Termometre ile ölçüm	3 dk	Döküm sayısınca Ort.
İşlenebilirlik	Çökme (Slump)	5 dk	Her dökümde 2 ölçümün Ort.
Taze BHA	8 litrelik kabın BHA’lığı	10 dk	Döküm sayısınca Ort.
Hapsolmuş hava %’si	Basıncılı kap	12 dk	Döküm sayısınca Ort.
Terleme	Gözlem	30 dk	Kalıp yüzeylerinden



(a) Çökme deneyi



(b) Hava ve beton sıcaklığı ölçümü



(c) Taze BHA deneyi



(d) Hapsolmuş hava %’si tayini

Şekil 6.9 Taze beton deneyleri

Agregaların nem içerikleri Şekil 6.10’de görülen nem ölçer kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 6.10 Nem tayininde kullanılan elektronik nem ölçer

Numuneler kalıplarına iki tabaka halinde (15x30 cm silindir örnekler 3 tabaka halinde), her bir tabaka 25'er kez şişlenerek ve bir dakika sarsma uygulanarak sıkıştırılmış ve yüzeyleri perdelanmıştır. Kalıplarına yerleştirilen beton yüzeylerinde terleme kontrolü yapılmıştır.

Agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğü etkisinin araştırıldığı karışımlar (Bölüm 6.3) ile kusurlu agrega yüzdesinin etkisinin araştırıldığı karışımlar (Bölüm 6.4) beton üreticisi firmalarda hazırlanmıştır. Beton örnekleri, kalıplarından çıkarılıncaya kadar $+21 \pm 1$ °C sıcaklık ve %90 nem koşullarındaki iklimlendirme odasında tutulmuşlardır. İri agrega şekli (Bölüm 6.5) ve yüzey pürüzlülüğü etkisinin araştırıldığı (Bölüm 6.6) beton karışımları ise D.E.Ü İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemeleri laboratuvarlarında hazırlanmıştır. Bu beton örnekleri ise üst yüzeyleri ıslak bezle örtülü bir durumda, rüzgardan ve nem kaybından korunan $+21 \pm 4$ °C sıcaklık ortamında tutulmuşlardır. Kalıplarından 24 saat sonra çıkarılan örnekler, deney gününe kadar $+21 \pm 2$ °C'de kirece doymun suda kür edilmiştir. Beton örnekleri külden çıkarıldıktan 1 saat sonra yüzey nemleri alınmak sureti ile mekanik deneylere tabi tutulmuşlardır (Tablo 6.14).

Tablo 6.14 İncelenen sertleşmiş beton özellikleri

Beton özelliği	Deney yöntemi	Uygulama yaşı	Örnek sayısı
Basınç dayanımı	Serbest eksenel basınç	7 ve 28. gün	3'er numune ort.
Eğilme dayanımı	3 veya 4 noktadan yüklemeli prizma eğilme dayanımı	7 ve 28. gün	3'er numune ort.
Yarmada çekme dayanımı	Brezilya silindir yarma	7 ve 28. gün	3'er numune ort.
Elastisite modülü	Yükleme çerçevesinde komparatör okumaları	7 ve 28. gün	3'er numune ort.

Deneyisel çalışmalarda kullanılan hidrolik beton presi ELE marka Autotest 3000 model, 300 ton kapasiteli ve dijital göstergelidir (Şekil 6.11). Yükleme hızı 50 - 3000 kgf/s aralığında ayarlanabilmektedir. Basınç deneylerinde seçilen yükleme hızı 15 cm ayrıtlı küp örnekler için 680 kgf/s olup, gerilme uygulama hızı $3,02 \text{ kgf/cm}^2/\text{s}$ olmaktadır.



(a) Eksenel basınç deneyi



(b) Silindir yarma



(c) 4 Nokta eğilme



(d) Statik elastisite modülü

Şekil 6.11 Sertleşmiş beton deneyleri

Uygun özellikte agrega temini ve işlenerek sınıflandırılmasının uzun zaman alması, deney numunesi sayısı ve numune boyutlarının seçiminde kısıtlayıcı bir faktör olmuştur. Bu nedenle bazı karışımlarda standartlarda tanımlanan örnek boyutları yerine daha küçük örneklerle çalışılmıştır.

Eğilme deneyleri 10x10x60 cm ebatlı beton prizma örnekleri üzerinde yapılmıştır. Mesnet açıklığı 45 cm olup, 4 nokta ve yükleme hızı 20 kgf/s olarak seçilmiştir (Şekil 6.11-c). İri agrega şekil etkisinin değerlendirildiği çalışmada (Bölüm 6.5), agregaların şekillerine göre ayırma zorluğu nedeni ile deneyler 7,5x7,5x28,5 cm ebatlı örneklerde 3 noktalı olarak yapılmıştır).

Yarmada çekme dayanımları 10x20 cm ebatlı silindir örneklerde belirlenmiştir (Şekil 6.11 b). Deneylerde yükleme hızı 94 kgf/s olarak uygulanmıştır. Ancak, kusurlu agrega yüzdesi etkisinin araştırıldığı çalışmada (Bölüm 6.4) kalıp yetersizliği nedeni ile yarmada çekme dayanımları 10x30cm ebatlı örneklerde yapılmıştır. Bu örneklerde yükleme hızı 210 kgf/s olarak uygulanmıştır.

Farklı şekil özelliklerindeki iri agregalarla üretilen 10x20 cm ayrıtlı beton prizma örneklerinin 7 ve 28 günlük elastisite modülleri belirlenmiştir. Silindir beton numunelerinde aktarılan yükün üniform olarak dağıtılmasını sağlamak amacıyla kükürt başlık uygulaması yapılmıştır. Silindir örnekler öncelikle Şekil 6.11-d’de görülen düzeneğe yerleştirilmiştir. Daha sonra, beton numunelerine eksenel basınç uygulanarak, yük değerlerine karşılık gelen şekil değiştirme okumaları komparatör yardımıyla 10^{-2} mm hassasiyetinde yapılmıştır. Elastisite modülü deneylerinde seçilen yükleme hızı 180 kgf/s’dir. Elastisite modülleri en küçük kareler yöntemi ile belirlenmiştir.

6.3 Farklı Kırıcı Tipleri ile Kırılan Agregalarla Hazırlanan Beton Karışımları

Deneyisel çalışmanın bu bölümünde, iri ve ince agrega geometrik özelliklerinin, taze ve sertleşmiş beton performansına etkisinin mertebesi değerlendirilmiştir. Bu amaçla öncelikle, farklı kırıcı tipleri ile kırılmış agregaların tane şekli ve kusurlu

malzeme yüzdesi değişimleri incelenmiştir. Daha sonra bu agregalar kullanılarak hazırlanan beton örneklerinin mekanik performansları karşılaştırılmıştır.

6.3.1 Karışım Malzemeleri

Deneysel çalışmalarda, Bölüm 6.2.1’de özellikleri verilen karışım malzemelerinden başka, üç farklı kırıcıda kırılmış iri ve ince agregalar kullanılmıştır.

6.3.1.1 İri Agregalar

Deneysel çalışmalarda Bölüm 5.3’de hazırlanma aşamaları anlatılan Dere Madencilik A.Ş.’den temin edilen kalker (V-L38) ve bazalt (V-B39) agregaları kullanılmıştır. Agregalar ocaklarda darbeli tip kırıcılarla kırılmaktadır. Bununla birlikte, taş ocaklarından balast üstü (>70mm) ebatla alınan işlenmemiş kaya parçaları, çeneli ve merdaneli laboratuvar tipi kırıcılarda kırılmıştır. Agregalar grupları cinslerine ve kırma yöntemini esas alacak şekilde isimlendirilmiştir. Agregalar Tablo 6.15’te görülen kısaltılmış notasyonlar ile ifade edileceklerdir.

Agregaların kırma ve eleme aşamaları ile kırma yöntemine göre değişen kusurlu malzeme oranları ve geometrik özellikleri Bölüm 5’de verilmiştir. Bu özellikler, iri agregalarda; TS 9582 EN 933-3 “*Agregaların geometrik özellikleri için deneyler Bölüm 3: Tane şekli tayini yassılık indeksi*”, kaliper yöntemi ve Modifiye ASTM C1252 (AASHTO TP56) yöntemleri ile belirlenmiştir. İnce agregalar da ise TS EN 933-6 “*Agregaların geometrik özellikleri için deneyler-Bölüm 6: Yüzey özelliklerinin değerlendirilmesi-Agregaların akış katsayısı*” ve ASTM C1252 “*İnce agregalarda agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı sıkışmamış boşluk oranı*” yöntemleri ile belirlenmiştir.

Bazalt ve kireçtaşı kayaçlarından 90x90 mm ebatlarında alınan karot örneklerinde TS 699/T1 “*Tabii yapı taşları-Muayene ve deney metodları*”na göre yapılan eksenel basınç deneyi sonuçlarının ortalaması Tablo 6.15’te verilmiştir. Kırma yöntemine göre iri agregalarda Los Angeles aşınma deneyi (Metod B) sonuçları yine Tablo 6.15’te görülmektedir.

Tablo 6.15 Karışımlarda kullanılan agregaların basınç dayanımları ve aşınma kayıpları

Mineral	Kırıcı tipi	Notasyon	Basınç Dayanımı (TS 699), MPa	Los Angeles aşınma kaybı, %
Kireçtaşı	Darbeli	KD	83	28
	Çeneli	KÇ		29
	Merdaneli	KM		29
Bazalt	Darbeli	BD	252	19
	Çeneli	BÇ		21
	Merdaneli	BM		23

Tablo 6.15’de görüldüğü gibi, bazaltın basınç dayanımı kireçtaşına göre çok daha yüksektir. Los Angeles aşınma kaybı yüzdeleri ise bazalt agregasında daha düşüktür. Los Angeles aşınma kayıpları, farklı kırıcı tiplerinde kırılan agregalarda farklı sonuçlar verebilmektedir. Kırıcı tipi ve buna bağlı olarak değişebilen kusurlu tane yüzdesi, Los Angeles aşınma deneyi sonuçları üzerinde etkilidir.

Los Angeles deneyi yerine yeni standartlarda yer bulan Microdeval yöntemi ile aşınma deneyi ise deney aleti olmadığından yapılamamıştır.

6.3.1.2 İnce Agregalar

Farklı kırma yöntemleri ile kırılan iri agregalara, çene ve silindir açıklığı azaltılarak ikincil (sekonder) kırma işlemi uygulanmıştır.

Bu işlemler sonunda elde edilen iri ve ince agregaların fiziksel özellikleri Tablo 6.16 ve Tablo 6.17’de verilmiştir.

Tablo 6.16 Darbeli kırıcı ile kırılmış kireçtaşı agregasının fiziksel özellikleri

Özellik	İnce Agregası (0-5)	İri Agregası		Deney Standardı
		5-15	15-25	
KYD Özgül ağırlık	2,68	2,69	2,70	TS EN 1097-6
Su emme (%)	1,27	0,18	0,19	TS EN 1097-6
İnce malzeme (%)	9	-	-	TS 3527
Organik madde	yok	yok	yok	TS 3673
Dona dayanıklılık (NaSO ₄)	-	1,65	1,47	TS 3655
Los Angeles aşınma %’si				
100 devir, (%)	-	6		TS EN 1097-2
500 devir, (%)	-	28		
Kusurlu malzeme %’si	-	5		TS EN 933-4

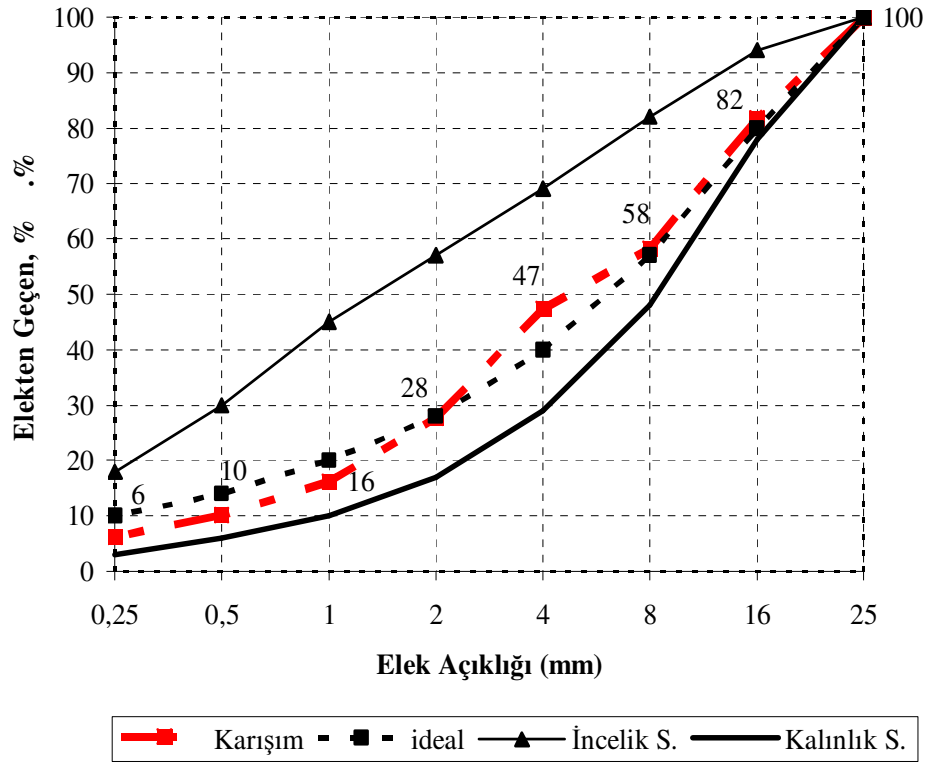
Tablo 6.17 Darbeli kırıcı ile kırılmış bazalt agregasının fiziksel özellikleri

Özellik	İnce Agregası (0-5)	İri Agregası		Deney Standardı
		5-15	15-25	
KYD Özgöl ağırlık	2,77	2,80	2,82	TS EN 1097-6
Su emme (%)	0,65	0,45	0,40	TS EN 1097-6
İnce malzeme (%)	5	-	-	TS 3527
Organik madde	yok	yok	yok	TS 3673
Dona dayanıklılık (NaSO ₄)	-	1,20	0,95	TS 3655
Los Angeles aşınma %'si				
100 devir, (%)	-	4,5		TS EN 1097-2
500 devir, (%)	-	23		
Kusurlu malzeme %si	-	9		TS EN 933-4

Üç farklı kırıcıda kırılan bu agregalar elenerek standart granülometriye getirilmiştir. Bu sayede beton özelliklerinin granülometri değişiminden en az etkilenmesi amaçlanmıştır. Hazırlanan iri ve ince agregaların en büyük tane boyutu 25 mm olmak üzere granülometri eğrisi Şekil 6.12'de görüldüğü gibi düzenlenmiştir. Bu granülometri eğrisi, bazalt agregasının ocakta darbeli kırıcı ile kırıldığı haldeki (BD) boyut dağılımını göstermektedir. Diğer agregaların boyut dağılımları bu granülometri eğrisine göre yeniden düzenlenmiştir.

6.3.2 Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Beton Karışımlarının Hazırlanması

Üç farklı kırıcı tipinde kırılan ve granülometrileri düzenlenen agrega örnekleri ile aynı S/Ç oranı ve karışım koşullarında beton örnekleri hazırlanmıştır. Karışımlarda malzeme oranları ile dış faktörlerden beton üretim koşulları, beton döküm sıcaklığı, kür koşulları ve süresi sabit tutulmaya çalışılmıştır. Agregalar karışımdan önce 105±5 °C'lik etüvde 24 saat süre ile kurutulmuşlardır. TS 802 "Beton karışım hesap esasları" na göre hazırlanan beton bileşenleri Tablo 6.18 ve 6.19'da görülmektedir.



Şekil 6.12 Farklı kırıcı tiplerinde kırılmış kireçtaşı ve bazalt agregaları ile üretilen beton karışımları için düzenlenmiş granülometri eğrisi

Tablo 6.18 Kireçtaşı agregalarında 1 m³ beton için karışım bileşenleri ve oranları

Bileşen	KD		KÇ		KM	
	W (kg/m ³)	H (dm ³)	W (kg/m ³)	H (dm ³)	W (kg/m ³)	H (dm ³)
Çimento	406	128	393	128	402	128
Su	171	180	165	180	169	180
0-5 mm İnce Ag. KYD	835	303	843	302	837	303
5-15 mm İri Ag. KYD	473	176	478	176	475	176
15-25 mm İri Ag. KYD	512	190	517	189	513	190
Hiperakş.	5,63	3,3	5,50	3,3	5,63	3,3
Hava, ‰	-	19	-	22	-	20
Toplam	2402	1000	2402	1000	2402	1000
Su /Çimento	0,42		0,42		0,42	
Su/Bağlayıcı	0,42		0,42		0,42	
KA/İA	1,20		1,20		1,20	
Hiperakş.(%, Ç)	%1,40		%1,40		%1,40	
Teorik BHA (t/m ³)	2,40		2,40		2,40	

Tablo 6.19 Bazalt agregalarında 1m³ beton için karışım bileşenleri ve oranları

Bileşen	BD		BÇ		BM	
	W (kg/m ³)	H (dm ³)	W (kg/m ³)	H (dm ³)	W (kg/m ³)	H (dm ³)
Çimento	409	130	400	128	392	128
Su	172	178	168	178	165	178
0-5 mm İnce Ag. KYD	854	303	844	300	839	297
5-15 mm İri Ag. KYD	488	172	482	170	479	169
15-25 mm İri Ag. KYD	529	186	523	183	520	182
Hiperakş.	5,63	3,3	5,60	3,3	5,54	3,3
Hava, %o	-	30	-	38	-	42
Toplam	2430	1000	2430	1000	2430	1000
Su /Çimento	0,42		0,42		0,42	
Su/Bağlayıcı	0,42		0,42		0,42	
KA/İA	1,20		1,20		1,20	
Hiperakş.(%, Ç)	%1,40		%1,40		%1,40	
Teorik BHA (t/m ³)	2,43		2,43		2,43	

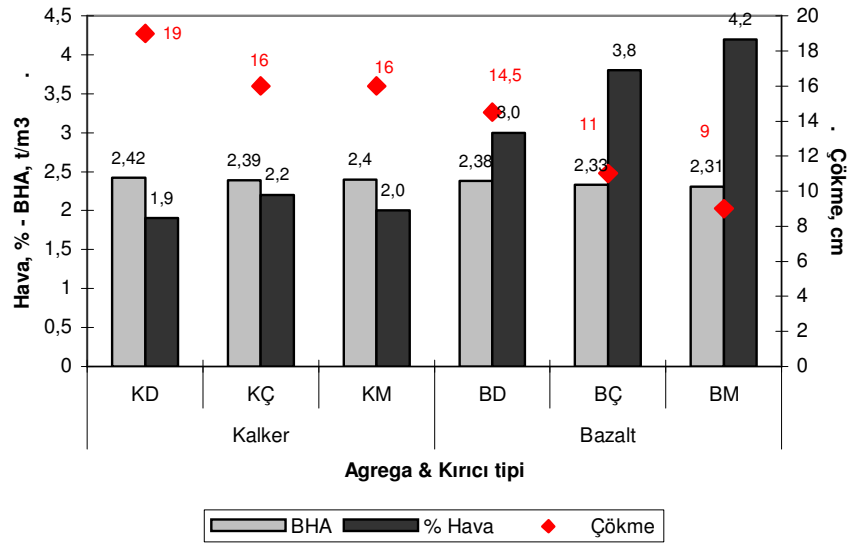
Beton karışımları düşey milli betoniyer kullanılarak hazırlanmıştır. Her bir seride 40 dm³'lük 3'er karışım hazırlanmıştır. Karışımlar önce iri ve ince agregadan sonra çimentonun 2 dakikalık kuru karışımı, ardından 2/3 su ilavesi ile 2 dakika ve 1/3 su ilavesi toplam 5'er dakikalık karışım sürelerinde hazırlanmıştır. Kimyasal katkı karışım suyuna eklenmek sureti ile kullanılmıştır. Farklı kırıcılarla kırılan agregaların su emmeleri çok az değişmekle birlikte, su emmeler oranında su eklenmiştir.

Her karışımda 7. ve 28. günlük basınç deneyleri için 6 adet 15cm ayrıtlı küp, silindir yarma ve elastisite modülü deneyleri için 12 adet 10x20 cm ayrıtlı silindir ve 4 noktalı eğilme deneyleri için 6 adet 10x10x60 cm ayrıtlı beton prizma örnekleri hazırlanmıştır.

6.3.3 Taze Beton Deneyleri

Dökümler kalker ve bazalt agregaları için aynı günlerde yapılmış olup, hava açık ve parçalı bulutludur. Kireçtaşı agregalı karışımların dökümü sırasında hava sıcaklığı gölgede 22±1 °C olarak ölçülmüştür. Taze betonların, karışımdan 3 dakika sonraki sıcaklığı 25,2 °C olarak ölçülmüştür. Bazalt agregalı karışımların dökümü sırasında hava sıcaklığı 24±2 °C ve betonun kalıplarına yerleştirilmeden önceki sıcaklığı 26,4°C olarak ölçülmüştür. Hiçbir seride terleme olayı gözlenmemiştir. Karışımlar akıcı kıvamdadır.

Taze beton numunelerinin ölçülen çökme, taze BHA ve hapsolmuş hava yüzdesi ortalamaları Şekil 6.13’de görülmektedir. Değerler, her 3 döküm için yapılan ölçüm sonuçlarının ortalaması şeklinde verilmiştir.



Şekil 6.13 Agregas & Kırıcı tipinin taze beton özelliklerine etkisi

Kireçtaşı ve bazalt agregalarının mekanik özellikleri farklı olduğundan, sonuçlar ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Ancak çalışmanın bütününe göz önünde bulundurulması bakımından, değerler aynı grafik üzerinde fakat mineral cinsine göre ayrı dokularla ifade edilmişlerdir.

Taze beton özelliklerindeki değişimin nedeni, diğer tüm karışım bileşenleri ve üretim koşulları aynı olduğundan, iri ve ince agrega şekli ve yüzey pürüzlülüğüdür.

Kireçtaşı agregasında en yüksek işlenebilirlik 19 cm çökme değeri veren KD karışımında elde edilmiştir. KÇ ve KM karışımlarının işlenebilirliklerinde (16 cm) bir miktar azalma görülmektedir. BD karışımı için çökme değeri 14,5 cm iken BÇ ve BM karışımlarında farklar biraz daha belirgin olup sırası ile 11 cm ve 9 cm değerlerini ölçülmüştür.

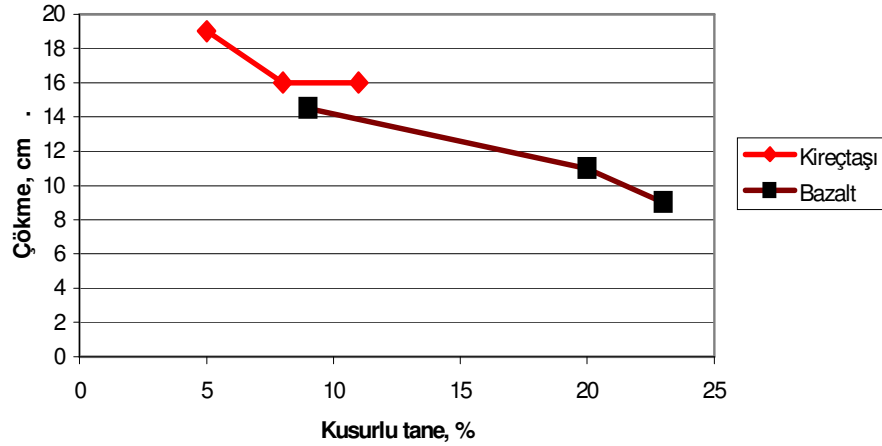
Karışımların hapsolmuş hava içerikleri kireçtaşı agregalı karışımlarda birbirine çok yakın değerlerdedir. Hava içeriklerinde KD agregasına göre KÇ ve KM serilerinde bir miktar artış görülmektedir. Bazalt agregalı karışımlarda ise farklar daha belirgindir. BD karışımının hava içeriği %3 iken, BÇ ve BM karışımlarında hava içeriği %3,8 ve %4,2 seviyelerine çıkmıştır (Şekil 6.13). Hapsolmuş hava yüzdesindeki artışının muhtemel nedeni, yassı ve uzun agreg taneleri altında betonun yerleştirilmesi sırasında hapsolan hava kabarcıklarıdır. Çökme değerlerinin farklı oluşu da bu olayda rol oynamış olsa da, karışım oranları sabit tutulduğundan bu durumun da nedeni kusurlu agreg yüzdesindeki farklılıktır. Kullanılan hiperakışkanlaştırıcı katkının da bir miktar hava sürüklediği gözlenmiştir. Ancak katkı cinsi ve oranı tüm karışımlar için aynı olduğundan, hapsolmuş hava miktarlarındaki farklar üzerinde akışkanlaştırıcı katkının etkisinin olmadığı söylenebilir.

Karışımların BHA'ları yakın değerlerdedir. Kireçtaşı agregalarının BHA'lıkları teorik BHA'a yakın seviyelerdedir. Darbeli kırıcı ile kırılmış agregalara (KD; BD) kıyasla çeneli ve merdaneli kırıcılarda kırılmış agregalı karışımların (KÇ, KM; BÇ, BM) BHA'ları bir miktar azalmaktadır. Bunun nedeni karışımların hava içeriklerindeki artış olabilir.

Bölüm 5'de verilen, iri agregada kusurlu malzeme yüzdesinin belirlendiği TS EN 933-3 "Yassılık indeksi" ve TS EN 933-4 "Şekil indeksi" yöntemleri ile ince agregalarda şekil ve yüzey pürüzlülüğünün göstergesi olan TS EN 933-6 ve ASTM C1252 deney sonuçları ile kıyaslandığında (Şekil 5.20-5.24), KÇ ve KM agregalarının kusurlu malzeme oranlarının KD'ye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Kullanılan kırma yöntemine göre kusurlu tane yüzdesindeki değişimler, bazalt agregalarında daha geniş bir aralıkta değişmektedir.

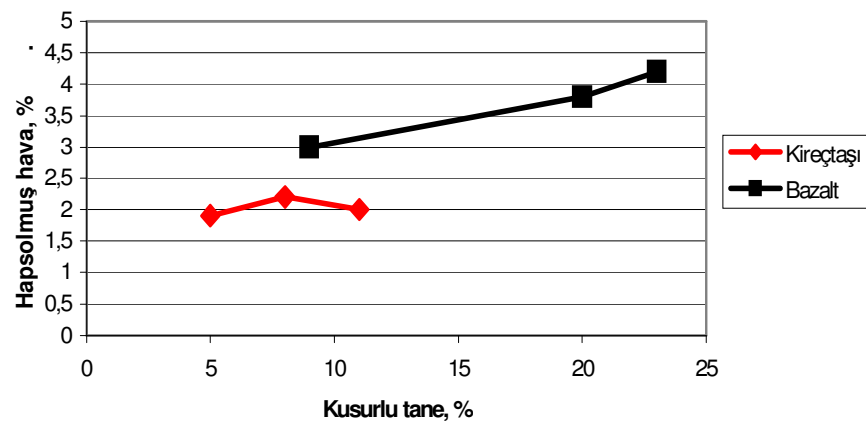
İri kireçtaşı ve bazalt agregalarında TS EN 933-3 yöntemi ile belirlenen kusurlu tane yüzdesi ile taze betonda çökme ve hapsolmuş hava miktarları Şekil 6.14 ve 6.15'de görülmektedir. Agregaları kırmak için farklı kırıcı tipleri bulunamadığından, agreg tanelerinin yüzey özellikleri ve kusurlu tane oranları üçden fazla

çeşitlendirilememiştir. Bu nedenle grafiklerde, kusurlu tane oranına göre taze beton özellikleri arasında mertebe tahmini yapılmıştır.



Şekil 6.14 Kireçtaşı ve bazalt agregalarında kusurlu tane %'si ve taze betonda çökmeler

Agregalarda kusurlu tane yüzdesi arttıkça, taze betonda çökme değerleri yani karışımların işlenebilirliği azalmaktadır. Bazalt agregalarında kusurlu tane oranı daha geniş bir aralıkta değiştiğinden farklar iyi bir şekilde gözlenebilmektedir. Bazalt agregalarında kusurlu tane oranı arttıkça, karışımlarda hapsolmuş hava yüzdeleri de artmıştır.



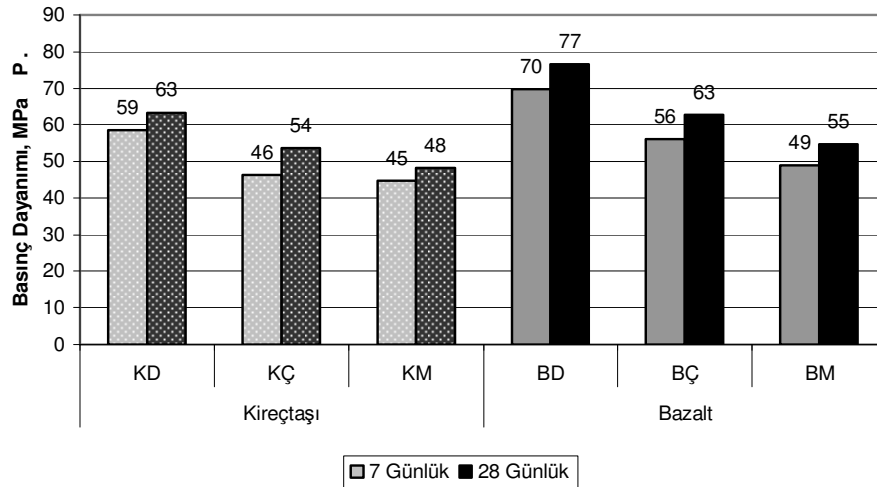
Şekil 6.15 Kireçtaşı ve bazalt agregalarında kusurlu tane %'si ve taze betonda hapsolmuş hava %'si

6.3.4 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton deneyleri, Bölüm 6.2.2’de verilen deney düzenekleri ve yükleme koşullarında yapılmıştır. Deneyler 7 ve 28 günlük örneklerde, her seride 3’er numune üzerinde yapılmıştır. Grafiklerde kireçtaşı ve bazalt agregaları ayrı dokularla ifade edilmiştir.

6.3.4.1 Basınç Dayanımı

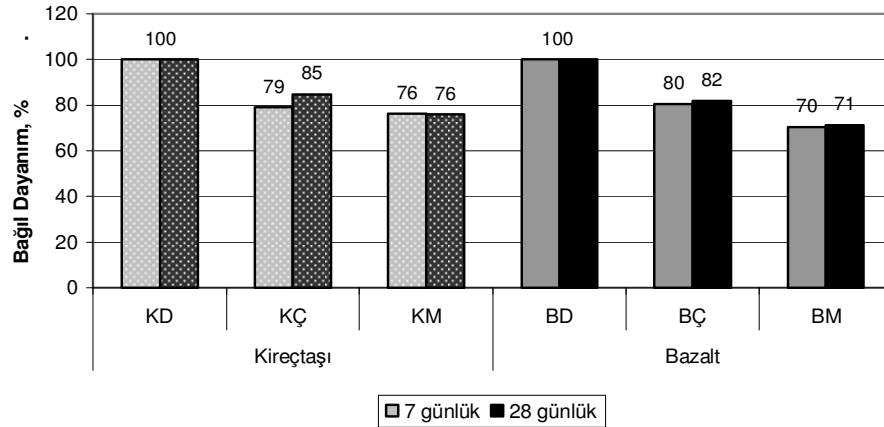
Basınç dayanımı deneyleri standart 15 cm’lik küp örnekler üzerinde yapılmış olup, deney sonuçlarının ortalamaları Şekil 6.16’da görülmektedir.



Şekil 6.16 Agrega ve Kırıcı tipine göre beton basınç dayanımları

Kireçtaşı serisinde KD’ye göre KÇ ve KM örneklerinin basınç dayanımları daha düşüktür. Bazalt serisi için de benzer bir durum söz konusudur. Karışım özellikleri, kür koşulları ve yükleme koşulları sabit olduğundan dayanımlardaki düşüşün nedeni agrega şekli olmaktadır.

Kireçtaşı ve bazalt serilerinde en yüksek basınç dayanımlarını veren KD ve BD basınç dayanımlarına göre bağıl dayanım yüzdeleri Şekil 6.17’de verilmiştir.



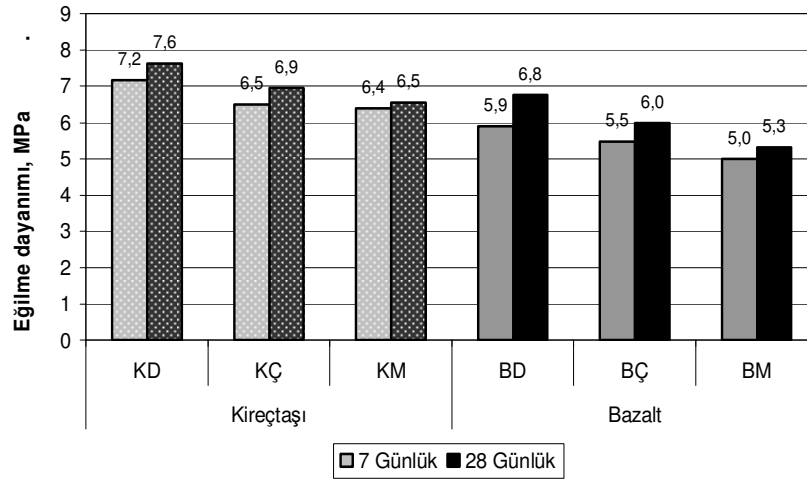
Şekil 6.17 Agrega & Kırıcı tipine göre beton basınç dayanımı bağıl yüzdeleri

Kireçtaşı serisinde, 7 ve 28 günlük örneklerde basınç dayanımları KD'ye göre KÇ için % 21 ve % 15, KM için %24 daha düşüktür. Bazalt serisinde bu dayanım kayıpları BÇ için %20 ve %18, BM için %30 ve %29 olmaktadır.

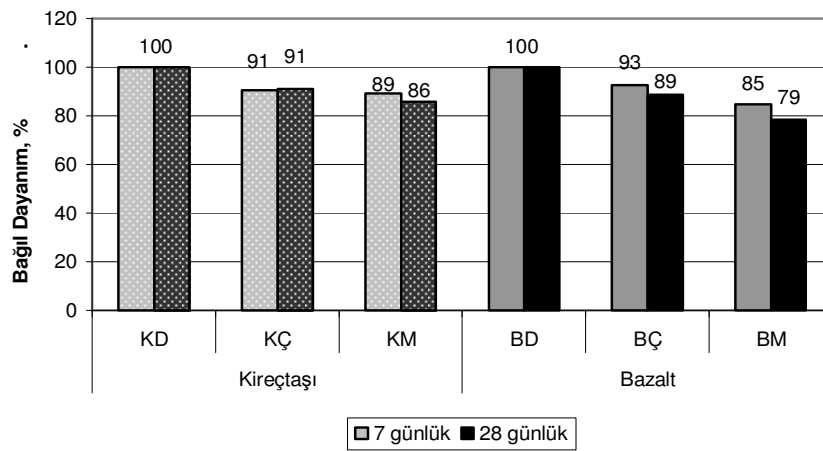
Şekildeki dayanım kayıpları incelendiğinde; kireçtaşlarında bazalta göre kusurlu tane yüzdesindeki artış oranı daha az olmasına rağmen, basınç dayanımı bağıl yüzdelerindeki azalma eğilimleri birbirine yakın mertebelerdedir. Bu durum, bazaltın kalkere göre daha sert olması nedeniyle, kusurlu tanelerin aynı basınç gerilmeleri altında daha fazla dayanım göstermeleri ile açıklanabilir. Bu nedenle, kireçtaşlarının basınç dayanımı açısından kusurlu tane yüzdesine daha duyarlı olduğu söylenebilir.

6.3.4.2 Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı deneyleri, 10x10x60 cm ebatlarındaki prizma örneklerde yapılmıştır. Her seride 7 ve 28 günlük 3'er prizma örneğinin ortalama eğilme dayanımları ve bağıl dayanım yüzdeleri Şekil 6.18 ve 6.19'da görülmektedir.



Şekil 6.18 Agrega & Kırıcı tipine göre beton eğilme dayanımları



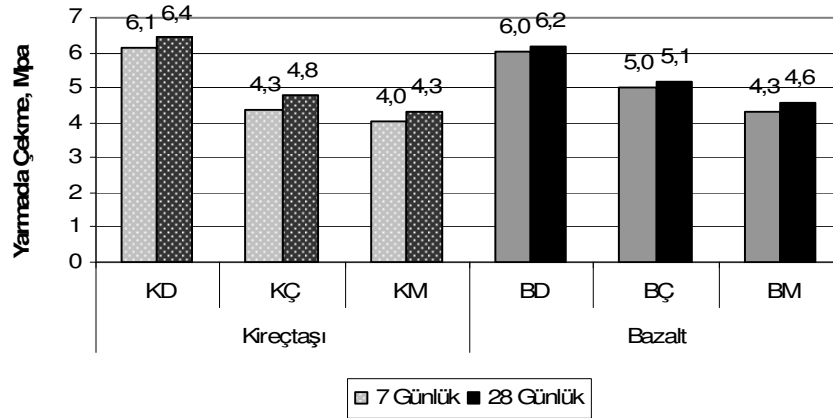
Şekil 6.19 Agrega & Kırıcı tipine göre beton eğilme bağıl dayanım yüzdeleri

Kireçtaşı serisinde KD'ye göre KÇ ve KM örneklerinin eğilme dayanımları daha düşüktür. Dayanım kayıpları, 7 ve 28 günlük örnekler için sırasıyla %9-9 ve %11-14 civarındadır. Bazalt serisi için de benzer bir durum söz konusudur. Dayanım kayıpları 7 ve 28 günlük BÇ ve BM örnekleri için sırasıyla %7-11 ve %15-21 civarındadır. Karışım parametreleri, kür koşulları ve yükleme koşulları sabit olduğundan, dayanım kayıplarının nedeni agrega şekli ve kusurlu malzeme yüzdesindeki artıştır.

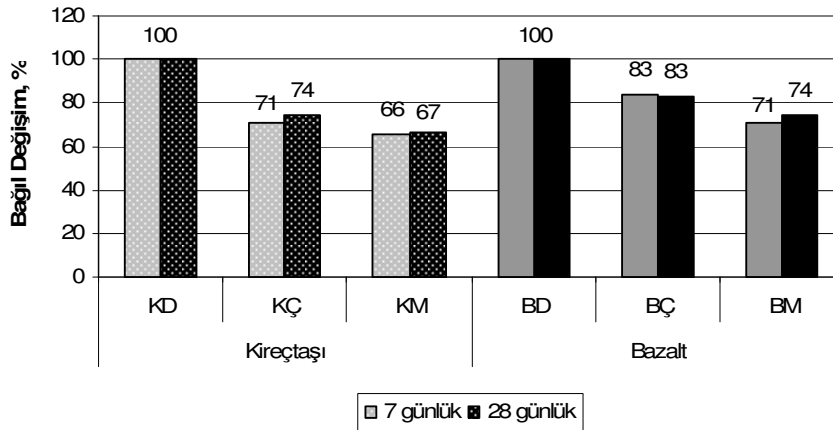
Bazaltın BÇ ve BM serilerinin basınç ve eğilme dayanımları, kireçtaşının aynı serilerine göre daha fazla azalmaktadır. Bunun nedeni, bazaltın kusurlu malzeme oranlarının daha fazla olmasıdır. Özellikle merdane kırıcıda kırılmış bazalt (BM) için dayanım kayıpları daha belirgin olmaktadır. Kusurlu tane yüzdesinin artması ile karışımların eğilme dayanımı bağlı yüzdeleri azalmaktadır.

6.3.4.3 Silindir Yarma Dayanımı

Yarmada çekme dayanımı deneyleri 10x20 cm'lik silindir örnekler üzerinde yapılmıştır. Deney sonuçlarının ortalamaları ve bağlı dayanım yüzdeleri Şekil 6.20 ve Şekil 6.21'de görülmektedir.



Şekil 6.20 Agrega kırıcı tipine göre beton yarmada çekme dayanımları

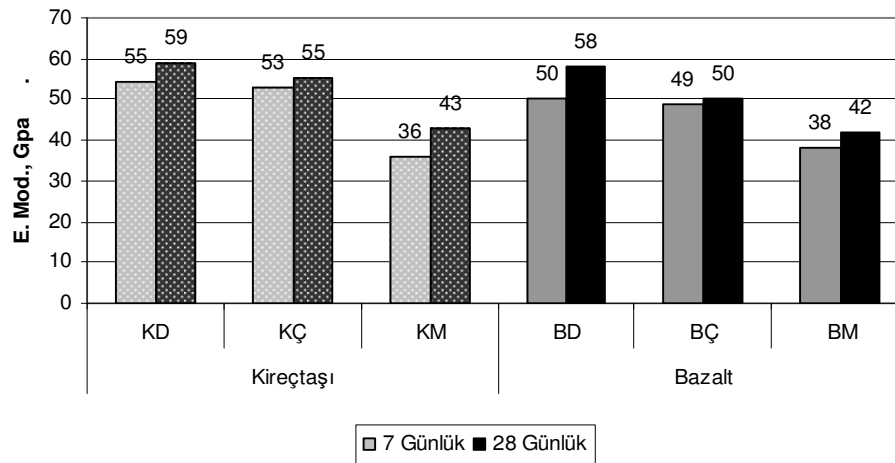


Şekil 6.21 Agrega kırıcı tipine göre beton yarmada çekme dayanımı bağıl değişimleri

Diğer mekanik deneylerde olduğu gibi, yarmada çekme dayanımlarında da kırıcı tipine göre beton dayanımları değişmektedir. Agregası kırma yöntemine göre, bağlı dayanım değişimleri, yarmada çekme dayanımlarında daha belirgindir. Dayanım kayıpları KD'ye göre KÇ ve KM agregaları için 28 günlük silindir örneklerde %26 ve %33 oranındadır. Bazalt agregalarında ise aynı kırıcı tipleri için oranlar %17 ve %26'dır.

6.3.4.4 Elastisite Modülleri

Farklı kırıcı tiplerinde kırılmış agregalarla üretilen beton örneklerinin gerilme-birim şekil değiştirme ölçümleri 10x20 cm ebatlı silindir örneklerde yapılmıştır. Her seride 7 ve 28 günlük 3'er prizma örneğinin ortalama elastisite modülleri Şekil 6.22'de verilmiştir.



Şekil 6.22 Agregası & Kırıcı tipine göre beton elastisite modülleri

Kireçtaşı agregası için KD'ye göre KÇ ve KM örneklerinin elastisite modülleri daha düşüktür. Bazalt serisi için de benzer bir durum söz konusudur. Karışım parametreleri, kür koşulları ve yükleme koşulları sabit olduğundan elastisite modüllerindeki düşüşün nedeni, agregası şekli ve kusurlu malzeme yüzdesindeki artıştır. Bazalt agregalı beton serilerinin basınç dayanımları, kalker agregalı beton serilerinin basınç dayanımlarından kendi kırıcı tipi grupları arasında fazla olmasına

rağmen, elastisite modüllerinde tersi bir durum söz konusudur. Bazalt içeren karışımların geçiş bölgesinin zayıf olması bu olayda rol oynayabilir.

Agrega şekli ve yüzey pürüzlülüklerindeki değişim, taze ve sertleşmiş beton performansı üzerinde etkili bir faktördür. Bu nedenle standartlarda belirtildiği gibi sonuçların sadece kusurlu tane yüzdesindeki değişimlerle ilişkilendirilmesi gerçekçi değildir. Ancak, agrega yüzey pürüzlülüğünün beton karışım özelliklerine etkisinin agrega şeklinden bağımsız olarak belirlenmesi, daha farklı bir yaklaşımı gerektirir. Bu amaçla yapılan çalışma Bölüm 6.6'da görülebilir.

6.3.5 Mineral Agregası Cinsi ve Kusurlu Malzeme Yüzdesi Açısından Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Darbeli kırıcılarla kırılan kireçtaşı ve bazalt (KD, BD) agregalarının kusurlu malzeme yüzdesi, aynı agrega cinsi için çeneli ve merdaneli kırıcılarla kırılan agregalara (KÇ, KM; BÇ, BM) kıyasla daha düşüktür (Bölüm 5, Şekil 5.20-5.24). Darbeli kırıcılarla kırılan tanelerin şekli daha kübik ve köşeli, merdaneli kırıcılarla kırılan agrega şekilleri ise yassı, uzun ve biçimsiz olabilmektedir. Agregaların bu özellikleri, kullanıldıkları beton karışımlarının mekanik özellikleri üzerinde etkilidir. Aynı karışım özelliklerindeki KD grubu beton örnekleri, KÇ ve KM'e göre, BD grubu beton örnekleri ise BÇ, BM'e göre daha yüksek mekanik dayanımlar vermiştir. Darbeli kırıcılarla kırılmış kübik şekilli agregalarla üretilen betonların işlenebilirlikleri, kusurlu malzeme oranı yüksek betonlara kıyasla daha yüksektir. Bu nedenle su ve çimento hamuru ihtiyaçları daha az olmaktadır. Kübik yapıda agregalarla üretilen betonlarda hapsolmuş hava yüzdesi de, kusurlu agrega oranı yüksek betonlara kıyasla daha az olup, kübik agregalarla daha yoğun karışımlar hazırlanabilir.

Kireçtaşı agregalarında kusurlu malzeme oranı, aynı kırıcı tipleri için bazalt agregalarına kıyasla daha düşüktür (Şekil 5.20-5.24). Profilometre ile yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde, kireçtaşı agregasının yüzey dokusunun bazalt agregasına göre daha pürüzlü olduğu görülmüştür. Bunun nedeni Aliağa bazaltının laminallı yapıda olması ve bazalt minerallerinin daha ince kristalli olmasıdır. Bazalt ile

Üretilen betonların kendi kırıcı gruplarında, kireçtaşı kullanılan karışımlara göre daha yüksek basınç dayanımı verdiği görülmektedir. Bununla birlikte, eğilme dayanım açısından tam tersi bir durum söz konusudur. Bu nedenle agrega kökeni, sertleşmiş betonun basınç dayanımı açısından daha baskın bir faktörken, eğilme dayanımı açısından tane şekli ve yüzey pürüzlülüğü önem kazanmaktadır. Bu nedenle, Agregas ęekli ve yüzey pürüzlülüğünün betonun eğilme dayanımı açısından daha kritik olduğu söylenebilir.

6.3.6 Agregas Kırma Yöntemi Açısından Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kireçtaşı ve bazalt agregalarında, üç farklı kırıcı tipi için yapılan değerlendirmede; darbeli kırıcıların çeneli ve merdaneli kırıcılara göre agregas özelliklerini iyileştirdiği ve betonda mekanik kenetlenme açısından beton performansına olumlu katkısının bulunduğu söylenebilir (Tablo 6.20-6.21).

Bölüm 3’de bahsedildiği üzere, darbeli kırıcılar agregayı darbe etkisi ile kısa kolon gibi yüklerler. Serbestçe düşen cevher parçasına döner ekiler vasıtasıyla uygulanan darbe kuvveti, kayaç içinde gerilmelere ve kısa sürede parçalanmaya neden olmakta ve bu kuvvetler parçaların kırıcı plakalara çarpmasıyla daha da artmaktadır. Darbe veya basınçla kırma arasında önemli fark şudur; Basınçla kırılan parçalardaki iç gerilmeler daha sonra çatlamalara neden olurlar, darbe ise ani kırılmaya neden olur ve parça içinde gerilme kalmaz. Tane çatlaksız yapıdadır. Bu gerilmesiz tane hali özellikle imento veya bitümlü karışımlarda kullanılan agregalar için önemli olmaktadır.

Çeneli kırıcıların numuneyi baskı ve aşındırma etkisi ile kırarlar. Aşındırma etkisi nedeni ile üründe toz oranı fazla olmaktadır. Bazalt gibi sert ve düşük aşınma gösteren malzemeleri kırmak için özellikle uygun değildir. Çeneler sert malzemeyi aşındıramadığı için sıkışma problemi yaşanır.

Tablo 6.20 Kireçtaşı agregaları için uygun kırıcı tipi değerlendirmesi

Özellik		Kırıcı Tipi		
		Darbeli	Çeneli	Merdaneli
Beton özelliği	Başıç dayanımı	2*	1	0*
	Eğilme dayanımı	2	1	0
	Yarmada Çekme	2	1	0
	Elastisite Modülü	2	1	0
	İşlenebilirlik	2	0	1
	Terleme	2	2	2
	KYD, BHA	2	0	1
	Kuru, BHA	2	0	1
	Hapsolmuş Hava, %	2	0	1
Agrega özelliği	Yuvarlaklık	2	1	0
	Konkavlık	2	1	0
	Dış merkezlik	2	1	0
	Köşelilik	2	1	0
	Pürüzlülük	2	2	2
	Kabalık	2	2	1
	Yarıçaplar oranı	2	0	1
	DA oranı, %	2	1	0
	Sıkışmamış boşluk, %	1	0	2
	Kusurlu malzeme, %	2	1	0
	Los Angeles	2	1	1
	Gevşek BHA	2	1	0
	Sıkışık, BHA	2	1	0
Kırıcı	Toz oranı	1	0	2
	Kapasite	2	1	0
	Kırma oranı	2	1	0
	Granülometri	2	1	0
	Çatlak, gerilme	2	0	1
	Enerji	2	1	0
	Bakım	2	1	0
	Ebat	2	1	0
	Maliyet	2	1	0

*Performans derecelendirmesi “0” için en düşük “2” için en yüksektir.

Tablo 6.21 Bazalt agregaları için uygun kırıcı tipi değerlendirmesi

Özellik		Kırıcı Tipi		
		Darbeli	Çeneli	Merdaneli
Beton özelliği	Basıç dayanımı	2*	1	0*
	Eğilme dayanımı	2	1	0
	Yarmada Çekme	2	1	0
	Elastisite Modülü	2	1	0
	İşlenebilirlik	2	1	0
	Terleme	2	2	2
	KYD, BHA	2	1	0
	Kuru, BHA	2	1	0
	Hapsolmuş Hava, %	2	1	0
Agrega özelliği	Yuvarlaklık	2	1	0
	Konkavlık	2	1	0
	Dış merkezlik	2	1	0
	Köşelilik	2	1	0
	Pürüzlülük	2	2	2
	Kabalık	2	2	2
	Yarıçaplar oranı	2	0	1
	DA oranı, %	2	1	0
	Sıkışmamış boşluk, %	1	0	2
	Kusurlu malzeme, %	2	1	0
	Los Angeles	2	1	0
	Gevşek BHA	2	1	0
	Sıkışık, BHA	2	1	0
Kırıcı	Toz oranı	1	0	2
	Kapasite	2	1	0
	Kırma oranı	2	1	0
	Granülometri	2	1	0
	Çatlak, gerilme	2	0	1
	Enerji	2	1	0
	Bakım	2	1	0
	Ebat	2	1	0
	Maliyet	2	1	0

*Performans derecelendirmesi “0” için en düşük “2” için en yüksektir.

Merdaneli kırıcılarda malzeme, silindir yüzeyi ile diğer yüzey arasında basınç gerilmesi etkisiyle kırılır. Bu kırıcılar diğer kırıcılara nazaran daha yassı malzeme içeren ürün verirler ve ufalama oranları daha düşüktür (1:2–1:4). Bu tip kırıcıların en büyük dezavantajları, uygun bir ufalama oranı elde etmek için besleme malzemesi boyutlarına göre çok büyük çaplı merdaneler yapılması gereğidir. Bu nedenle bütün kırıcılar içinde en pahalı olanıdır. Bu hali ile kırıcıların beton agregası üretimi

açısından uygun olmadıkları söylenebilir. Merdaneli kırıcılar nemli malzemeleri kırmak için uygundur ve enerji tüketimleri azdır.

6.4 Farklı Yüzdelerde Kusurlu Agregaya İçeren Beton Karışımları

Deneysel çalışmanın bu bölümünde, kusurlu agregaya yüzdesinin taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir. Deney sonuçları, Bölüm 6.3’de elde edilen sonuçları destekleyecek biçimde, kusurlu agregaya yüzdesi arttıkça taze ve sertleşmiş beton özelliklerindeki değişimi göstermesi bakımından önemlidir.

Beton karışımlarında kullanılabilecek kusurlu agregaya yüzdesinin üst sınırı ile ilgili farklı sınırlamalar bulunmaktadır. Eski Türk standartlarından TS 706’da tane boyutu 8 mm’den büyük iri agregalar için şekilce kusurlu tanelerin oranının %50’den çok olmaması istenmekteydi. Yeni TS 706 EN 12620’de şekilce kusurlu taneler ile ilgili bir sınır değeri verilmemektedir. ASTM C33 “Standard Specification for Concrete Aggregates” standardında şekilce kusurlu tane oranının %30’dan, “USA The Corps of Engineers Specifications” da ise %25’den fazla olmaması istenmektedir. İngiliz standardı (BS 812), yassı ve uzun tane oranını %35-40 ile sınırlandırmıştır. Mehta ve Monteiro (1993)’ya göre beton karışımlarında kullanılacak yassı ve uzun tane oranı agregaya ağırlığının %15’inden fazla olmamalıdır. Mindess (1981)’de benzer şekilde beton agregalarındaki kusurlu tane oranının %10-15’den fazla olmaması gerektiğini söylemektedir. Bu nedenle deneylerden elde edilecek sonuçlar, kusurlu agregaya yüzdesi arttıkça taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin nasıl etkilendiğini göstermesi bakımından önemlidir.

6.4.1 Karışım Malzemeleri

Deneysel çalışmalarda, Bölüm 6.1.1’de özellikleri verilen karışım malzemelerinden başka, aşağıda özellikleri verilen iri ve ince agregalar kullanılmıştır.

6.4.1.1 İri ve İnce Agregalar

Agregaların farklı kırıcılarla kırılması sonucunda en yüksek kusurlu tane oranı (%26) merdaneli kırıcıda kırılmış bazalt agregasında elde edilebilmiştir (Şekil 5.20). Bu nedenle deneylerde kullanmak üzere daha yüksek oranlarda kusurlu tane içeren agregalar gerekmektedir.

Karışımlarda kullanılan agregalar, Dere Madencilik Kavaklıdere ocağından temin edilen, darbeli kırıcı ile kırılmış kireçtaşı agregası ve Famerit A.Ş.'den temin edilen ve yüksek oranda yassı, uzun ve biçimsiz tane içeren Ören çakılıdır. Darbeli kırıcıda kırılmış kireçtaşı agregasının fiziksel özellikleri Tablo 6.15-6.16'da verilmişti. Ören çakılının fiziksel özellikleri de Tablo 6.22'de verildiği gibidir. Kireçtaşı agregasının kusurlu tane oranı %5 olup, Ören çakılı, kireçtaşı agregası iri tane boyut aralıklarına, kusurlu malzeme oranı %15, %30, %50 olacak şekilde ikame edilerek kullanılmıştır. Hazırlanan iri ve ince agregaların en büyük tane boyutu 25 mm olmak üzere granülometri eğrisi Şekil 6.23'de görüldüğü gibi düzenlenmiştir.

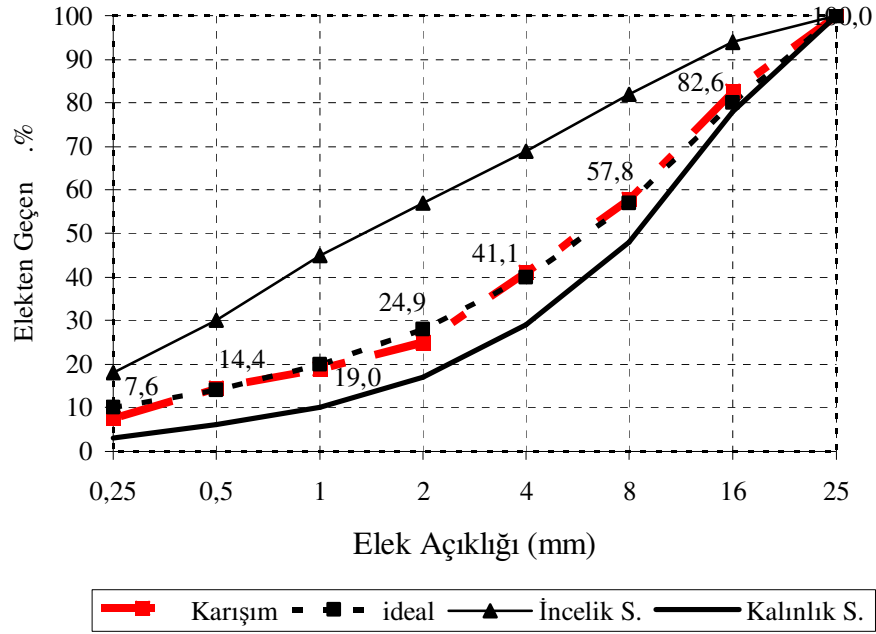
Tablo 6.22 Ören çakılının fiziksel özellikleri

Özellik	İri Agrega		Deney Standardı
	5/15	15/25	
KYD Özgül ağırlık	2,60	2,62	TS EN 1097-6
Su emme (%)	1,10	1,05	TS EN 1097-6
İnce malzeme (%)	-	-	TS 3527
Organik madde	yok	yok	TS 3673
Kusurlu malzeme %'si	90	92	TS EN 933-4
Los Angeles aşınma %'si 100 devir, (%) 500 devir, (%)	7 30		TS EN 1097-2

6.4.2 Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Beton Karışımlarının Hazırlanması

Farklı kusurlu malzeme oranlarındaki agrega örnekleri ile aynı S/Ç oranı ve karışım koşullarında beton numuneleri hazırlanmıştır. Karışım oranları ile dış faktörlerden beton üretim koşulları, beton döküm sıcaklığı, kür koşulları ve süresi sabit tutulmaya çalışılmıştır. Beton bileşenleri Tablo 6.23'de görülmektedir.

Tablodaki ağırlıklar kuru ağırlıklar olup, agregaların su emme değerlerine göre su miktarı artırılmıştır.



Şekil 6.23 Farklı kusur oranlarındaki agregalarla hazırlanan beton karışımları için granülometri eğrisi

Beton karışımları yatay milli laboratuvar tipi mikser kullanılarak yapılmıştır. Her %' için 40 dm³'lük 3'er set karışım hazırlanmıştır. Dökümler sırasında hava açık ve parçalı bulutlu, gölgede 24±3 °C olarak ölçülmüştür. Beton sıcaklıkları karışım kalıplarına yerleştirilmeden önce 26±2 °C olarak ölçülmüştür. %30 ve %50 kusurlu tane içeren karışımlarda terleme gözlenmiştir. Karışımlar akıcı kıvamdadır.

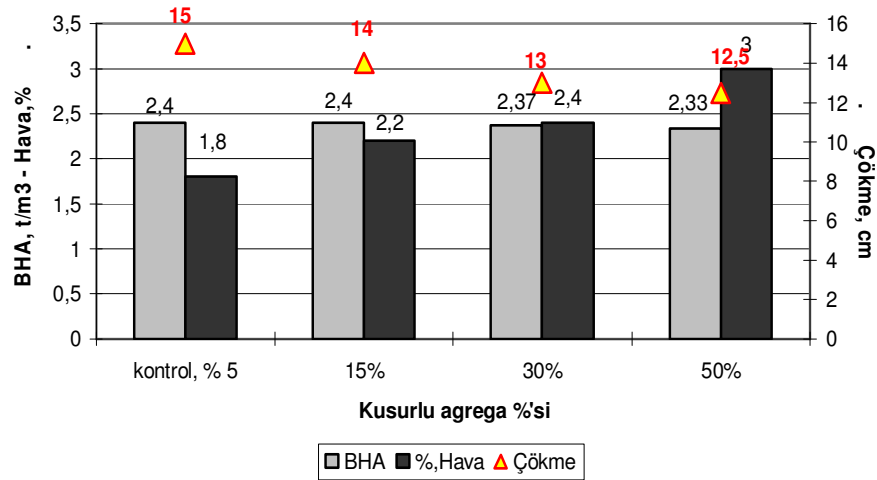
Tablo 6.23 Farklı yüzdelerde kusurlu tane içeren beton bileşenleri ve karışım oranları

Bileşen	Kusurlu Agregaya Yüzdesi							
	Kontrol, % 5		% 15		% 30		% 50	
	W (kg/m ³)	H (dm ³)	W (kg/m ³)	H (dm ³)	W (kg/m ³)	H (dm ³)	W (kg/m ³)	H (dm ³)
Çimento (Ç)	360	115	360	115	360	115	360	115
Su (S)	162	175	162	175	163	176	163	177
0-5 mm	846	305	842	304	839	303	832	300
5-15 mm	510	189	460	170	379	140	265	98
15-25 mm	530	195	480	177	394	145	282	104
5-15 mm	0	0	45	17	122	46	228	86
15-25 mm	0	0	46	17	128	48	232	87
Akş. Katkı	5	3,0	5	3,0	5	3,0	5	3,0
Hava	-	18	-	22	-	24	-	30
Toplam	2413	1000	2400	1000	2390	1000	2367	1000
Su /Çimento	0,45		0,45		0,45		0,45	
Su/Bağlayıcı	0,45		0,45		0,45		0,45	
KA/İA	1,22		1,22		1,22		1,22	
Akş.Kt(% Ç)	1,4		1,4		1,4		1,4	
Teorik BHA	2,413 t/m ³		2,400 t/m ³		2,390 t/m ³		2,367 t/m ³	

Her karışımdan 7. ve 28. günlük basınç deneyleri için 6 adet 15cm ayrıtlı küp, silindir yarma ve elastisite modülü ölçümleri için 12 Adet 15x30 cm ayrıtlı silindir ve 6 adet 10x10x60 cm ayrıtlı beton prizma örnekleri hazırlanmıştır. Küp ve prizma örnekleri iki tabaka halinde, silindir örnekler 3 tabaka halinde ve her bir tabaka 25'er kez şişlenerek ve 1 dakika sarsma uygulanarak sıkıştırılmış ve yüzeyleri perdahlanmıştır. Örnekler, +21±1 °C sıcaklık ve %90 nem koşullarındaki iklimlendirme odasında tutulmuşlardır. Kalıplarından 24 saat sonra çıkarılan örnekler, deney gününe kadar 21±1 °C'de kirece doymun suda kür edilmiştir.

6.4.3 Taze Beton Deneyleri

Taze beton karışımlarının çökme, taze BHA ve hapsolmuş hava yüzdesi ortalama değerleri Şekil 6.24'da görülmektedir.



Şekil 6.24 Kusurlu agregat yüzdesinin taze beton özelliklerine etkisi

En yüksek çökme değeri 15 cm olarak kontrol karışımında ölçülmüştür. Kusurlu malzeme oranı arttıkça, çökme değerlerinde bir miktar azalma olduğu görülmektedir. Buradan hareketle, agreganın kusurlu malzeme yüzdesindeki artışın karışımların işlenebilirliğini düşürdüğü söylenebilir. Ancak işlenebilirlikteki azalma bir önceki deneysel çalışmadaki kadar belirgin değildir. Bunun nedeni, kusurlu agregat olarak kullanılan Ören çakılının yüzey pürüzlülüğünün kalkere göre daha az olması olabilir.

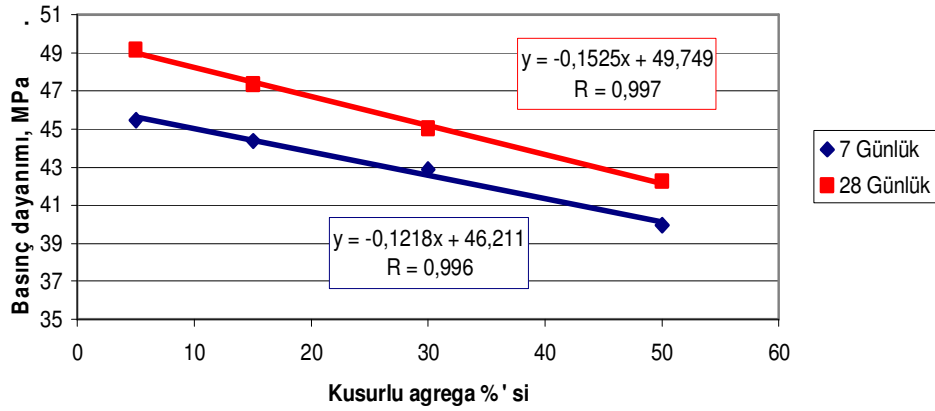
Karışımların hava içerikleri kusurlu malzeme yüzdesi arttıkça artmaktadır. Bu artma bir dereceye kadar işlenebilirlikteki azalmaya bağlı olabileceği gibi, esasen betonun yerleştirilmesi sırasında kusurlu taneler altında hapsolan hava kabarcığı miktarının daha fazla olması ile açıklanabilir. Buna bağlı olarak, kontrol karışımına göre kusurlu malzeme yüzdesi arttıkça, karışımlarının BHA'ları da bir miktar azalmaktadır.

6.4.4 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton deneyleri Bölüm 6.2.1'de verilen deney düzenekleri ve yükleme koşullarında yapılmıştır. Deneyler 7 ve 28 günlük örneklerde 3'er numune üzerinde yapılmıştır.

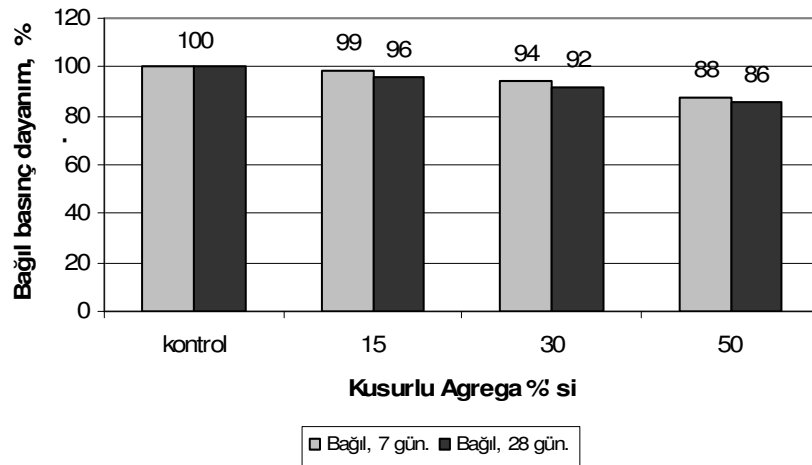
6.4.4.1 Basınç Dayanımı

Farklı kusurlu agreg a yüzdel erinde hazırlanan beton örneklerinin basınç dayanımları ve kontrol karışımına göre bağı l dayanım yüzdel eri Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'da görülmektedir.



Şekil 6.25 Kusurlu agreg a yüzdesine beton basınç dayanımları

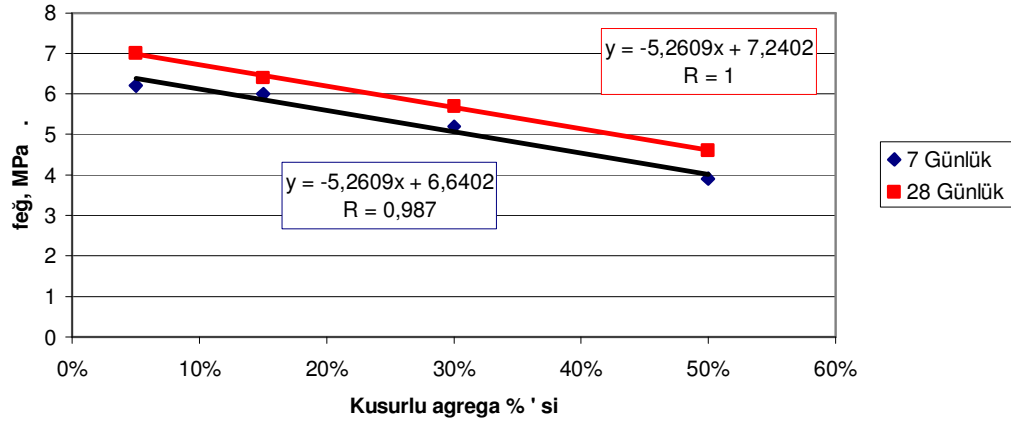
Basınç dayanımları kusurlu malzeme yüzdesi arttıkça azalmaktadır. Dayanım kayıpları, kontrol karışımına göre %50 kusurlu tane oranında 28 günlük örneklerde %14 mertebelerindedir (Şekil 6.26).



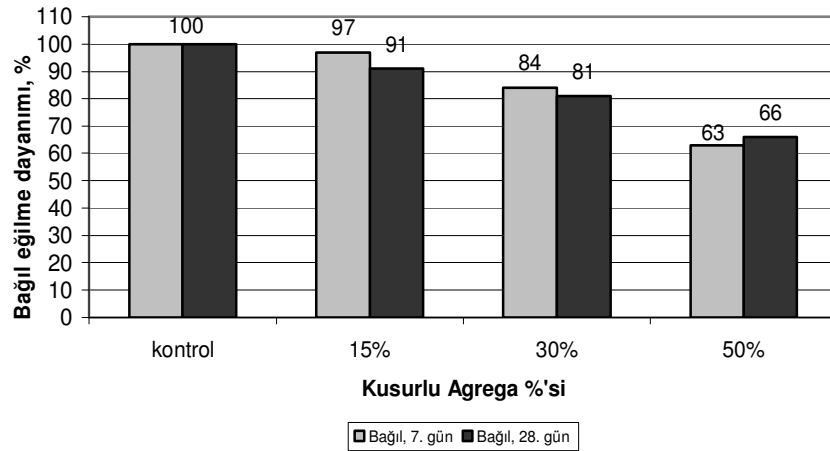
Şekil 6.26 Kusurlu agreg a yüzdesine göre bağı l dayanım yüzdel eri

6.4.4.2 Eğilme Dayanımı

Farklı kusurlu agregâ yüzdelerinde hazırlanan karışımların eğilme dayanımları ve kontrol karışımına göre bağıl dayanım yüzdeleri Şekil 6.27 ve 6.28’de görülmektedir.



Şekil 6.27 Kusurlu agregâ yüzdesinin beton eğilme dayanımına etkisi

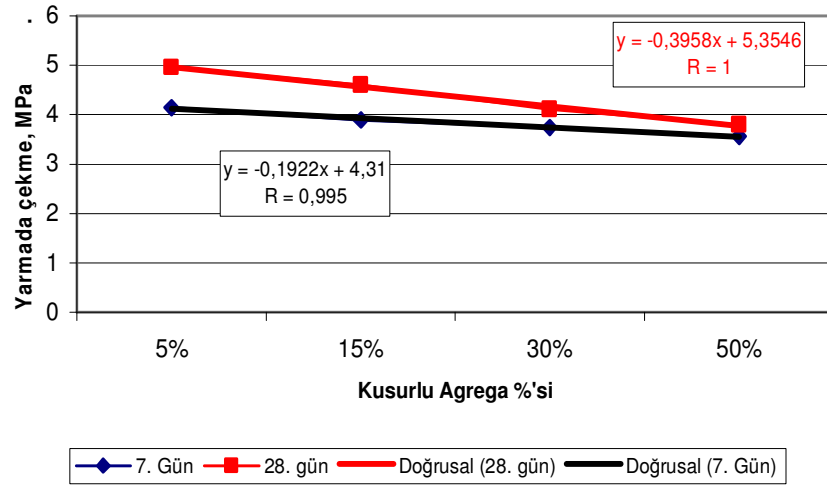


Şekil 6.28 Beton eğilme dayanımının kusurlu agregâ yüzdesine göre bağıl değişimi

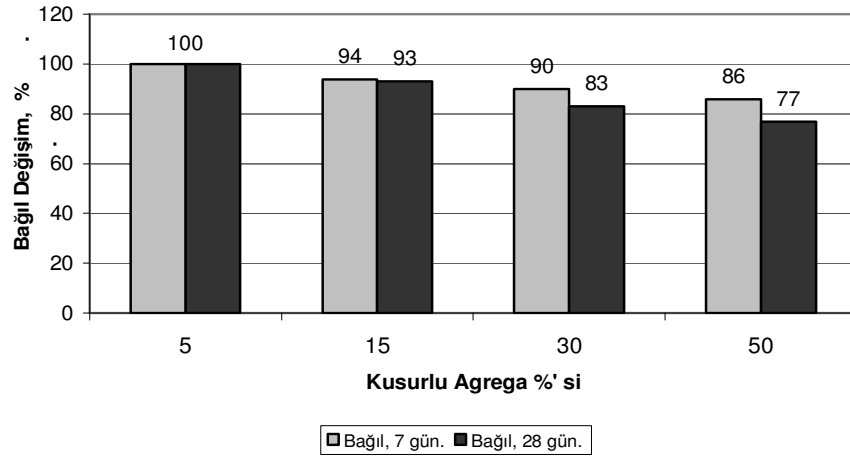
Eğilme dayanımlarındaki azalma, kontrol numunelerine göre 7 ve 28 günlük karışımlarda; %15 kusurlu agregâ içeren karışımlar için %3-%9’dur. Bu oran %30 kusurlu agregâ içeren karışımlar için %16-%19 ve %50 kusurlu malzeme içeren karışımlar için %37-%34 mertebelerindedir. Dayanım kayıpları açısından değerlendirildiğinde, kusurlu agregâ yüzdesinin eğilme dayanımı açısından basınç dayanımına göre daha kritik olduğunun göstergesidir.

6.4.4.3 Silindir Yarma Dayanımı

Farklı kusurlu agregâ yüzdelerinde hazırlanan karışımların yarmada çekme dayanımları ve kontrol karışımına göre bağıl dayanım yüzdeleri Şekil 6.29 ve 6.30'da görülmektedir.



Şekil 6.29 Kusurlu agregâ yüzdesinin beton yarmada çekme dayanımına etkisi



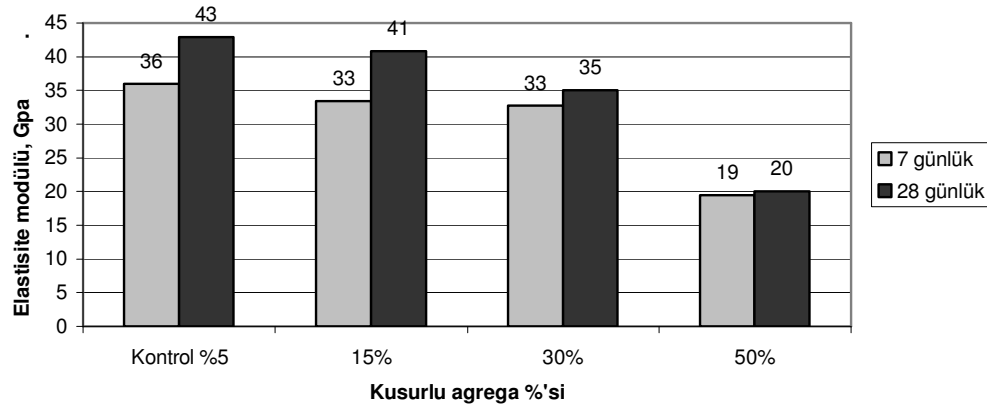
Şekil 6.30 Kusurlu agregâ yüzdesine göre yarmada çekme dayanımı bağıl yüzdeleri

Yarmada çekme dayanımlarındaki azalma, kontrol numunelerine göre 7 ve 28 günlük karışımlarda; %15 kusurlu malzeme içeren karışımlar için %6-%7'dir. Kusurlu agregâ yüzdesi arttıkça, %30 kusurlu malzeme içeren karışımlar için

kayıplar %10-%17 ve %50 kusurlu malzeme içeren karışımlar için %14-%23'ye seviyelerine çıkmaktadır. Yarma da çekme dayanımı bağıl değişimleri, basınç dayanımı bağıl değişimlerinden daha yüksek, eğilme dayanımı bağıl değişimlerinden daha düşüktür.

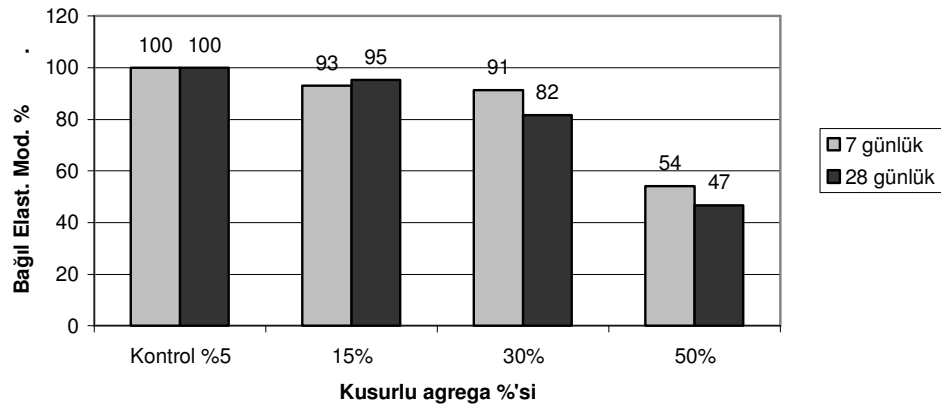
6.4.4.4 Elastisite Modülü

Farklı kusurlu agreg a yüzdel erinde hazırlanan karışımların elastisite modülleri ve kontrol karışımına göre bağıl değ işimler Ş ekil 6.31 ve Ş ekil 6.32'd e gör ülm ektedir.

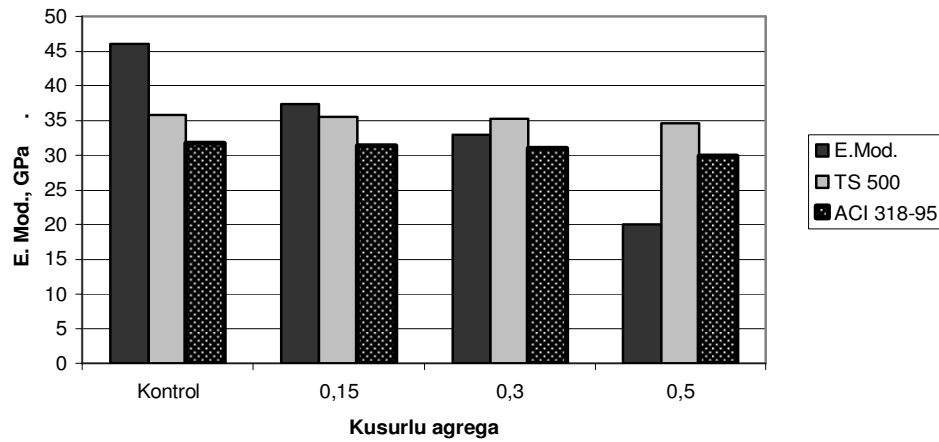


Ş ekil 6.31 Kusurlu agreg a yüzdesinin beton elastisite modülüne etkisi

Kusurlu agreg a yüzdel eri arttıkça, betonların elastisite modülleri 7 ve 28 günlük örnekler için düşmektedir. Bağıl elastisite modülü farkları, %15 kusurlu agreg a kullanılması durumunda %5 iken, %30 kusurlu agreg a kullanılması durumunda biraz daha da artmakta (%9-18), %50 kusurlu agreg a kullanılması durumunda elastisite modülü yarı yarıya düşmektedir.



Şekil 6.32 Kusurlu agregat yüzdesine göre beton elastisite modülü bağıl değişimleri



Şekil 6.33 Kusurlu agregat yüzdesinin ölçüm ve hesap yöntemleri ile bulunan elastisite modülleri

Şekil 6.33’de görüldüğü gibi, ölçümle bulunan elastisite modülü değerleri ile hesapla bulunan elastisite modülü değerleri arasında farklılıklar görülmektedir. Kontrol ve %15 kusurlu malzeme içeren betonların elastisite modülleri, hesapla bulunan değerlerden daha yüksek olmasına rağmen, %30 kusurlu agregat oranında değerler birbirine yakındır. Kusur oranı %50’ye çıktığında ölçüm sonuçları hesap değerlerinden daha küçük olmaktadır.

6.5 Farklı Şekil Özelliklerindeki İri Agregalar Kullanılarak Hazırlanan Karışımlar

İri agrega şeklinin taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisini değerlendirebilmek amacıyla, beton karışımlarında farklı şekil özelliklerindeki agregalar kullanılmıştır. Pratikte, doğada tamamı kübik, yuvarlak ya da kusurlu şekil özelliklerinde agrega bulunması pek mümkün değildir. Ancak, deney sonuçlarının ideal ve ideal olmayan agregaların taze ve sertleşmiş beton özelliklerine olan etkisini belirlemek açısından yararlı olacağı düşünülmektedir. Böylece, karışımlarda taze ve sertleşmiş beton özellikleri açısından en iyi performansı veren agrega şekline karşılık, kusurlu agrega tanelerinin performans kayıpları değerlendirilebilecektir.

Karışımlarda iri agrega olarak kullanılan Famerit A.Ş'nin Washbeton üretiminde kullandığı **Dalaman** doğal agregası kullanılmıştır. Dalaman doğal agregası; Kübik (köşeli), yuvarlak, yassı, uzun ve biçimsiz agrega tanelerini birlikte bünyesinde bulundurmaktadır. Dalaman doğal agregası görsel olarak seçilmek sureti ile **Köşeli, Yuvarlak, Uzun (Torpil), Yassı** ve **Şekilsiz** ismi verilen sınıflara ayrılmıştır. Değişik şekil özelliklerindeki bu agreganın seçilme nedeni, mineraloji farklılığının beton dayanıma etkisini en aza indirmektir. Ayrıca, agregalar tek bir kaynaktan temin edildiğinden, yüzey dokuları benzer özelliktedir. Doğal nehir agregası olması nedeni ile de agrega yüzeyleri oldukça pürüzsüzdür. Bu sayede, diğer değişkenler sabit kalmak koşulu ile sadece iri agrega şeklinin taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisi bir dayanım sınıfı için değerlendirilmiştir. Özellikle kusurlu agregalarla üretilen betonlarda düşük dayanımlar beklendiğinden, karışım tasarımında yüksek dayanım hedeflenmiştir.

6.5.1 Karışım Malzemeleri

Deneyisel çalışmalarda, Bölüm 6.2.1'de özellikleri verilen karışım malzemelerinden başka, kullanılan agrega ve mineral katkı malzemelerin özellikleri aşağıdaki gibidir:

6.5.1.1 İri Agregalar

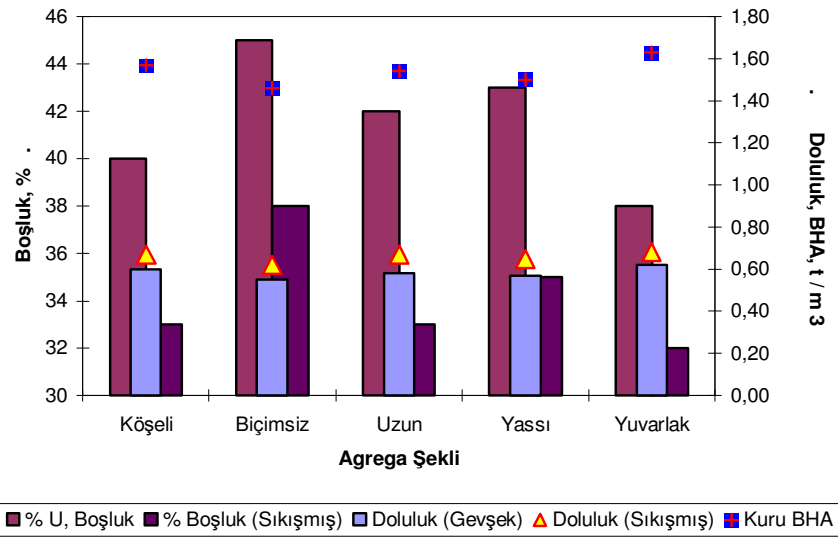
Beton üretiminde kullanılacak iri agregalar Bölüm 5.3.3’de özellikleri verilen farklı şekil özelliklerindeki Dalaman doğal agregasıdır. Agregalar görsel olarak seçilmek sureti ile köşeli (kübik), yuvarlak, yassı, uzun veya biçimsiz olarak sınıflara ayrılmıştır. Agregalar beton dökümünden önce 24 saat su içinde bekletilerek kuru yüzey doygun (KYD) hale getirilmişlerdir. Şekil 5.81’de söz konusu agregaların CCD kamera ile aydınlık alan panelinde çekilmiş görüntüleri verilmiştir.

Köşeli agregalar, üç boyutu arasında küçük farklar olan, kübik forma yakın ve keskin kenarlı tanelerdir (Şekil 5.81-a). Kırmataş agregalar genellikle köşelidir.

Doğanın aşındırıcı etkileri sonucu köşeleri aşınmış, yüzeyleri yuvarlaklaşmış, küre formuna yakın agregalar yuvarlak agrega olarak isimlendirilir (Şekil 5.82-b). Doğal agregalar genellikle yuvarlak agrega olarak sınıflandırılır. Doğal nehir agregalarında menbaya yakın agrega tanelerinin yüzeylerinde keskin hatlar ve girinti çıkıntılar varken, membadan mansaba doğru ilerledikçe tane yüzeyleri aşınır ve yuvarlak form alır (Keun-Chang ve diğer., 2007).

Yassı ve uzun taneler ise en büyük ve en küçük boyutları arasında 3 kat ve daha fazla fark olan agrega taneleri, şekilce kusurlu taneler olarak isimlendirilir (Şekil 5.81 c-d). Bunun yanında standartlarda tanımlanmasa da geometrik olarak ifade edilemeyen biçimsiz agregalarda kusurlu agrega sınıfında değerlendirilmelidir (Şekil 5.81-e). Bunlar genellikle taş ocaklarında yanlış kırma yöntemi kullanılması nedeniyle ya da laminalı kayaların kırılması ile oluşabilir.

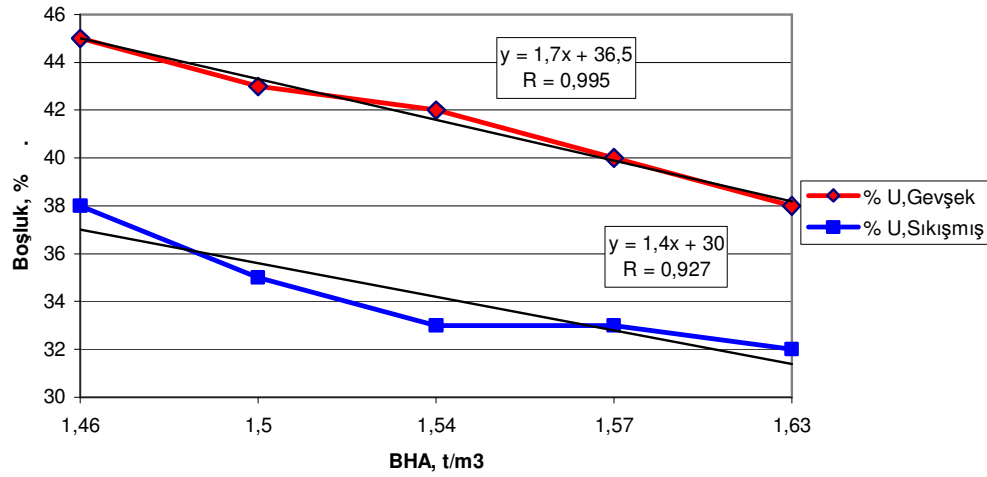
Deneylerde kullanılan agregaların şekil özelliklerine göre değişen, ASTM C1252’ye göre “sıkışmamış boşluk oranı”, sıkışmış boşluk yüzdesi, doluluk ve kuru birim hacim ağırlıkları (BHA) Şekil 6.34’de görülmektedir.



Şekil 6.34 Farklı şekil özelliklerindeki agregaların boşluk, doluluk ve BHA değişimleri

Şekil 6.34 incelendiğinde, biçimsiz agregaların gevşek ve sıkışmış durumda en yüksek boşluk değerlerini verdiği görülmektedir. Daha sonra boşluk oranları sırası ile yassı, uzun (torpil), köşeli agregalar şeklinde azalarak devam etmekte ve en düşük boşluk değerlerini yuvarlak agregalar vermektedir. Bu nedenle birim ağırlıklar da tersine, boşluk oranı en düşük olan yuvarlak agregalar için en yüksek değeri almaktadır. Biçimsiz agregalar için ise en düşük değerdedir.

ASTM C1252'e göre sıkışmamış boşluk oranı, TS 3529'e göre sıkışmış boşluk ve TS EN 1097-6'ya göre belirlenen kuru BHA değerleri arasındaki ilişki Şekil 6.35'de görülmektedir.



Şekil 6.35 Agregaların boşluk yüzdeleri ve BHA ilişkisi

Şekil 6.35'e göre gevşek ve sıkışmış durumda agregaların arasındaki boşluk oranı azaldıkça, beklendiği üzere BHA'ları artmaktadır. Birim hacimdeki agregalar arasındaki boşluk oranları değerlendirildiğinde, yuvarlak agregalarla üretilen betonlarda, boşlukları doldurmak için gerekli hamur hacminin en az olduğu söylenebilir. Köşeli agregalarda boşluk miktarı, dolayısı ile gerekli hamur hacmi bir miktar artmakta, kusurlu agregalarda ise uzun, yassı ve biçimsiz agregalar için hamur ihtiyacı sırası ile artmaktadır.

Sınıflandırılan iri agregalar en küçük tane boyutu 4 mm ve en büyük tane boyutu ise 25 mm olan elek serisinde elenmek sureti ile Şekil 6.36'da verilen granülometriye getirilmiştir. Ayrıca iri agregaların özgül ağırlık, su emme yüzdesi ve aşınma yüzdesi gibi fiziksel özellikleri ilgili standartlara göre test edilerek sonuçlar Tablo 6.24'de verilmiştir.

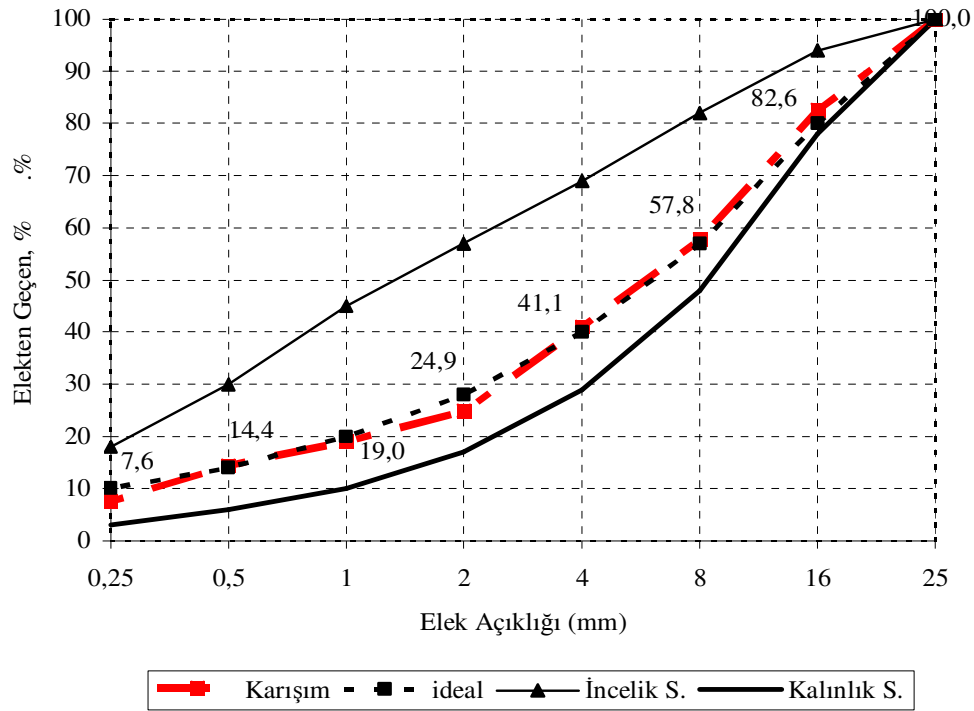
6.5.1.2 İnce Agregalar

Beton karışımlarda ince agregalar olarak Ege beton doğal teras agregası (N-S7) kullanılmıştır. İnce agreganın özellikleri Tablo 6.24'de görülmektedir.

Tablo 6.24 Agrega özellikleri

Özellik	İri Agrega	İnce Agrega	Deney Standardı
Özgül ağırlık			
Kuru	2,64	2,57	TS EN 1097-6
KYD	2,66	2,62	
Su emme (%)	0,6	1,95	TS EN 1097-6
İnce malzeme (%)	-	0.1	TS 3527
Organik madde	yok	çok az	TS 3673
Akış katsayısı	-	28	TS EN 933-6 (0-2mm)
Sıkışmamış boşluk oranı, %	-	38	ASTM C1252 (Metod A)
Los Angeles aşınma yüzdesi			
100 devir, (%)	3,5	-	TS EN 1097-2
500 devir, (%)	19	-	

Beton karışımlarında kullanılan ince ve iri agrega karışımının granülometri eğrisi Şekil 6.36’da görüldüğü gibi düzenlenmiştir.



Şekil 6.36 Farklı şekil özelliklerindeki agregalar için ayarlanmış granülometri eğrisi

6.5.1.3 Mineral Katkı (Silis dumanı)

Silis dumanı betonun mekanik özelliklerini artıracak gibi, fiziksel ve kimyasal etkilere de dirençli hale getirerek beton durabilitesine olumlu yönde etki eder. Karışımlarda prEN 13263 “Beton için silis dumanı-Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk” standardına uygun mikro silika (silis dumanı) kullanılmıştır. Silis dumanı, agregaların pürüzsüz yüzeyli olması nedeni ile oluşabilecek segragasyon riskini azaltmak amacı ile kullanılmıştır. Silis dumanı özgül ağırlığı 2,23 olup, inceliği (45µm’luk elek üstünde kalan miktar) %40’dır. Silis dumanının oksit bileşenleri Tablo 6.25’de görülmektedir.

Tablo 6.25 Silis dumanının oksit bileşenleri (Ağırlıkça %)

Bileşen	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Kızd. Kaybı
Silis D.	92,26	0,89	1,97	0,49	0,96	0,42	1,31	0,33	4,3

6.5.1.4 Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Beton Karışımlarının Hazırlanması

Betonun basınç dayanımını etkileyen faktörler iç ve dış faktörler olmak üzere iki gruba ayrılır. İç faktörler betonu oluşturan malzeme özellikleri ve oranları, dış faktörler ise betonun üretim bakım ve servis ömrü boyunca maruz kalacağı etkilere dir. Bu nedenle beton karışımları hazırlanırken iç faktörlerden sadece iri agreg a şekli değiştirilmiştir. Bununla birlikte, iri agreg a şekline bağlı olarak betonun boşluk yapısının da değişebileceği unutulmamalıdır. Karışıma giren diğer bütün malzeme özellikleri ve oranları ile dış faktörlerden beton üretim koşulları, kür koşulları ve süresi ile mekanik deney koşulları sabit tutulmaya çalışılmıştır.

Bilindiği üzere, betonun mekanik özellikleri en çok S/Ç oranından etkilenmektedir. S/Ç oranının artması ile dayanımlar önemli ölçüde azalmaktadır. Ancak yapılacak deney sayısının fazla oluşu ve farklı şekil özelliklerindeki agregaların sınıflandırılmasının uzun zaman alması, çalışmada tek bir S/Ç oranı kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Karışım tasarımında su/çimento oranı düşük (0,40) karışımlar tercih edilmiştir. Bunun başlıca nedeni, yüksek dayanımlı betonlarda agreg a şekli ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerinin kaliteli beton tasarımı açısından

daha önemli faktörler olduğunun düşünülmesidir. TS 802'ye göre beton bileşenleri ve karışım oranları Tablo 6.26'de verildiği gibi hesaplanmıştır.

Tablo 6.26 Beton bileşenleri ve karışım oranları

Bileşen	Ağırlıkça (kg/m ³)	Hacimce (dm ³)
Çimento	465,5	147,8
Su	186	186
0-5 mm Agrega (N-S7) (KYD)	628	244,4
5-15 mm Agrega (KYD)	1078	408
15-25 mm Agrega (KYD)		
Silis dumanı (% Bağlayıcı)	24,5	11
Hiperakışkanlaştırıcı	5,60	2,10
Hapsolmuş hava, %o	-	15
Toplam	2385 kg	1000 dm ³
Su /Çimento	0,40	
Su/Bağlayıcı	0,38	
KA/İA	1,70	
İA/Toplam agrega	0,37	
Hiperakışkanlaştırıcı (% bağlayıcı)	%0,5	
Teorik BHA (t/m ³)	2,385	

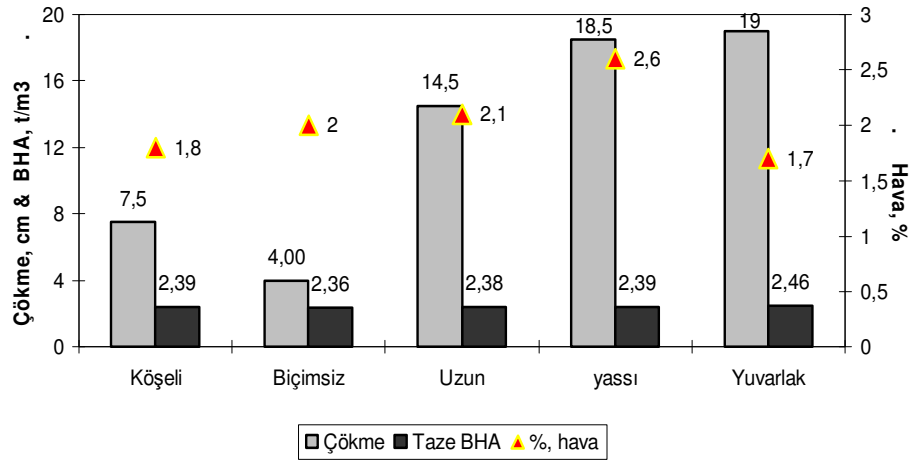
Deneyler rastgele örneklenen agrega taneleri için 3 kez tekrarlanarak ortalamaları alınmıştır. Deney sonuçlarına göre ince agrega karışıma katıldığı hali ile % 2,1 nem içeriğindedir. Bölüm 5'de hesaplandığı üzere ince agreganın su emmesi % 1,95 olup, iri agregalar ise yüzey kuru doygun durumdadır. Bu nedenle ince agregalar için gerekli nem düzeltilmesi yapılarak, gerçek karışım suyu miktarı belirlenmiştir. Beton karışımlarının hazırlanması sırasında hava açık ve parçalı bulutlu, yağışsız, gölgede 20±2 °C olarak ölçülmüştür. Beton sıcaklıkları ise 24±1 °C olarak ölçülmüştür.

Beton karışımları yatay milli laboratuvar tipi mikser kullanılarak 20±2 °C hazırlanmıştır. Her bir seride 50 dm³'lük ikişer karışım hazırlanmıştır. Karışımlar önce agrega, çimento ve silis dumanının kuru karışımı, ardından su ilavesi ile 4'er dakikalık sürelerde hazırlanmıştır. Kimyasal katkı karışım suyuna katılmak sureti ile karışıma eklenmiştir. Taze betonda çökme, birim hacim ağırlık ve hava yüzdesi deneyleri yapılmıştır.

Daha sonra her karışımdan 7. ve 28. günlük basınç deneyleri için 6 adet 15cm ayrıtlı küp, silindir yarma ve elastisite modülü ölçümleri için 12 Adet 10x20 cm ayrıtlı silindir ve eğilme deneyleri için 6 adet 7,5x7,5x28,5 cm ayrıtlı beton prizma örnekleri hazırlanmıştır. Numuneler iki tabaka halinde, her bir tabaka 25'er kez şişlenerek ve 1 dakika sarsma uygulanarak sıkıştırılmış ve yüzeyleri perdahlanmıştır. Örnekler, kalıplarından çıkarılacakları zamana kadar (24 ± 1 saat) üst yüzeyleri ıslak bezle örtülü bir durumda, $+21$ ila $+14$ °C sıcaklık ortamında tutulmuşlardır. Kalıplarından çıkarılan örnekler deney gününe kadar 21 ± 2 °C'de kirece doymun suda kür edilmiştir.

6.5.2 Taze Beton Deneyleri

Taze beton numunelerinin ölçülen çökme, taze BHA ve hava yüzdesi ortalamaları Şekil 6.37'da görülmektedir.



Şekil 6.37 İri agregası şeklinin taze beton özelliklerine etkisi

Beklendiği gibi en yüksek çökme değeri 19 cm ile yuvarlak agregalarla elde edilmiştir. En düşük çökme değeri ise biçimsiz agregalarla üretilen betonda ölçülmüştür. Karışım kuru kıvamda olup işlenebilirlik diğer beton karışımlarına kıyasla oldukça düşüktür. Uzun ve yassı agregalar ile üretilen taze beton örneklerinin çökme değerleri yüksek çıkmasına rağmen, çökme deneyinde ayrışmalar meydana geldiği gözlenmiştir. Köşeli ve biçimsiz agregalı betonların çökme değerlerine göre,

yassı ve yuvarlak agregalı betonların çökme değerlerinin çok farklı olmasının nedeni bu ayrışmalardır. Bu hali ile çökme deneyinin başarısız olduğu söylenebilir. Çökme deneyleri bu nedenle birkaç kez tekrar edilmiştir. Karışımlar kalıplarına yerleştirilen karışımlara vibrasyon uygulanırken uzun, yassı ve yuvarlak agregalı betonlarda silis dumanı kullanılmasına rağmen terleme gözlenmiştir.

Aynı karışım malzemeleri ve aynı karışım oranlarında hazırlanan karışımlardan BHA'sı yüksek bir betonun dayanımı, dayanıklılığı ve taşıma gücünün daha fazla olması beklenir. Köşeli, uzun ve yassı agregalı taze beton karışımların birim hacim ağırlıkları teorik BHA'a ($2,39 \text{ t/m}^3$) çok yakın değerler almıştır (sırasıyla $2,39 - 2,38 - 2,39 \text{ t/m}^3$). Biçimsiz agregalı beton karışımlarının BHA'ı teorik BHA'dan bir miktar daha düşük ($2,36 \text{ t/m}^3$), yuvarlak agregalı beton karışımlarının BHA'ları teorik BHA'a göre daha fazla ölçülmüştür ($2,46 \text{ t/m}^3$).

Şekil 6.37'de verilen agregalarda boşluk, doluluk ve kuru birim hacim ağırlık ilişkilerine göre, taze beton karışımlarının hava içerikleri kusurlu agregalı karışımlarda daha yüksek çıkmıştır. Köşeli agregalarda %1,8 olan boşluk yüzdesi, biçimsiz agregalı karışımlarda %2, uzun ve yassı agregalarda sırası ile %2,1 ve %2,6 olarak ölçülmüştür. Bunun başlıca nedeni, geniş yüzeyli yassı ve uzun iri agregaların alt yüzeylerinde hapsolan hava kabarcıklarıdır. Yuvarlak agregalar en düşük boşluk oranı (%1,7) ve buna bağlı olarak en yüksek BHA ($2,46 \text{ t/m}^3$) değerlerini vermiştir.

Sertleşmiş $7,5 \times 7,5 \times 28,5$ cm ayrıtlı beton örneklerinden, döküm yönüne dik olmak üzere 1 cm dilimler halinde her bir örnek için 10'ar adet beton kesitleri alınmıştır. Bu kesitler sulu aşındırma, zımparalama ve cilalama işlemlerinden sonra parlak kesitler haline getirilmişlerdir. Beton kesitlerinden döküm yönleri üstte olacak şekilde alınan görüntüler Şekil 6.38'de görülmektedir.

Şekil 6.38 b-c'de özellikle yuvarlak ve yassı agregalarla üretilen betonlarda segregasyon meydana geldiği görülmektedir. Beton kesitlerde iri agregaların kalıp alt yüzeyine doğru çöktüğü ve kesitlerin üst yüzeylerinde ise ince agregaya içeren çimento harcı yoğunluğu görülmektedir.



(a) Köşeli



(b) Yuvarlak



(c) Yassı



(d) Uzun



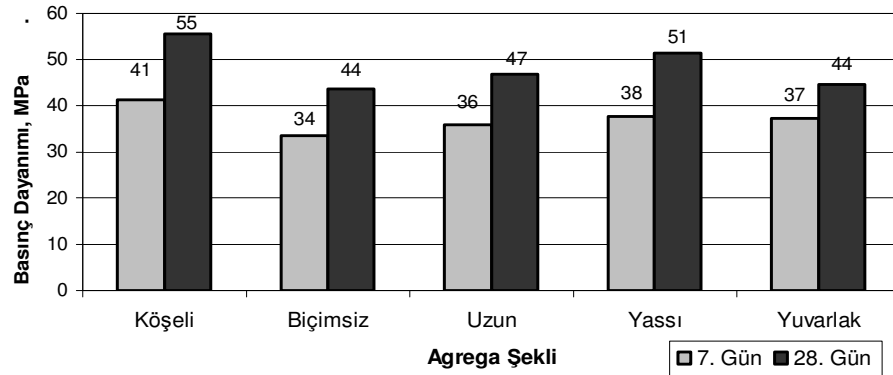
(e) Biçimsiz

Şekil 6.38 Farklı şekilli agregalarla üretilen beton parlak kesitlerinde segragasyon oluşumunun incelenmesi

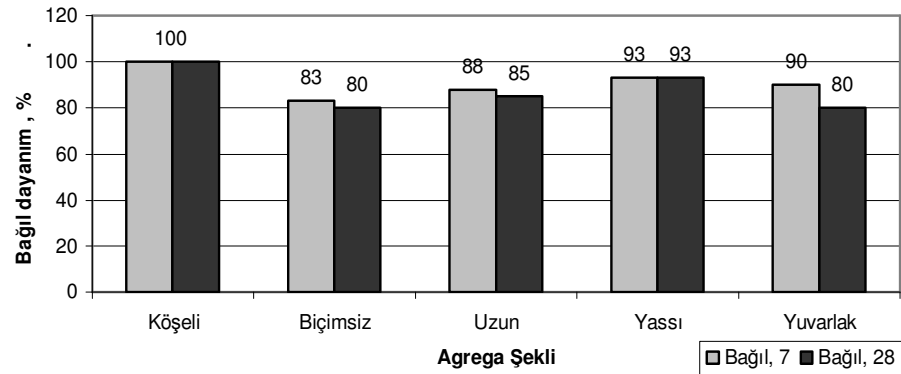
6.5.3 Sertleşmiş Beton Deneyleri

6.5.3.1 Basınç Dayanımı

Farklı şekil özelliklerindeki iri agregalarla üretilen beton örneklerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı ortalamaları Şekil 6.39’da ve en yüksek basınç dayanımına karşılık gelen bağıl dayanım değişimleri Şekil 6.40’da verildiği gibidir.



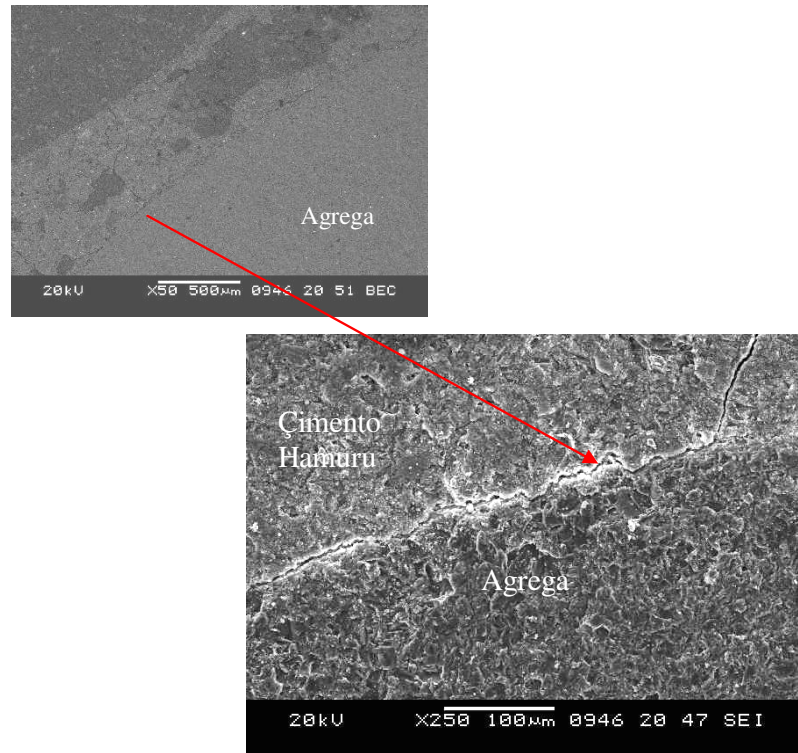
Şekil 6.39 S/Ç oranı 0,4 olan betonlarda iri agrega şeklinin basınç dayanımına etkisi



Şekil 6.40 S/Ç oranı 0,4 olan betonlarda iri agrega şekline göre bağıl basınç dayanımını yüzdeleri

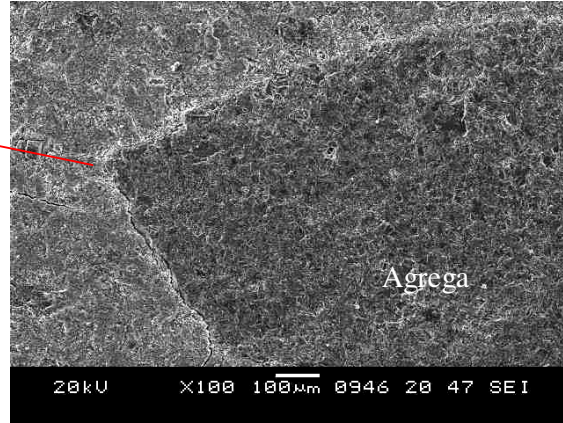
Basınç dayanımları karşılaştırıldığında, 7 ve 28 günlük örnekler için en yüksek dayanım değerlerini köşeli agregalarla üretilen beton örnekleri vermiştir (41-55 MPa). Özellikle biçimsiz agregalarla üretilen beton örneklerinin basınç dayanımları 7 ve 28 günlük örneklerde sırasıyla %17 ve %20 azalmıştır. Dikkat çeken bir durum ise yuvarlak agregalı betonların özellikle 28 günlük basınç dayanımlarının kusurlu

olarak değerlendirilen yassı ve uzun agregalı beton dayanımlarından daha düşük değerler almasıdır. Bu durum yüzey pürüzlülükleri aynı olmasına rağmen, yuvarlak ve pürüzsüz agregaya yüzeylerindeki aderans kaybına işaret etmektedir. Yükleme durumunda arayüzeyde meydana gelen çatlakların yuvarlak agregaya yüzeylerinde kolayca ilerleyebilmesi, dayanımın düşmesine neden olmaktadır. Şekil 6.41’de Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri incelendiğinde; çimento hamurunda meydana gelen çatlak, agregaya yüzeyine geçerek arayüzeyde önüne engel çıkmadığı için kolaylıkla ilerleyebilmektedir. Bununla birlikte Şekil 6.42 incelendiğinde; çimento hamuru agregaya arayüzeyinde ilerleyen çatlak, agregaya köşesine geldiğinde yüzey boyunca ilerleyemeyerek arayüzeyden uzaklaşmakta ve tekrar hamur fazına geri dönmektedir. Bu durum, Tasong, Lynsdale, ve Cripps (1998)’in bulduğu sonuçlara benzer şekilde, agregaya ve çimento hamuru arasındaki mekanik bağın yuvarlak agregaya kullanılması durumunda zayıfladığını göstermektedir.



Şekil 6.41 Yuvarlak agregalı beton örneğinin 50x ve 250x büyütmeli SEM görüntüleri

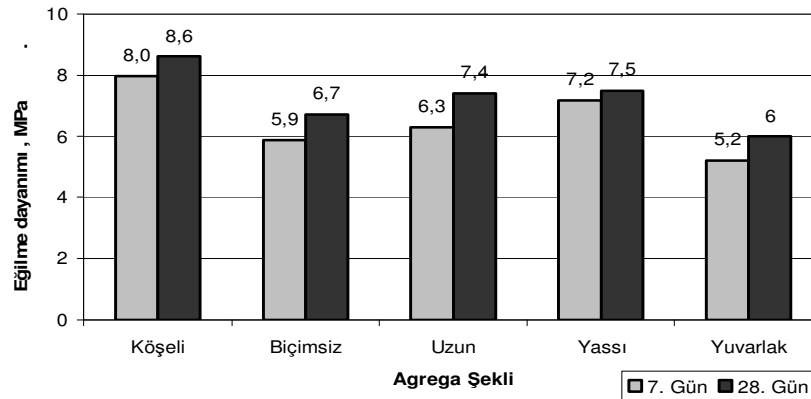
Arayüzeydeki çatlak,
agrega köşesinden
ilerleyemeyerek tekrar harç
fazına dönmüştür



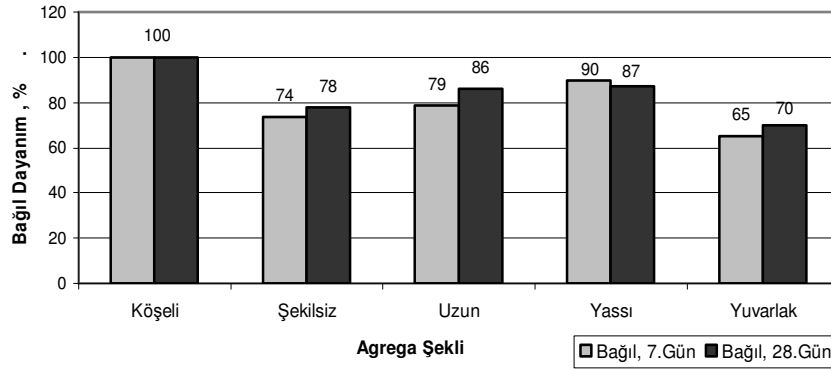
Şekil 6.42 Köşeli agregalı beton örneğinin 100x büyütme SEM görüntüsü

6.5.3.2 Eğilme Dayanımı

Farklı şekil özelliklerindeki iri agregalarla üretilen 7,5x7,5x28,5 cm ayrıtlı beton prizma örneklerinin 7 ve 28 günlük üç noktadan yüklemeli eğilme dayanımı ortalamaları Şekil 6.43’de verilmiştir. En yüksek eğilme dayanımına karşılık gelen bağıl dayanım değişimleri ise Şekil 6.44’de görülmektedir. Eğilme deneylerinde seçilen yükleme hızı 20 kgf/s’dir.



Şekil 6.43 S/Ç oranı 0,4 olan betonlarda iri agreganın eğilme dayanımına etkisi



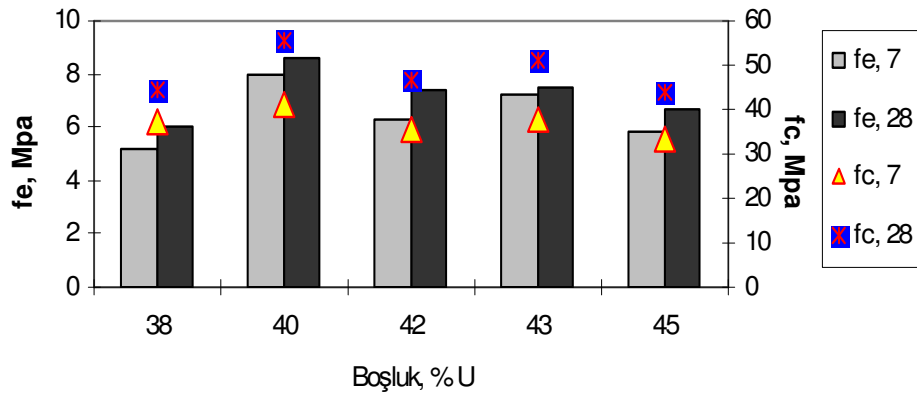
Şekil 6.44 S/Ç oranı 0,4 olan betonlarda iri agrega şekline göre bağıl eğilme dayanımları

Eğilme dayanımı değerleri karşılaştırıldığında en yüksek dayanım değerlerini yine köşeli agregalarla üretilen beton örnekleri vermiştir. En düşük eğilme dayanımı değerleri yuvarlak agregalarla üretilen beton örneklerinde elde edilmiştir. Köşeli agregalara göre 7 günlük örneklerde %35, 28 günlük örneklerde %30 dayanım kaybı görülmüştür. Kusurlu iri agregalarla üretilen betonların eğilme dayanımlarının yuvarlak agregalarla üretilenlerden bir miktar daha yüksek olduğu görülmektedir. Dayanımlar sırasıyla biçimsiz, uzun ve yassı agregalar üretilen betonlarda artma eğilimindedir. Basınç dayanımı deneylerinde elde edilen sonuçlara benzer bir biçimde, yuvarlak ve pürüzsüz agrega yüzeyi ile çimento hamuru arasındaki mekanik bağın yuvarlak agrega kullanılması durumunda zayıfladığı söylenebilir. Mekanik bağdaki azalma basınç dayanımlarına göre eğilme durumunda daha kritik olmaktadır.

Agrega şekil özellikleri yerine grafikte yatay eksene iri agregalarda Modifiye ASTM C1252 yöntemine göre belirlenen sıkışmamış boşluk oranları, düşey eksenlerde ise beton eğilme ve basınç dayanımları yerleştirildiğinde Şekil 6.45'deki ilişki elde edilir.

Tablo 6.27 Agrega şekline göre ASTM C1252, ASTM D3398 ve kuru BHA değerleri

Agrega Şekli	% U, Boşluk	Doluluk, (Gevşek)	Boşluk, % (Sıkışmış)	Doluluk, % (Sıkışmış)	Kuru BHA (t/m ³)
Yuvarlak	38	0,62	32	0,68	1,63
Köşeli	40	0,60	33	0,67	1,57
Uzun	42	0,58	33	0,67	1,54
Yassı	43	0,57	35	0,65	1,50
Biçimsiz	45	0,55	38	0,62	1,46

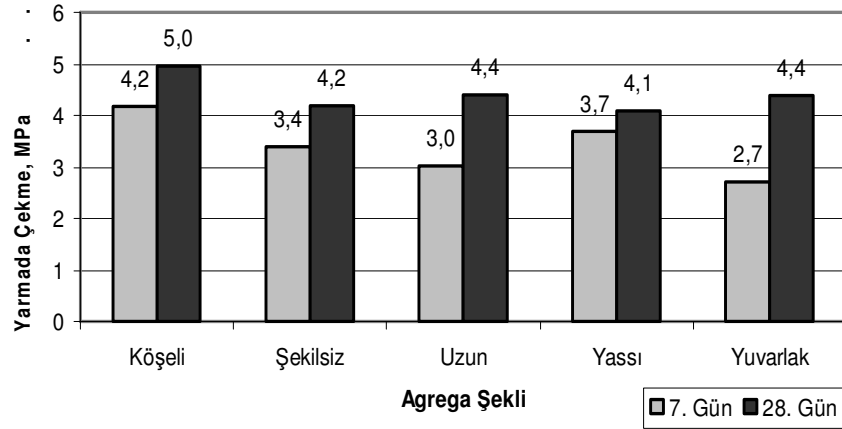


Şekil 6.45 İri agregalarda sıkışmamış boşluk oranı ile betonun eğilme ve basınç dayanımları ilişkisi

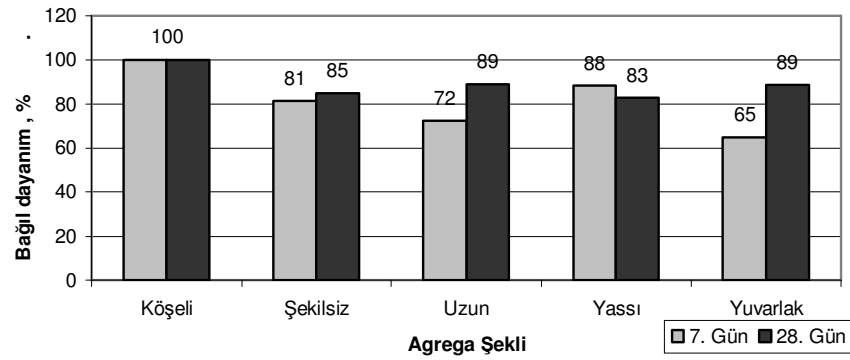
Grafik incelendiğinde, ASTM C1252'ye göre sıkışmamış boşluk oranı %38 olan yuvarlak agregalara göre, boşluk oranı %40 olan köşeli agregaların eğilme ve basınç dayanımları artmaktadır. Betonda boşluk hacminin artması ile çimento hamuru ihtiyacının arttığı söylenebilir. Buna rağmen, köşeli agregaların kullanıldığı beton dayanımları, boşluk oranı daha düşük olan yuvarlak agregalı betondan daha yüksek çıkmıştır. Yuvarlak yüzey yapısına sahip agrega yüzeylerinde çatlak ilerleyişi tane yüzeyi boyunca daha çabuk gerçekleşir. Daha yüksek boşluk oranında ancak kusurlu agregaların kullanıldığı betonların dayanımları ise düşmektedir. Bu nedenle ASTM C1252 yönteminin kusurlu agregalara uygulanması durumunda, tane şekli ve yüzey pürüzlülüğünün ifadesi olan sıkışmamış boşluk oranları (%U) daha yüksek olmaktadır. Deney yönteminde daha yüksek boşluk oranının daha yüksek köşelilik ve yüzey pürüzlülüğünü ifade ettiği belirtildiğinden, deney sonuçları yanlış yorumlanabilecektir. Bu durum yöntemi tartışmalı hale getirmektedir. Agreganın şekli ve yüzey pürüzlülüğünü ifade etmek için dolaylı olmayan yöntemlere ihtiyaç olduğu görülmektedir.

6.5.3.3 Silindir Yarma Dayanımı

Farklı şekil özelliklerindeki iri agregalarla üretilen 10x20 cm ayrıtlı beton silindir numunelerinin 7 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarının ortalamaları Şekil 6.46'da ve en yüksek çekme dayanımına karşılık gelen bağıl dayanım değişimleri Şekil 6.47'de görülmektedir.



Şekil 6.46 S/Ç oranı 0,4 olan betonlarda iri agrega şeklinin yarmada çekme dayanımına etkisi



Şekil 6.47 S/Ç oranı 0,4 olan betonlarda iri agrega şekline göre bağıl yarmada çekme dayanımları

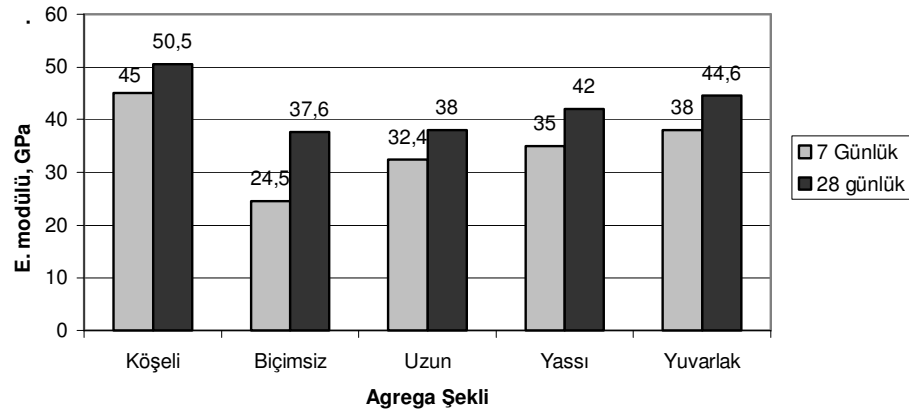
Yarmada çekme dayanımı değerleri karşılaştırıldığında, 7 ve 28 günlük örneklerde en yüksek dayanım değerleri yine köşeli agregalarla üretilen betonlarda elde edilmiştir (4,2 - 5 MPa). En düşük yarmada çekme dayanımı, 7 günlük örnekler için yuvarlak agregalı betonda elde edilmişken (2,7 MPa), 28 günlük örneklerde yassı agregalı betonlar daha düşük değerler almaktadır (4,1 MPa). Bunun nedeni, aynı seride de olsa numunelerin yarma dayanımı farklarının yüksek olmasıdır. Deneylerde kullanılan numune sayısının artırılması sonuçların daha doğru yorumlanması açısından faydalı olacaktır.

Köşeli agregalara göre kusurlu ve yuvarlak agregalı betonlarda dayanım kayıpları 7 günlük örneklerde % 19-35, 28 günlük örneklerde %11-17 seviyelerindedir. İlerleyen yaşlarda dayanım kayıpları azalmaktadır. Kusurlu ve yuvarlak agregalı

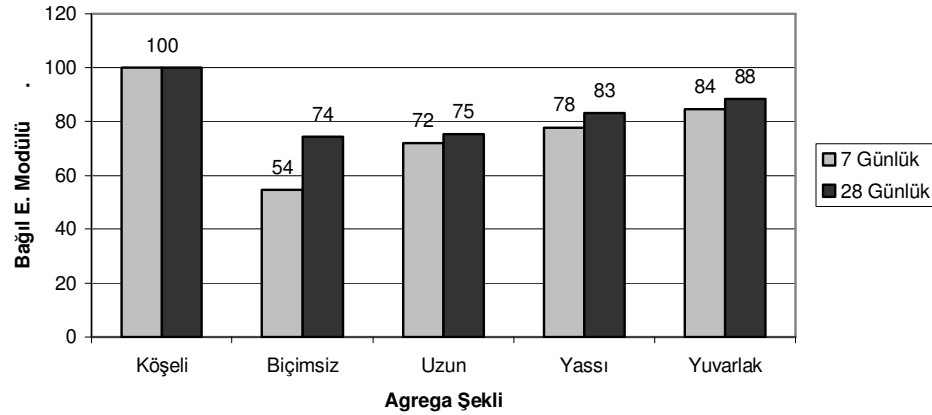
betonların yarmada çekme dayanımları genel olarak yakın değerlerdedir. Özellikle bu durum ilerleyen yaşlar için daha belirgindir. Basınç ve eğilme dayanımı deneylerinde elde edilen sonuçlara benzer bir biçimde, yuvarlak ve kusurlu şekil özelliklerindeki agregalarla çimento hamuru arasındaki mekanik bağ, köşeli agregalara göre daha zayıftır.

6.5.3.4 Elastisite Modülü

Farklı şekil özelliklerindeki iri agregalarla üretilen 10x20 cm ayrıtlı beton prizma örneklerinin 7 ve 28 günlük elastisite modülleri belirlenmiştir. Deney yöntemi Bölüm 6.2.2’de anlatıldığı için burada tekrar edilmemiştir. Yedi ve 28 günlük örneklerin statik elastisite modülleri Şekil 6.48’de görüldüğü gibi ölçülmüştür.



Şekil 6.48 S/Ç oranı 0,4 olan farklı şekil özelliklerindeki iri agregalı beton örneklerinin statik elastisite modülleri



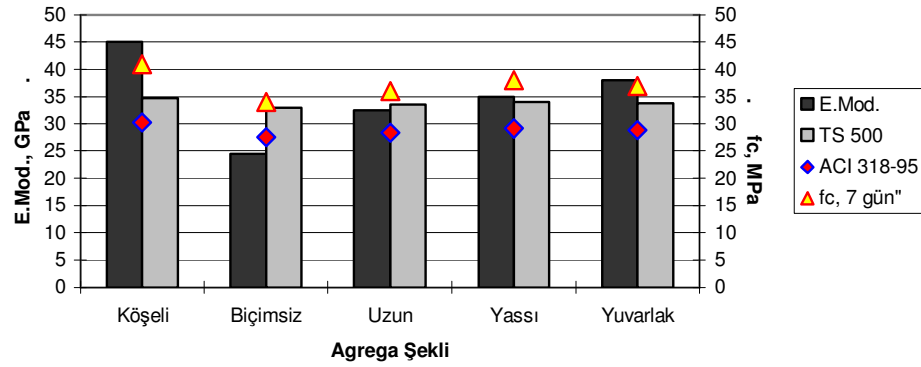
Şekil 6.49 S/Ç oranı 0,4 olan betonlarda köşeli iri agregalı beton örneklerine göre bağıl elastisite modülleri

Elastisite modülü deney sonuçlarına göre 7 ve 28 günlük örnekler için en yüksek değerler köşeli agregalı beton örneklerinde elde edilmiştir (45 – 50,5 Gpa). Köşeli agregalara göre uzun yassı ve yuvarlak agregalı betonlarda bağıl elastisite modülleri 7 günlük örneklerde % 72-84, 28 günlük örneklerde %75-88 aralığında değişmektedir (Şekil 6.49). Biçimsiz agregalı beton örnekleri ise en düşük elastisite modülü değerleri almış olup (24,5-37,6 Gpa), elastik bölgeden uzaklaştığı söylenebilir.

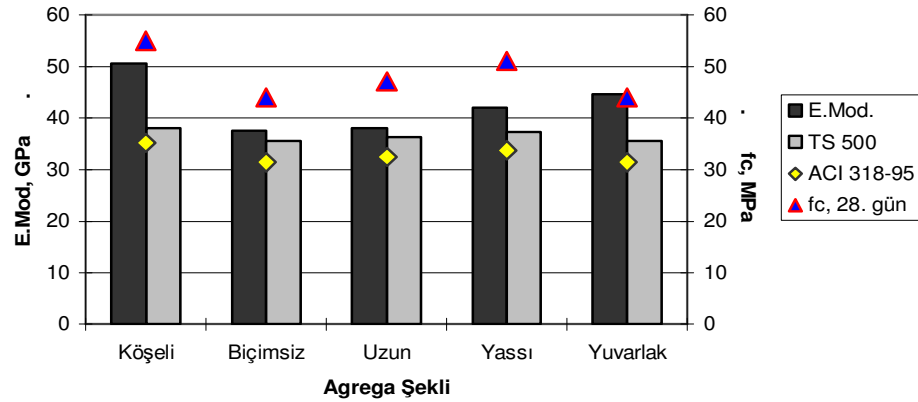
Betonu oluşturan karışım malzemelerinden agregası ve çimento hamuru elastik davranış göstermesine rağmen, kompozit bir malzeme olan beton basınç dayanımının %25-40'ından daha yüksek gerilme seviyelerinde elastiklik özelliğini kaybeder (Mindess ve Young, 1991). Betona uygulanan gerilmeye karışım malzemelerinin farklı şekillerde tepki vermesi, betonun yüksek gerilme seviyelerinde elastik olmayan davranışının nedenidir. Bu aynı zamanda çimento hamuru ile agregası arasındaki aderansa da bağlıdır. Çimento hamuru ile agregası arasındaki aderansın azalması, betonun elastik davranıştan uzaklaşmasına neden olmaktadır.

Şekil 6.50 ve Şekil 6.51'de sırası ile 7 ve 28 günlük beton örneklerinin basınç dayanımı, ölçümle bulunan statik elastisite modülü ile TS 500'e ve ACI 318-95'e göre hesapla bulunan elastisite modülü değerleri verilmiştir. Ancak elastisite modülü

deneylerinin standart boyuttaki örneklerle yapılmadığını belirtmekte fayda vardır. Bu nedenle sonuçlar karşılaştırılmamıştır.



Şekil 6.50 S/Ç oranı 0,4 olan 7 Günlük beton örneklerinin elastisite modülleri ve basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 6.51 S/Ç oranı 0,4 olan 28 günlük beton örneklerinin elastisite modülleri ve basınç dayanımı ilişkisi

6.6 Pürüzlü ve Parlak Yüzey Dokulu Bilya Örnekleri ile Hazırlanan Beton Karışımları

Mineral agregaların standart şekilleri olmadığından, şekilden bağımsız olarak sadece agregaya yüzey pürüzlülüğünün beton performansına etkisi belirlenememektedir. Yüzey pürüzlülüğünü agreganın şeklinden bağımsız olarak

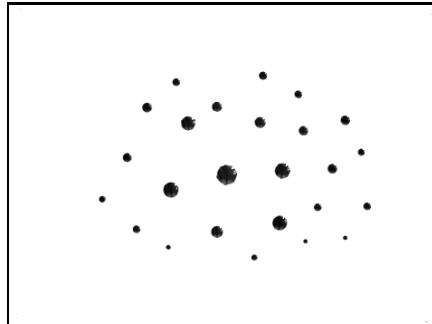
değerlendirebilmek amacıyla, beton karışımlarında yapay agrega olarak parlak ve pürüzlü çelik bilyalar kullanılmıştır.

6.6.1 Karışım Malzemeleri

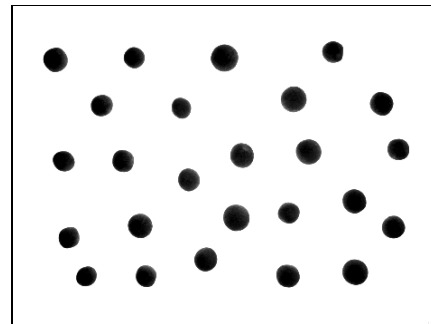
Deneyisel çalışmalarda, Bölüm 6.2.1’de özellikleri verilen karışım malzemelerinden başka, parlak ve pürüzlü yüzeyli iri bilyalar ve ince agrega kullanılmıştır.

6.6.1.1 İri Agregalar

Beton üretiminde kullanılacak yapay iri agregalar Bölüm 5.5.2’de özellikleri verilen çelik (parlak yüzeyli) ve döküm (pürüzlü yüzeyli) bilyalardır (Şekil 6.52). Bilyaların yoğunlukları $7,5 \text{ t/m}^3$ olarak ölçülmüştür. Döküm bilyalar 1/3 saf Nitrik asit (HNO_3)/hidroklorik asit (HCl) karışımında bekletilmek sureti ile yüzey pürüzlülükleri arttırılmıştır (Şekil 6.53).



(a) Parlak bilya



(b) Pürüzlü bilya

Şekil 6.52 CCD kamera ile çekilmiş parlak ve pürüzlü yüzeyli bilya görüntüleri



(a) Parlak bilya yüzeyi



(b) Pürüzlü Bilya yüzeyi

Şekil 6.53 Stereo mikroskopta çekilmiş 30x büyütmeli bilya yüzeyleri

6.6.1.2 İnce Agregalar

Farklı şekilli agregalar ile üretilen beton karışımlarında olduğu gibi beton karışımlarda ince agrega olarak Ege beton doğal teras agregası (N-S7) kullanılmıştır. Bu agreganın özellikleri Bölüm 5.2, Bölüm 6.2 ve Bölüm 6.5’de verildiği gibidir.

6.6.2 Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Karışımların Hazırlanması

İri bilya örneklerinden başka, karışıma giren diğer malzeme özellikleri ve miktarları sabit tutulmuştur. Beton üretim koşulları, beton döküm sıcaklığı, kür koşulları ve süresi ve mekanik deney koşulları sabit tutulmaya çalışılmıştır.

Ağır bilyaların neden olacağı segregasyon riskinin önlenmesi için birkaç farklı S/Ç oranlarında deneme karışımları yapılmıştır. Bu denemeler sonucu karışım tasarımında su/çimento oranı 0,38 olarak seçilmiştir. Bilyaların özgül ağırlığının doğal agregalara göre yaklaşık 3 kat fazla olması sebebi ile karışım hesapları hacim esasına göre yapılmıştır. Beton bileşenleri Tablo 6.28’de görülmektedir.

Tablo 6.28 Beton bileşenleri ve karışım oranları

Bileşen (kg/m ³)	Ağırlıkça kg/m ³	Hacimce
Çimento	490	155
Su	186	186
Kum (0-3/8 in.)	1255	488
10 mm Bilya	560	74
19 mm Bilya	402	53
25 mm Bilya	300	40
Hiperakışkanlaştırıcı	2,5	2
Hapsolmuş Hava, %	-	2
Toplam	3174,5 kg	1000 dm ³
Su /Çimento	0.38	
Su/Bağlayıcı	0.38	
KA/İA	0.50	
Hiperakışkanlaştırıcı (% bağlayıcı)	0.5	
Teorik BHA (kg/m ³)	3175	

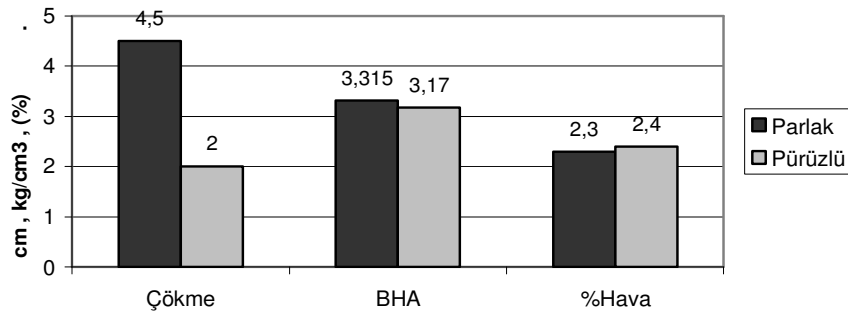
İnce agrega su emmesi 1,95 olup, karışıma katıldığı hali ile %3,2 nem içeriğinde olduğundan, gerekli nem düzeltilmesi yapılarak gerçek karışımın suyu miktarı belirlenmiştir. Dökümler sırasında hava açık ve parçalı bulutlu, gölgede 20±2 °C olarak ölçülmüştür.

Beton karışımları düşey milli betoniyer kullanılarak hazırlanmıştır. Her bir seri için 40 dm³'lük 3'er karışım hazırlanmıştır. Karışımlar önce agreg, bilya ve çimento kuru karışımı, ardından su ilavesi ile 4'er dakikalık sürelerde hazırlanmıştır. Kimyasal katkı karışım suyuna eklenmiştir.

Bilyalı beton karışımlarında, ağır bilyaların neden olacağı segregasyon riskinin önlenmesi için numuneler sarsma tablası kullanılmadan, iki tabaka halinde ve her bir tabaka 25'er kez şişlemek sureti ile sıkıştırılmıştır. Her iki karışımın 2, 7 ve 28 günlük basınç, silindir yarma ve elastisite modülü deneyleri için, 27'şer adet 10x20 cm ayrıtlı silindir ve 4 noktadan yüklemeli eğilme deneyleri için 9 adet 10x10x60 cm ayrıtlı beton prizma örnekleri hazırlanmıştır. Örnekler, kalıplarından çıkarılacakları zamana kadar (24±1 saat) üst yüzeyleri ıslak bezle örtülü bir durumda, +21 ila +14°C sıcaklık ortamında tutulmuşlardır. Kalıplarından çıkarılan örnekler deney gününe kadar 21±2 °C'de kirece doymun suda kür edilmiştir.

6.6.3 Taze Beton Deneyleri

Taze beton karışımlarının ölçülen çökme, BHA ve hava yüzdesi ortalamaları Şekil 6.54'de görülmektedir.



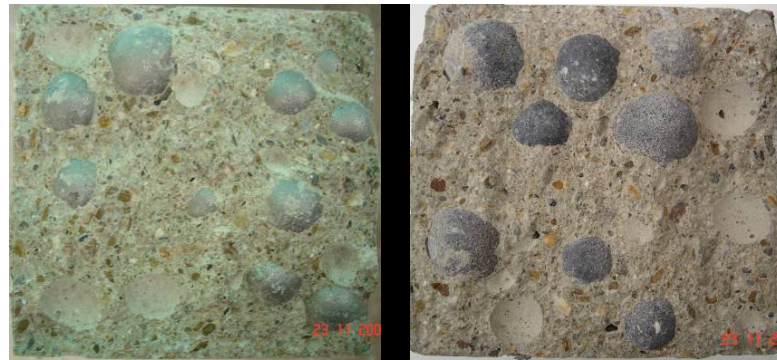
Şekil 6.54 İri agreg pürüzlülüğünün taze beton özelliklerine etkisi

Daha önce de bahsedildiği gibi, bilyaların BHA'ları yüksek olduğundan segregasyon riskine karşı, düşük işlenebilirlik değeri seçilmişti. Şekil 6.54'den görüldüğü gibi karışımlar kuru kıvamlı olup işlenebilirlikleri düşüktür. Çökme değeri parlak bilyalı betonlarda pürüzlü bilyalılara göre daha yüksektir. İri agreg

pürüzlülüğü karışımların işlenebilirliği ve aynı işlenebilirlik için su ihtiyacı üzerinde etkilidir. Pürüzlü yüzeyli agregaların, pürüzsüz yüzeyli agregalara göre su ihtiyacı daha fazladır.

BHA değerleri kalıbına yerleştirilecek karışımlarda bulunacak bilya sayısına göre, geniş bir aralıkta değişebileceğinden, BHA'lar her bir silindir kalıbın boş ağırlıkları ve yerleştirildikten sonraki dolu ağırlıkları ölçülerek çok sayıda ölçümün ortalaması şeklinde hesaplanmıştır. Pürüzlü bilyaların BHA'lıkları teorik BHA' değeri ile aynı çıkmıştır ($3,17 \text{ t/m}^3$). Parlak bilyalı betonlarda BHA değeri teorik BHA'dan bir miktar daha yüksektir ($3,32 \text{ t/m}^3$). Ancak bu farkın bilya pürüzlülüğünün etkisi olduğunu söylemek doğru olmayabilir. Pürüzlü ve parlak bilyalı betonların hava içerikleri çok yakın değerlerde olup, hava içeriği pürüzlü agregalarda bir miktar artmaktadır.

Prizma (10x10x60 cm) örneklerinde eğilme deneylerinden sonra beton yüzeyleri görüntülenerek segregasyon oluşup oluşmadığı kontrol edilmiştir (Şekil 6.55). Bu kesitlere bakılarak bilyaların genel olarak homojen dağıldığı söylenebilir.



(a) Parlak bilyalı

(b) Pürüzlü bilyalı

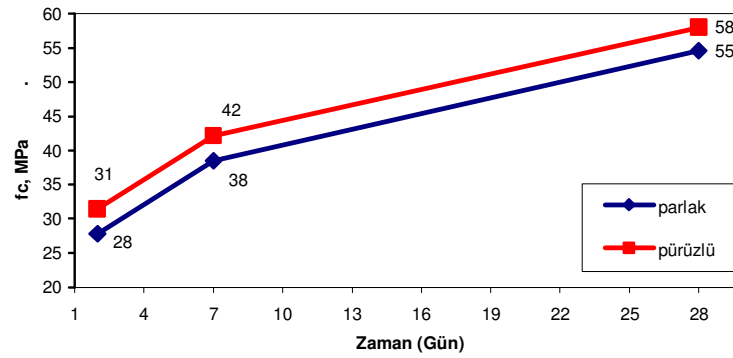
Şekil 6.55 Bilyalı beton kesitleri

6.6.4 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton deneyleri Bölüm 6.2.2'de tanımlanan deney düzenekleri ve yükleme koşullarında yapılmıştır.

6.6.4.1 Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı deneyleri 10x20 cm silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. Bilyalı betonlarda basınç dayanımlarının zamana bağlı gelişimi Şekil 6.56'da görülmektedir.

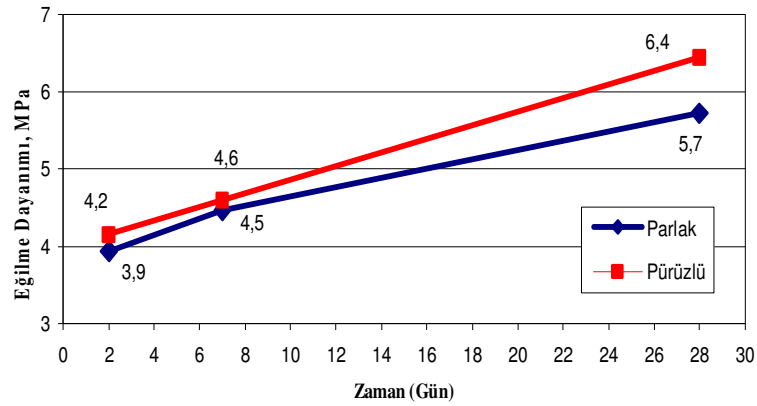


Şekil 6.56 Bilya yüzey dokusuna göre basınç dayanımı gelişimleri

Beton basınç dayanımları arasında iyi bir korelasyon vardır. Parlak bilyalı betonların pürüzlü bilyalı betonlara göre, basınç dayanımı kayıpları 2 günlük örneklerde % 10 iken, zamanla dayanım kaybı 7 günlük örneklerde % 9 ve 28 günlük örneklerde % 6 seviyelerine düşmektedir. Bu nedenle agrega pürüzlülüğünün agrega ile çimento hamuru arasındaki mekanik bağı arttırdığı söylenebilir. Mekanik kenetlenmedeki artış erken yaşlarda daha belirgindir.

6.6.4.2 Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı deneyleri 10x10x60 cm silindir numuneler üzerinde 4 noktadan yüklemeli deney düzeneği ile yapılmıştır. Bilyalı betonlarda eğilme dayanımlarının zamana bağlı gelişimi Şekil 6.57'de görülmektedir.

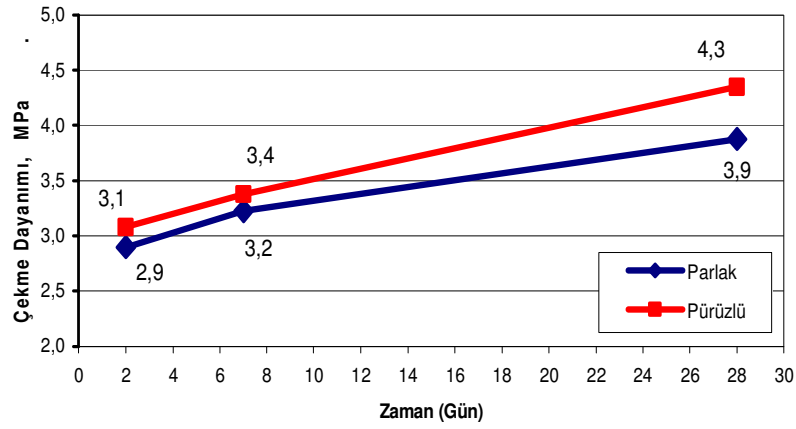


Şekil 6.57 Bilya yüzey dokusuna göre eğilme dayanımı gelişimleri

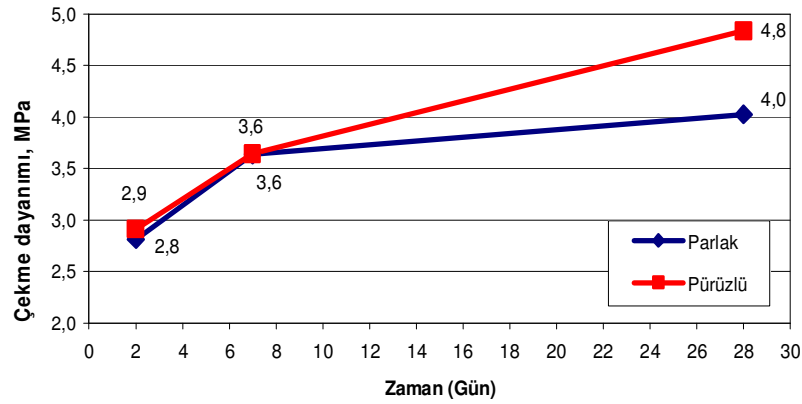
Beton basınç dayanımlarına benzer şekilde eğilme dayanım sonuçları arasında iyi bir korelasyon vardır. Bununla birlikte parlak ve pürüzlü bilyalı betonların eğilme dayanımları arasındaki fark, erken yaşlarda daha düşük iken ilerleyen yaşlarda artmaktadır. Parlak bilyalı betonların pürüzlü bilyalı betonlara göre eğilme dayanımı kaybı, 2 günlük örneklerde % 5 iken, 28 günlük örneklerde %9 seviyelerindedir.

6.6.4.3 Silindir Yarma Dayanımı

Silindir yarma dayanımı deneyleri 10x20cm'lik silindir numuneler ve ayrıca, eğilme deneyinde kırılan 10x10x60 cm prizma parçalarında (10x10 cm küp) yapılmıştır. Bilyalı betonların yarmada çekme dayanımlarının zamana bağlı gelişimi Şekil 6.58 ve Şekil 6.59'da görülmektedir.



Şekil 6.58 Bilya yüzey dokusuna göre beton silindir yarma deneyi sonuçları



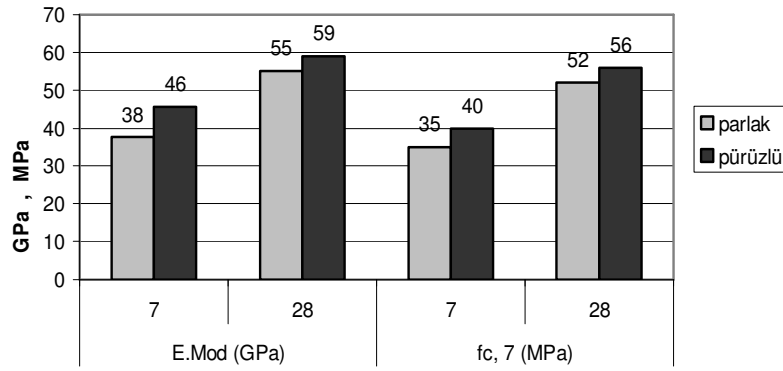
Şekil 6.59 Bilya yüzey dokusuna göre beton küp yarma deneyi sonuçları

Pürüzlü bilyalı betonların yarmada çekme dayanımları parlak bilyalılarına göre daha yüksektir. Farklar ilerleyen yaşlarda daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Parlak bilyalı betonların pürüzlü bilyalı betonlara göre silindir yarmada çekme dayanımı kaybı 2 günlük örneklerde % 6 iken, dayanım kaybı 28 günlük örneklerde %10 seviyesine çıkmaktadır. Aynı oranlar küp yarma deneyi için %3 ve %17 bulunmuştur.

Küp yarma deneyinden elde edilen çekme dayanımı değerleri 7 ve 28 günlük örnekler için silindir yarma dayanımından elde edilen çekme dayanımlarından daha yüksektir.

6.6.4.4 Elastisite Modülü

Parlak ve pürüzlü bilyalı 10x20 cm ayrıtlı beton prizma örneklerinin 7 ve 28 günlük statik elastisite modülleri Bölüm 7.2’de tanımlanan deney düzeneği kullanılarak belirlenmiştir. Sonuçlar Şekil 6.60’de görülmektedir.



Şekil 6.60 Parlak ve pürüzlü bilyalı beton örneklerinin statik elastisite modülü ve basınç dayanımları

Pürüzlü bilyalı betonların elastisite modülleri 7 ve 28 günlük örneklerde parlak bilyalı betonlardan daha yüksek çıkmıştır. Yedi günlük örneklerde bu fark %15 seviyelerinde, 28 günlük örneklerde ise %6 seviyelerindedir. Erken dayanım koşullarında agrega pürüzlülüğü elastisite modülü üzerinde daha önemli olmaktadır. Elastisite modülü deneyinde yükleme hızı (180 kgf/s) basınç deneylerine nazaran daha düşük tutulduğundan, Şekil 6.60’de görülen basınç dayanımlarda %10 civarında fark görülmüştür.

6.7 Sonuçlar

Agregaların tane şekli ve yüzey dokusu, çimento harcı ve beton karışımlarının mekanik özellikleri, yeterli işlenebilirlik için su ve çimento hamuru ihtiyacı, boşluk yapısı ve kuruma büzülmesi özelliklerini etkiler. Agregaların yüzey alanı; tane şekline, en büyük tane çapına ve agrega yığınının tane boyutu dağılımına bağlıdır.

Yüzey alanı artıkça, agregâ yüzeyini ıslatmak ve sarmak için daha fazla su ve çimento hamuru gerekir.

Agregâ boyutlarını küçültmek amacı ile kullanılan kırıcılar, agregalarda kusurlu malzeme yüzdesi üzerinde etkilidir. Darbeli kırıcılarla kırılan agregalar daha kübik şekil özelliklerindedirler. Ancak, çeneli ve merdaneli kırıcılarda kırılan agregalarda kusurlu malzeme oranı artmaktadır. Bu durum agregaların kullanıldıkları beton karışımlarının mekanik özelliklerini de etkilemektedir. Taze beton işlenebilirlikleri kusurlu malzeme oranının artması ile azalmaktadır. Yine kübik agregalarla üretilen betonlarda hapsolmuş hava içerikleri, kusurlu tane yüzdesi fazla olan agregalara göre daha azdır ve bu agregalarla daha yoğun karışımlar elde edilebilir.

Beton dayanımları agregaların minerolojisine de bağlıdır. Daha yüksek basınç dayanımına sahip bazalt aregası ile kireçtaşı agregalarına göre daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. Ancak, kusurlu malzeme oranı arttıkça basınç dayanımı kayıpları da daha büyük mertebelerde olmaktadır. Eğilme dayanımı açısından karşılaştırıldığında ise, kusurlu malzeme oranları daha yüksek olan bazalt agregalarında eğilme dayanımları kireçtaşı agregalı örneklere göre daha düşük olmaktadır. Bağlı dayanım kayıpları da aynı şekilde daha fazladır.

Agregalarda kusurlu malzeme oranı ile ilgili belirsizliği giderebilmek amacı ile yapılan çalışmada, normal dayanımlı beton sınıfı için 28 günlük dayanımlar göz önüne alındığında; %5 kusurlu agregâ içeren karışımlara göre, %30 ve %50 kusurlu agregâ içeren karışımların bağlı basınç dayanımlarında sırasıyla yaklaşık %10 ve %15 kayıp görülmüştür. Bu azalma eğilme dayanımı için yaklaşık %20 ve %34 seviyelerinde olmaktadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde, beton agregalarında kusurlu malzeme oranı eğilme dayanımı açısından daha kritiktir.

Yüzey pürüzlülüğünün betonun mekanik özelliklerini iyileştirdiği, Bölüm 6.6'daki bilyalı beton deney sonuçlarından görülmektedir. Pürüzlü yüzeyler, agregâ ile çimento hamuru arasındaki bağ dayanımını güçlendirir.

Yassı, uzun ve/veya köşeli agrega tane yüzeylerini sarabilmek için daha fazla su ve çimento hamuru gereklidir. Agreganın şekli ve yüzey pürüzlülüğü, agreganın hacim yoğunluğunu da etkiler. Düzgün yüzeyli ve yuvarlak agregaların hacim yoğunlukları, köşeli agregalara göre daha fazladır. Bunun nedeni, pürüzlü ve düzensiz şekilli agregalarda taneler arasındaki temas yüzeyi ve sürtünmedir. Boşlukları doldurabilmek ve taneler arasındaki sürtünme gerilmelerini azaltarak yeterli işlenebilirliği sağlayabilmek için daha fazla ince agrega ve su gereklidir. Ayrıca, dayanımı sabit tutmak için çimento miktarını da arttırmak gerekebilir.

Kusurlu biçimsiz iri agregalar yassı, uzun ve köşeli agregalara göre karışımın işlenebilirliğini düşürürler. Bununla birlikte, agregaların köşeli olması da betonun işlenebilirliğini üzerinde yassı ve uzun tanelere göre daha etkilidir. Ancak köşeli agregalarla, kusurlu agregalara oranla daha yoğun beton karışımları elde edilir. Kusurlu ve yuvarlak şekil özelliklerindeki pürüzsüz agregalarla üretilen taze betonlarda segregasyon ihtimali yüksektir.

BÖLÜM YEDİ

SONUÇ VE ÖNERİLER

Geliştirilen 3 farklı görüntü analiz sistemi ve yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

— İri ve ince agregaların şekil, köşelilik ve yüzey pürüzlülüğü gibi geometrik özelliklerinin doğru ve hızlı olarak belirlenmesinde kullanılabilecek aydınlatma panelli görüntü analiz sistemi geliştirilmiştir. Bu sisteme entegre edilmek üzere geliştirilen özel bir program C++ programlama dilinde kodlanmış ve kullanım kolaylığı açısından bir kullanıcı arayüzü tasarlanmıştır.

— Geliştirilen görüntüleme sisteminde homojen aydınlatmanın sağlanması, görüntü işleme süresini azalttığı gibi, aynı zamanda görüntü işleme sırasında oluşacak olası veri kayıplarının giderilmesi açısından da önemlidir. Agreg geometrik özellikleri, sistemden alınan yüksek çözünürlüklü görüntülerden, dijital görüntü analizleri ile objektif olarak belirlenebilmektedir. Agreg geometrik özelliklerinin otomatik ve doğru olarak ölçülebilmesi, standart yöntemlerde yaşanan bazı olumsuzluklarının giderilmesi açısından önemlidir.

— Geliştirilen özel program sayesinde, birbiri ile doğrusal ilişkisi olmadığı belirlenen 4 farklı geometrik özellik (Yuvarlaklık, Konkavlık, Dış merkezlik ve Köşelilik) belirlenebilmektedir. Agreg köşeliliğinin belirlenmesinde, literatürde tanımlanandan farklı olarak daha güvenilir bir “köşelilik fonksiyonu” tanımlanmıştır. Bu fonksiyon, agreg tane merkezinden, tane kenarları boyunca farklı açı derecelerinde yüzey özelliklerinin taranması işlemidir. Düşük açı derecelerinde yapılan analizler tanenin pürüzlülüğü hakkında bilgi verirken, yüksek açı dereceleri ise tanenin köşeliliği ile ilgili bilgi vermektedir.

— İri agreg tanelerinin 3. boyutu ile ilgili veri alabilmek ve taneleri şekil özelliklerine göre sınıflandırabilmek amacıyla, aydınlatma panelli sistem 2 farklı açıdan (stereo yöntem) görüntü alabilmek üzere modifiye edilmiştir. Bu şekilde

agregaların yükseklik değerleri ölçülebilmektedir. Elde edilen görüntülerinden, agregalar yapılarını en iyi tanımlayan öznitelik vektörleri MatLab®’da “Fisher Doğrusal Ayırıcı Analizi” yardımı ile bulunmuştur. Bu yöntemle, 5 farklı geometrik özellikteki agregalar taneleri ile yapılan görüntü analizlerinde, Fisher doğrusal ayırıcılığı sınıflandırma başarımları oranı %95,8 olarak bulunmuştur.

— Prototipi hazırlanan lazer kameralı sistem, agregalarda 3 boyutlu görüntü analizi için yüzey tarama amacıyla kullanılabilecektir. Bu amaçla MatLab® Programı kullanılarak 3 boyutlu modelleme yazılımı ve kullanıcı arayüzü geliştirilmiştir. Arayüz kullanım kolaylığı açısından işlem hızını ve güvenilirliğini arttırmaktadır. Sınırlı sayıda yapılan agregalar analizlerinde, ASTM D 4791 yöntemi ile birebir uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

— Bu çalışmaya özgü olarak tasarlanan görüntüleme sistemlerinden biri de; Sanal kameralı sistemdir. Geliştirilen sistemle bir kamera ve sanal kamera olarak kullanılacak 4 ayna ile 3. boyuta en yakın öznitelikler çok daha az donanım ve maliyetlerle sağlanabilmektedir. Sistemin kalibrasyonu yapılmış ve agregalarda deneme çekimleri yapılmıştır. Sistemli analizlerin yapılması ile yöntemin kısa zamanda etkin olarak kullanılması planlanmaktadır. Yöntem, 3 boyutlu görüntüleme amacıyla çok farklı çalışma alanlarında da kullanılabileceği düşünülmektedir.

— Aydınlatma panelli sistem, hem iri ve hem de ince agregaların geometrik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilmektedir. Bu yönüyle sistem, literatürde tanımlanan sistemlere göre avantajlı olmaktadır. Lazer kameralı sistem ve sanal kameralı sistem ise iri agregaların 3 boyutlu modellenmesi ve geometrik özelliklerinin belirlenmesinde etkin olarak kullanılabilir.

— Farklı kırıcı tipleri ile üretilen agregalar geometrik özelliklerinin beton performansına etkisinin mertebelerini belirlemek üzere çimento harcı ve beton deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları; agregalar tane şekli ve yüzey dokusu özelliklerinin, çimento harcı ve beton karışımlarının; mekanik özellikleri, yeterli işlenebilirlik için su ve çimento hamuru ihtiyacı, boşluk yapısı, birim hacim ağırlık gibi özelliklerini önemli derecede etkilediğini göstermektedir.

Deney verilerinin değerlendirilmesi sonucu aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- İnce agrega şekli, çimento harcı basınç ve eğilme dayanımları üzerinde **%4-5** mertebelerinde etkilidir. Yüzey pürüzlülüğü ise agrega şekli ile birlikte etkiyi **%9-10** oranlarına yükseltmektedir.
- Daha yüksek basınç dayanımına sahip agregalarla aynı koşullarda üretilen betonlarda daha yüksek mekanik performans görülmüştür. Ancak kusurlu malzeme oranı arttıkça, dayanım kayıpları da daha büyük mertebelerde olmaktadır.
- Agregalarda kusurlu malzeme oranının etkisini belirlemek amacı ile yapılan çalışmada, 28 günlük basınç dayanımları göz önüne alındığında; **%5** kusurlu agrega içeren karışımlara göre, **%30** ve **%50** kusurlu agrega içeren karışımların bağıl basınç dayanımları **%10** ve **%15** oranında azalmaktadır. Bu azalma, eğilme dayanımı açısından daha kritik olup yaklaşık **%20** ve **%34** mertebelerine çıkmaktadır.
- Kusurlu ve/veya biçimsiz iri agregalar aynı zamanda taze beton karışımlarının işlenebilirliğini düşürmekte, hapsolmuş hava oranını arttırmakta ve birim hacim ağırlığının azalmasına neden olmaktadır. Köşeli agregalarla, kusurlu agregalara oranla daha az boşluklu beton karışımları elde edilmektedir. Kusurlu ve yuvarlak şekil özelliklerindeki pürüzsüz agregalarla üretilen taze betonlarda ise segregasyon eğilimi gözlenmiştir.
- Pürüzlü yüzeyli agrega taneleri ile parlak yüzeyli tanelere göre, çimento hamuru ile daha iyi aderans sağlandığı görülmüştür.
- Agregada boyutunu küçültmek amacı ile kullanılan kırıcıların tipi, agrega şekil ve yüzey pürüzlülüğü özellikleri üzerinde oldukça etkilidir. Düşey milli ve darbeli kırıcılarla daha kübik şekilli agregalar üretilmektedir. Çeneli ve merdaneli kırıcılarda ise kırılan agregalarda kusurlu malzeme oranı daha yüksek olmaktadır.

Agregalarda görüntü analizi işlemleri için öznitelik belirleme ve sınıflandırma işlemleri; beton ve asfalt üretimi için uygun özelliklerde agreganın temini, agreganın üretim denetimi ve kusurlu tane oranlarının belirlenmesi gibi, çeşitli amaçlar için kullanılacak işlemlerin ilk basamağını teşkil etmektedir. Bu çalışmanın geliştirilmesi ile kırıcıdan çıkan ve bant üzerinde ilerleyen agregalardan görüntüler alma, bu görüntülerin analizi mümkün olabilecektir. Daha da ileriye gidilecek olursa; kırma yöntemi, eleme sistemi ve tane boyut dağılımı düzenlemelerinin kontrollü olarak yapılabileceği otomasyon sistemleri geliştirilebilecektir. Bu sayede kullanım amacına uygun agreganın üretimi ve denetimi yapılabilir.

Agregaların 3 boyutlu görüntülerinin elde edilmesi amacıyla geliştirilen sanal kameralı sistem, tek bir görüntüden agreganın 5 farklı yüzeyine ait geometrik özelliklerinin belirlenmesi açısından önemlidir. Sistemin kalibrasyonu yapılmasına rağmen, elde edilen görüntülerin birleştirilmesi için 3 boyutlu modelleme programı tez süresinin kısıtlılığı nedeniyle henüz tamamlanamamıştır. Bu programın yazılması ile agreganın tanelerinin geometrik özellikleri çok daha objektif olarak belirlenebilecektir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda; her bir agreganın geometrik özellikleri; alan, çevre, en, boy, yuvarlaklık, konkavlık, köşelilik, dış merkezlik gibi temel geometrik özellikleri ile ifade edilmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda üzerinde çalışılması planlanan başlıca agreganın özellikleri ise:

- Agreganın tanelerinin radiometrik ve derinlik görüntüleri üzerinde doku analizleri uygulanarak dokusal özellikleri daha hassas olarak belirlenmesi,
- Moment yöntemi, Fourier tanımlayıcıları, Dalgacık dönüşümü yöntemi, Eğrisel büyüklük uzayı (Curvature scale space), Ortak oluşum (co-occurrence) matrisi, Gauss-Markov Rassal Alan (GMRF) model yöntemi gibi dönüşümlerle, kolayca görülemeyen bazı özniteliklerin ortaya çıkarılması olabilir.

Ayrıca, agregaların geliştirilen görüntü analiz yöntemleri ile değişik özelliklerinin, betonun mekanik ve dayanıklılık performansına etkisi, istatistiksel açıdan anlamlı ve tekrarlanabilir deney verisi ile belirlenmesi gerekmektedir.

Mertebe belirlemek amacı ile yapılan ön çimento harcı ve beton deneyleri sistematik olarak geliştirilip programlanarak, asfalt gibi malzemelere de uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- AASHTO TP33 (1993). AASHTO Provisional standard, Standard test method for uncompacted void content of fine aggregate, *American Assoc. of State Highway and Transportation Officials*, Washington, D.C.
- AFNOR P18-564 (1990). Normalisation Française Détermination du Coefficient d'écoulement des Sables. PR Industrie, Paris.
- Ahlich, R.C. (1996). Influence of aggregate properties on performance of heavy-duty hot-mix asphalt pavements. Transportation Research Record 1547, *Journal of the Transportation Research Board*, National Research Council, Washington D.C., 7-14.
- Ahn, N. (2000). *An experimental study on the guidelines for using higher contents of aggregate microfines in Portland cement concrete*. Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin.
- Alexander, M.G. (1989). Role of aggregates in hardened concrete, *Material Science of Concrete III*, Skalny, J. and Mindess, S. eds., *The American Ceramic Society, Inc.* Westerville, Ohio, 119-146.
- Aschenbrenner, B.C. (1956). A new method of expressing particle sphericity, *Journal of Sedimentary Petrology*, 26, 15-31.
- ASTM C117 (1995). Standard test method for materials finer than 75 mm (No. 200) Sieve in mineral aggregates by washing. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Philadelphia, PA.
- ASTM C136 (2001). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Philadelphia, PA.

ASTM C494-81 (1981) Standard specification for chemical admixtures for concrete. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohoken, Philadelphia, PA.

ASTM C1252 (1998). Standard test method for uncompacted void content of fine aggregate (as influenced by particle shape, surface texture, and grading). *American Society for Testing and Materials*, West Conshohoken, Philadelphia, PA.

ASTM D2488 (2000). Standard practice for description and identification of soils (visual-manual procedure). *American Society for Testing and Materials*, West Conshohoken, Philadelphia, PA.

ASTM D3398 (2000). Standard test method for index of aggregate particle shape and texture. Annual Book of ASTM Standards. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohoken, Philadelphia, PA.

ASTM D4791 (1999). Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohoken, Philadelphia, PA.

ASTM D5821 (2001). Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohoken, Philadelphia, PA.

Bajgier, S.M., & Hill, A.V. (1982). An experimental comparison of statistical and linear programming approaches to the discriminant problem. *Decision Sciences*, 13, 604-618.

Bal, H., (1999). Çok Gruplu Ayırma Probleminde Doğrusal ve Tamsayılı Programlama Yaklaşımı ve Yeni Bir Model. *Gazi üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(4), 957-962.

Bal, H., & Örkücü, H.H. (2005). Combining the Discriminant Analysis and Data Envelopment Analysis in view of Multiple Criteria Decision Making: A New Model. *G.U. Journal of Science*, 18 (3), 355-364.

- Barksdale, R. D., Kemp, M. A., Sheffield, W. J. & Hubbard, J. L. (1991). Measurement of aggregate shape, surface area, and roughness. *Transportation Research Record 1301, Journal of the Transportation Research Board*, National Research Council, Washinton D.C., 107-116.
- Bathina, (2005) Appendixes to NCHRP Report 555: Test methods for characterizing aggregate shape, texture, and angularity (NCHRP 04-30A). *Transportation Research Board*.
- Baxes, A G., (1994). *Digital Image Processing Principles and Applications*. John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Browne, C, Rauch, A.F, Haas, C.T, & Kim, H. (2003). Performance evaluation of automated machines for measuring gradation of aggregates. *Geotechnical testing Journal*, 26 (4).
- Brzezichi, J.M., & Kasperkiewicz, J. (1999). Automatic image analysis in evaluation of aggregate shape. ASCE, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 13 (2).
- BS 812:Part 1. (1975). Testing aggregates. Methods for determination of particle size and shape. *British Standards Institution*.
- BSI 812-Part 2. (1995). Testing aggregates: Methods of determination of density, *British Standards Institute*.
- Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *Transactions on pattern anaysis and machine intelligence*, IEEE, 8 (6), 679-698.
- Chang, F., Chen, C.J., & Lu, C.J. (2004). A linear-time component-labeling algorithm using contour tracing technique. *Computer vision and image understanding*. 93, 206-220.
- Cominsky, R.J. (1994). The Superpave mix design manual for new construction and overlays. *Strategic Highway Research Program SHRP-A-407*, National Research Council, Washington, D.C.

- Çelik, T. (1991). KKTC’de doğal ve kırma taş agregaları ile yüksek beton basınç dayanımları, 2. *Ulusal Beton Kongresi*, Yüksek Dayanımlı Beton TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İTÜ, Maçka, İstanbul, 294-302.
- Çinko, M. (2006). Kredi kartı değerlendirme tekniklerinin karşılaştırılması. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, Yıl:5 Sayı:9 Bahar 2006/1, 143-153.
- De Larrard, F. (1999). *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*, London, Spon Press.
- Dewar, J. D. (1999). *Computer Modelling of Concrete Mixtures*, London, E & FN Spon.
- Dilek, U., (2000). Effects of manufactured sand characteristics on properties of concrete, Ph.D. Thesis, North Caroline State University.
- Dinçer, Y. (1964). A Study of rounded and angular aggregates as to their effect on the strength of concrete. ODTÜ, Mühendislik Fakültesi, Y.Lisans Tezi.
- Durney, T. E. Jr., (1983). *Particle shape effects due to crushing method and particle size*. Ph.D. Thesis, West Virginia University.
- EN 933-6, Tests for geometrical properties of aggregates-Part 6: Assesstment of surface characteristics- Flow coefficient of aggregates, October 2001.
- Erdoğan, T.Y., (2003). *Beton*, Ankara, ODTÜ.
- Erenguc, S.S, & Koehler, G.J. (1990). Minimizing misclassifications in linear discriminant problem. *Decision Sciences*, 21, 63-85.
- Ferlund, J.M.R. (2005). 3-D image analysis size and shape method applied to the evaluation of the Los Angeles test. *Engineering Geology*, 77, 57–67.
- Fisher, B., Perkins, S., Walker, A., & Wolfart, E. (April 24, 2006) Fisher’s Lineer Discriminant Analysis Codes, Retrieved April 24, 2006, from, http://www.cee.hw.ac.uk/hipr/html/hipr_top.html

- Fred, N., & Glover, F. (1981). Simple but powerful goal programming formulations for the statistical discriminant problem. *European Journal of Operational Research*, 7, 44-60.
- Fred, N., Glover, F. (1981). A linear programming approach to the discriminant problem. *Decision Sciences*, 12, 68-74.
- Freeman, R.B. & Kuo, C-Y. (1999). Quality control for natural sand content of asphalt concrete. *Journal of Transportation Engineering*, November/December, ASCE.
- Galloway, J. E. Jr. (1994). Grading, shape and surface properties, in significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials. *ASTM Special Technical Publication No:169 C*, Philadelphia, 401-410.
- Ghalib, A. M., & Hryciw, R. D. (1999). Soil particle size distribution by mosaic imaging and watershed analysis. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, 13(2), 80-87.
- Garboczi E.J., Cheok, G.S. & Stone, W.C. (2006). Using LADAR to characterize the 3-D shape of aggregates: Preliminary results. *Cement and Concrete Research*, 36 (6), 1072-1075.
- Garboczi, E. J. (2002). Three-dimensional mathematical analysis of particle shape using X-ray tomography and spherical harmonics: Application to aggregates used in concrete. *Cement and Concrete Research*, 32 (10), 1621-1638.
- Goceri, E. & Boyen, H. (2006) *Classical Image Processing*. Xios Hogeschool Seminars, Hasselt, 62s.
- Gonzales, R.C., & Woods, R.E. (2007), *Digital Image Processing*. 3rd edition, Pearson Educational International, Prentice Hall.
- Gonzales, R.C., Woods, R.E., & Eddins, S.L. (2004), *Digital Image Processing using MATLAB*, Pearson Educational International, Prentice Hall.

- Gümüştekin, Ş. (2005) Tek kamera ve aynalar kullanan bir görsel denetleme sistemi, *IEEE, SİU*, 257-260.
- Hartley, R., & Zisserman, A. (2002). *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge Press.
- Hossain, M.S., Parker, F., & Kandhal, P. (1999). Tests for evaluating fine aggregate particle shape, angularity, and surface texture. Transportation Research Record 1673, *Journal of the Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, D.C., 64-73.
- Hossain, M.S., Parker, F., Kandhal, P. (2000). Uncompacted voids and particle index test for evaluating coarse aggregate. Transportation Research Record 1721, *Journal of the Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, D.C., 100-105.
- Huber, D.F., & Hebert, M. (1999). A new approach to 3-D terrain mapping. *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ*, Kyongju, Korea.
- Hudson, B. P. (1999). Modification to the fine aggregate angularity test investigation into the way we measure fine aggregate angularity. *Proceedings of the 7th Annual Symposium, International Center for Aggregate Research (ICAR) Symposium*, International Center for Aggregates Research, Austin, TX.
- Jaakkola T. & Haussler D. (1999). Probabilistic kernel regression models. *In Proceedings of the 1999 Conference on AI and Statistics*.
- Jahn D.W. (2003). Compacted Aggregate Resistant Test. *Presentation at ICAR*, May.
- Janoo, V. C. (1998). Quantification of shape, angularity, and surface texture of base course materials. *U.S. Army Corps of Engineers Special Report 98-1*, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Hanover, NH.
- Johansen, K. I., Laanke, B., & Smeplass, S. (1991). Crushed sand as a complimentary aggregate. *Nordic Conc.Research*, May, 18-29.

- Kaplan, M. F. (1959). Flexural and compressive strength of concrete as affected by the properties of coarse aggregates. *Proceedings of the American Concrete Institute*, 55, 1193-1208.
- Kemeny, J. M., Devgan, A., Hagaman, R. M., & Wu, X. (1993). Analysis of rock fragmentation using digital image processing. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 119 (7), 1144-1160.
- Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Harold, V.Q., & Moulthrop, J.S. (1994). Superior performing asphalt pavements: The product of the SHRP asphalt research program, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
- Khandal, P.S. & Parker, F.Jr. (1998). Aggregate tests related the asphalt concrete performance in pavements. National Cooperative Highway Research Program, Report 405, *Journal of the Transportation Research Board*, Washington D.C.
- Kim, H. (2002). Automation of aggregate characteristics using laser profiling and digital image analysis. Ph.D. Thesis, The University of Texas, Austin.
- Kim, H., Haas, C., Rauch, A. & Browne, C. (2002). Dimensional ratios for stone aggregates from 3D laser scans. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16 (3), 175-183.
- Kim, H., Haas, C. T., Rauch, A. F., & Browne, C. (2002). Wavelet-based 3D descriptors of aggregate particles. *Transportation Research Record 1787*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 109-116.
- Kim, H., Haas, C.T., & Rauch, A.F. (2003). 3D image segmentation of aggregates from laser profiling. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18 (4), 254-263.
- Krumbein, W.C. (1991). Measurement of geological significance of shape and roundness of sedimentary particles, *Sediment Petrol*, 11, 64-72.

- Kuo, C.Y., & Freeman, R.B. (2000). Imaging indices for quantification of shape, angularity, and surface texture of fine aggregates. Transportation Research Record 1721, *Journal of the Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, D.C., 57-66.
- Kuo, C.Y., Rollings, R.S., & Lynch, L.N. (1998). Morphological study of coarse aggregates using image analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10 (3), 135-142.
- Kwan, A.K.H., Mora, C.F., & Chan H.C. (1999). Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing. *Cement and Concrete Research*, 29 (9), 1403-1410.
- Kwan A.K.H., Mora C.F. (2001). Effects of various shape parameters on packing of aggregate particles. *Magazine of Concrete Research*, 53 (2), 91-100.
- Lam, K.F., Choo, E.U., & Moy, J.W. (1996). Minimizing deviations from the group mean: A new linear programming approach for the two-group classification problem. *European Journal of Operational Research*, 88, 358-367.
- LCPC-Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Video Grader VDG-40 retrieved February 12, 2006 from;
http://www.lcpc.fr/en/produits/materiels_mlpc/fiche.dml?id=150&type=abcaire
- Lee, C.J., Pan, C., & White, T.D. (1998). *Review of fine aggregate angularity requirements in Superpave*. Purdue University, West Lafayette IN.
- Legg, F.E. Jr. (1998). *Aggregates*. 4th ed. Chapter 2, Concrete Construction Handbook, ed. Dobrowolski, J. McGraw-Hill,.
- Masad, E. (2002). Aggregate imaging system (AIMS). *The Transportation Research Board*, Superpave Mixture/Aggregate Expert Task Group, August 28-29, Minneapolis, MN.
- Masad, E. (2002). *Report on image analysis of aggregates samples for the university of Texas*, UT.

- Masad, E., & Fletcher, T. (2001). AIMS: aggregate imaging system for characterizing the shape of coarse and fine aggregates. *Proceedings of the 10th Symposium of the International Center for Aggregate Research*, Baltimore, MD.
- Masad, E., Button, J.W., & Papagiannakis, T. (2000). Fine aggregate angularity: automated image analysis approach. Transportation Research Record 1721, *Journal of the Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, D.C., 66-73.
- Masad, E., & Button, J.W. (2000). Unified imaging approach for measuring aggregate angularity and texture. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 15, 273-280.
- Maso, J.M. (Ed.) (1992). Interfaces in cementitious composites, Pro. Int. Conf., Toulouse, E. and F.N.Spon, London.
- McGhee, K.K., Troy, P.E., Deeds, M. & Rorrer, T.M. (2005). Comparison of Alternative Devices to Determine Aggregate Shape. Report no:VTRC 06-R10 Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, VA.
- Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. (1993). *Concrete: Structure, Properties, and Materials*. Englewood Cliffs, N.J. 2nd ed., Prentice-Hall.
- Mehta, P.K., & Monteiro, P.J.M. (1999). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. Chennai, Indian Concrete Institute.
- Midness, S., & Young, J.F. (1981). *Concrete*, New York., Prentice Hall.
- Monteiro, P.J.M., Maso, J.C., & Olliver, J.P. (1985). The aggregate-mortar interface. *Cement and Concrete Research*, 15 (6), 953-958.
- Mora, C. F., Kwan, A. K. H., & Chan, H. C. (1998). Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing. *Cement and Concrete Research*, 28 (6), 921-932.

- Mora, C.F., & Kwan, A.K.H. (2000). Spherity, shape factor, and convexity measurements of coarse aggregate for concrete using digital image processing, *Cement and Concrete Research*, 30 (3), 351-358.
- Morales, F.X.M., & Fernandez, M.M.T. (2004). How much difference is there between industrial district firms? A net value creation approach, *Research Policy*, 33, 473–486.
- Neville, A.M. (1995). *Properties of Concrete*. 4th Edition, England. Longman Ltd. 108-176.
- NF P 18-540, (1997) Granulats, definitions, conformite, specifications. AFNOR.
- Oh, K-C., Kim, J-Y., Yang, D-Y., Lee, J-Y., and Hong, S-S. (2008). An assessment of the sand resources in old riverbeds and flood plain deposits within a branch of the Geum River, South Korea. *Quaternary International*, 176;177, 156-171.
- Ollivier, J.P., Maso, J.C., & Bourdette, B. (1995). Interfacial transition zone in concrete, *Advanced Cement Based Materials*, 2, 30-38.
- Özdamar K. (2002). Paket programlar ile istatistiksel veri analizi I-II, Kaan Kitabevi.
- Popovics, S. (1992). *Concrete materials, properties, specifications and testing*. 2nd edition, Noyes publication.
- Popovics, S. (1998). *Strenght and related properties of concrete. A quantitative approach*, John Wiley and Sons.
- Powers, M. C. (1953). A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 23 (2), 117-119.
- Prowell, B.D., & Weingart, R. (1999). Precision of flat and elongated particle tests: ASTM D4791 and VDG-40 Videograder. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, D.C., 1673.

- Quiroga, P.N., & Fowler, D.W. (2004). *The effect of the aggregate characteristics on the performance of Portland cement concrete*, ICAR research Report 104-1F.
- Tutumluer, E. Rao, C., & Stefanski, J.A. (2000). Video image analysis of aggregates. *Final Report No: FHWA-IL-UI-278*, University of Illinois at Urbana Champaign.
- Rao, C., Tutumluer E., & Stefanski, J.A. (2001). Coarse aggregate shape and size properties using a new image analyzer. *ASTM Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, 29 (5), 79-89.
- Rao, G.A., & Prasad B.K.R., (2002). Influence of the roughness of aggregate surface on the interface bond strength, *Cement and Concrete Research*, 32 (2), 253-257.
- Polikar R. *Wavelets*. retrieved April 16, 2006 from; <http://users.rowan.edu/~polikar/wavelets.html>
- Russ, J. C. (2002). *The Image Processing Handbook*. 4th Edition, Material Science and Engineering Department North Carolina State University Raleigh, North Carolina, CRC Press LLC.
- Sarp, E. (2003). *Digital Image Processing*. Kocaeli Üniversitesi, No. 323604A-01.
- Shilstone, J. M. Sr. (1990). Concrete mixture optimization. *Concrete International: Design and Construction*, 12 (6), 33-39.
- Shilstone, J. M. (1999). The aggregate: the most important value adding component in concrete. *Proceedings of the 7th annual symposium international center for aggregate research*, Austin Texas.
- Sonka, M.H., Hlavac, V., & Boyle, R. (1999). *Image processing, analysis, and machine vision*, Pacific Grove, CA., PWS publishing.
- Sukhwani, R.S., Little, D.N., & Masad, E.A. (2006). Sensitivity of HMA performance to aggregate shape measured using conventional and image analysis methods. *Texas Transportation Institute*. The Texas A&M University System, Report No: FHWA/TX-05/0-1707-5.

- Sühling, M., Arigovindan, M., & Hunziker, P. (2004) Multiresolution moment filter; theory and applications. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13 (4), 484-495.
- Tasong, W.A., Lynsdale, C.J., & Cripps, J.C. (1998). Aggregate-cement paste interface influence of aggregate physical properties. *Cement and Concrete Research*, 28 (10), 1453-1465.
- Taşdemir, C. (1995). *Agrega-çimento hamuru arayüzeyi mikroyapısının yüksek mukavemetli betonların kırılma parametrelerine etkisi*. İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Tokyay, M. (1998). Agregat tipinin yüksek dayanımlı betonların mekanik özelliklerine etkisi. *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi*, 9 (2), 1627-1638.
- Tolungüç, H. (2000). *İzmir İli Agregat Üretim ve Tüketim Projeksiyonu ve Taş Ocaklarının Çevresel Etkileri*. DEÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans tezi.
- Topal, A. (2001). *Fine aggregate angularity in turkey in bituminous mixtures*. DEÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi.
- Topal, A., & Şengöz, B. (2005). Determination of fine aggregate angularity in relation with to rutting of hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 19, 155-163.
- Topal, A., & Şengöz, B. (2008). Evaluation of compacted aggregate resistance test compared with the fine aggregate angularity standarts. *Construction and Building Materials*, 22, 993-998.
- Trucco, E., & Veri, A. (1998). *Introductory Techniques for 3D Computer Vision*, Prentice Hall.
- TS 3814 EN 933-4 (2001). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler Bölüm 4: Tane şeklinin tayini- Şekil indisi. TSE, Bakanlıklar, Ankara.
- TS 706 (1980). Beton Agregaları. TSE, Bakanlıklar, Ankara.

- TS 706 EN 12620 (2003). Beton Agregaları. TSE, Bakanlıklar, Ankara.
- TS 9582 EN 933-3 (1999). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler Bölüm 3: tane şekli tayini- yassılık indeksi. TSE, Bakanlıklar, Ankara.
- TS EN 933-1 (1999). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini- eleme metodu. TSE, Bakanlıklar, Ankara.
- TS EN 933-2 (1996). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler Bölüm 2: Tane boyutu dağılımı tayini- deney elekleri, elek göz açıklıklarının anma büyüklükleri. TSE, Bakanlıklar, Ankara.
- TS EN 933-5 (2000). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 5: iri agregalarda ezilmiş ve kırılmış yüzeylerin yüzdesi tayini. TSE, Bakanlıklar, Ankara.
- TS EN 934-2 (2002) Kimyasal Katkılar- Beton, Harç ve Şerbet İçin- Bölüm 2: Beton Katkıları- Tarifler ve Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme. TSE, Bakanlıklar, Ankara.
- Uğurlu, A. (2002). Betonda agrega-çimento hamuru aderansı üzerine. *Hazır Beton*, Ocak-Şubat Sayısı.
- USA National Highway Official, (1989). Technical Bulletin, T-2040/89.
- US Patent Cooperation Treaty, (1999). WO 00/10797.
- Wadell, H. (1935). Volume, shape, and roundness of quartz particles. *Journal of Geology*, 43, 450-480.
- Wang, L., James, S. L., & Frost, J. D. (1997). Fourier morphological descriptors of aggregate profiles. *Proc., Engineering foundation conference on imaging techniques: techniques and applications in civil engineering*, ASCE, Davos, Switzerland, 76-87.

- Wang, L., Frost, D. (2002). Quantification of the specific aggregate surface area using X-Ray tomography. *Proceedings of the Pavement Mechanics Symposium at the 15th ASCE Engineering Mechanics Conference*, New York, 241.
- Wills, B.A. (1988). *Mineral Processing Technology* (4th Edition). New York.
- Wilson, J.D., & Klotz, L.D. (1998). Automated aggregate shape analysis and rutting/stripping performance. Research Report, *Mach-Blackwell Transportation Center*, University of Arkansas, Fayetteville, Arkansas.
- Yaman, K., Sarucan, A., Atak, M., ve Aktürk, N. (2001). Dinamik çizelgeleme için görüntü işleme ve arama modelleri yardımıyla veri hazırlama. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 16 (1), 19-40.
- Yıldız, N. (2007). *Cevher hazırlama*. Erten basım yayın dağıtım.
- Zaniewski, J.P., & Rafferty, S. (2004). Evaluation of the compacted aggregate resistant test. Department of Civil and Environmental Engineering, Morgantown, West Virginia.
- Zimbelmann, R. (1985). A contrubition to the problem of cement-agregate bond. *Cement and Concrete Research*, 15 (5), 801-808.
- Zimbelmann, R. (1987). A method for strengthening the bond between cement stone and aggregates. *Cement and Concrete Research*, 17 (4), 651-660.

EK A - AGGREGANALYSIS PROGRAMI C++ KODLARI


```

#include "img_pro.h"
//#include <stdio.h>
//#include <stdlib.h>
#include <memory.h>
//#include <math.h>
//#include <string.h>

#define M_PI          3.14159265358979323846

// Based on "A linear-time component-labeling algorithm using contour
tracing technique"
// Chengli Chen, Lu; Computer Vision and Image Understanding 2004

// #define MIN_COMP_SIZE 50

static int SearchDirection_8[8][2] = {{0,1},{1,1},{1,0},{1,-1},{0,-1},
{-1,-1},{-1,0},{-1,1}};
static int NextTracingDirection_8[8] = {7,7,1,1,3,3,5,5};
static unsigned char **bitmap;
static int **labelmap;
static int **contourmap;

int read_pbm(char *fn, int *pwidth, int *pheight, int option);
int write_rlt(char *fn, int cccnt, int width, int height, int option);
void Tracer_8(int *cy, int *cx, int *tracingdirection);
void ContourTracing_8(int cy, int cx, int labelindex, int
tracingdirection, int option);
int ConnectedComponentLabeling_8(char *fn, int option, int *NCols, int
*NRows);
void freearrays(int height, int option);
float find_perimeter(unsigned char **img, int width, int height);
float find_eccentricity(unsigned char **img, int width, int
height,float center_j,float center_i);
float find_eccentricity2(unsigned char **img, int width, int
height,float center_j,float center_i);
void find_mean_and_dev(float *arr, int size, float *mean, float *dev);
float find_concavityratios(unsigned char **img,int width,int
height,float center_j,float center_i,float area);
float find_concavityratios45deg(unsigned char **img,int width,int
height);
float find_angularity(unsigned char **img,int width,int height,float
center_j,float center_i,float area,int delta_ang);
void find_center(unsigned char **img,int width,int height,float
*center_j,float *center_i);
int PointInTriangleYesNo(float plj,float pli,float aj,float ai,float
bj,float bi, float cj,float ci);
int PointsSameSideYesNo(float plj,float pli,float p2j,float p2i,float
aj,float ai,float bj,float bi);

int read_pbm(char *fn, int *pwidth, int *pheight, int option)
{
    FILE *f = fopen(fn, "r");
    int i, x, y;
    char buf[256];

```

```

    if(f == NULL) return -1;

    do
    {
        fgets(buf, 256, f);
    } while(buf[0] == '#');

    if(buf[0] != 'P' || buf[1] != '1')
    {
        fclose(f);
        return -1;
    }

    do
    {
        fgets(buf, 256, f);
    } while(buf[0] == '#');

    sscanf(buf, "%d %d", pwidth, pheight);
    *pwidth += 2;
    *pheight += 2;
    bitmap = (unsigned char**)malloc(*pheight * sizeof(unsigned
char*));
    labelmap = (int**)malloc(*pheight * sizeof(int*));

    if(option == 1)
    {
        contourmap = (int**)malloc(*pheight * sizeof(int*));

        if(bitmap == NULL || labelmap == NULL || contourmap == NULL)
        {
            fclose(f);
            return -2;
        }
    }
    else
    {
        if(bitmap == NULL || labelmap == NULL)
        {
            fclose(f);
            return -2;
        }
    }

    for(y = 0; y < *pheight; y++)
    {
        bitmap[y] = (unsigned char*)malloc(*pwidth *
sizeof(unsigned char));
        labelmap[y] = (int*)malloc(*pwidth * sizeof(int));

        if(option == 1)
        {
            contourmap[y] = (int*)malloc(*pwidth * sizeof(int));

```

```

        if(bitmap[y] == NULL || labelmap[y] == NULL ||
contourmap[y] == NULL)
        {
            fclose(f);
            return -2;
        }
    }
    else
    {
        if(bitmap[y] == NULL || labelmap[y] == NULL)
        {
            fclose(f);
            return -2;
        }
    }

    memset(bitmap[y], 0, *pwidth);
    memset(labelmap[y], 0, *pwidth * sizeof(int));
    if(option == 1) memset(contourmap[y], 0, *pwidth *
sizeof(int));
}

for(y = 1; y <= *pheight - 2; y++)
{
    for(x = 1; x <= *pwidth - 2; x++)
    {
        fscanf(f, "%d", &i);
        bitmap[y][x] = (unsigned char)i;
    }
}

fclose(f);
return 1;
}

int write_rlt(char *fn, int cccnt, int width, int height, int option)
{
    int cnt, x, y;
    char buf[256];
    FILE *f;

    width -= 2;
    height -= 2;
    strcpy(buf, fn);
    strcat(buf, ".lab");

    if(f = fopen(buf, "wt"))
    {
        cnt = (int)log10((double)cccnt) + 2;
        sprintf(buf, "%%dd", cnt);
        // sprintf(buf, "%d ", cnt);
        fprintf(f, "P1\n", cccnt);
        fprintf(f, "#### CC# %d\n", cccnt);
    }
}

```

```

fprintf(f, "%d %d\n", width, height);

for(y = 1; y <= height; y++)
{
    for(x = 1; x <= width; x++)
    {
        if(labelmap[y][x] > 0)
        {
            fprintf(f, buf, labelmap[y][x]);
        }
        else
        {
            fprintf(f, buf, 0);
        }
    }

    fprintf(f, "\n");
}

fclose(f);
}

if(option == 1)
{
    strcpy(buf, fn);
    strcat(buf, ".ctr");

    if(f = fopen(buf, "wt"))
    {
        cnt = (int)log10((double)cccnt) + 2;
        sprintf(buf, "%%dd", cnt);
        // sprintf(buf, "%d ", cnt);
        fprintf(f, "Pl\n", cccnt);
        fprintf(f, "#### CC# %d\n", cccnt);
        fprintf(f, "%d %d\n", width, height);

        for(y = 1; y <= height; y++)
        {
            for(x = 1; x <= width; x++)
            {
                if(contourmap[y][x] > 0)
                {
                    fprintf(f, buf, contourmap[y][x]);
                }
                else
                {
                    fprintf(f, buf, 0);
                }
            }

            fprintf(f, "\n");
        }

        fclose(f);
    }
}

```

```

        }
    }

    return 1;
}

void Tracer_8(int *cy, int *cx, int *tracingdirection)
{
    int i, y, x;

    for(i = 0; i < 7; i++)
    {
        y = *cy + SearchDirection_8[*tracingdirection][0];
        x = *cx + SearchDirection_8[*tracingdirection][1];

        if(bitmap[y][x] == 0)
        {
            labelmap[y][x] = -1;
            *tracingdirection = (*tracingdirection + 1) % 8;
        }
        else
        {
            *cy = y;
            *cx = x;
            break;
        }
    }
}

void ContourTracing_8(int cy, int cx, int labelindex, int
tracingdirection, int option)
{
    char tracingstopflag = 0, SearchAgain = 1;
    int fx, fy, sx = cx, sy = cy;

    Tracer_8(&cy, &cx, &tracingdirection);
    if(option == 1) contourmap[cy][cx] = labelindex;

    if(cx != sx || cy != sy)
    {
        fx = cx;
        fy = cy;

        while(SearchAgain)
        {
            tracingdirection =
NextTracingDirection_8(tracingdirection);
            labelmap[cy][cx] = labelindex;
            Tracer_8(&cy, &cx, &tracingdirection);
            if(option == 1) contourmap[cy][cx] = labelindex;

            if(cx == sx && cy == sy)
            {
                tracingstopflag = 1;
            }
        }
    }
}

```

```

    }
    else if(tracingstopflag)
    {
        if(cx == fx && cy == fy)
        {
            SearchAgain = 0;
        }
        else
        {
            tracingstopflag = 0;
        }
    }
}
}

```

```

int ConnectedComponentLabeling_8(char *fn, int option, int *NCols, int
*NRows)

```

```

{
    int i,j,ti,tj,cond,n_count,height, width, cx, cy,
    tracingdirection, ConnectedComponentsCount = 0, labelindex = 0;
    char buf[256], str[256];
    unsigned char **temp_arr;

```

```

    if(read_pbm(fn, &width, &height, option) != 1)
    {
        return -1;
    }
    *NCols=width; *NRows=height;

```

```

/* The following code segment is added to fix a bug on June-12-06 by
SG. It removes single pixels and holes */
/* It also removes endpoints */
/*

```

```

    for(cy = 0; cy < height ; cy++)
        for(cx = 0; cx < width ; cx++){
            n_count=0;
            for(i=-1; i<=1; i++)
                for(j=-1; j<=1; j++) {
                    ti=cy+i;
                    if(ti>=0 && ti<height)
                    {
                        tj=cx+j;
                        if(tj>=0 && tj<width)
                        {
                            if(!(i==0 && j==0) && bitmap[ti][tj]>0)
                                n_count++;
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

                                if(bitmap[cy][cx]==1 && n_count<2)
bitmap[cy][cx]=0;
                                if(bitmap[cy][cx]==0 &&
n_count==8) bitmap[cy][cx]=1;
                                }
*/
/* The preceding code segment is added to fix a bug on June-12-06 by
SG. It removes single pixels and holes */
/* The following code segment is added to fix a bug on June-12-06 by
SG. It implements opening by a cross mask */
    temp_arr=alloc_img(width,height);
    for(cy = 0; cy < height ; cy++) for(cx = 0; cx < width ; cx++)
temp_arr[cy][cx]=bitmap[cy][cx];
    for(cy = 0; cy < height ; cy++)
        for(cx = 0; cx < width ; cx++){
            cond=1;
            if(bitmap[cy][cx]>0) {
                ti=cy-1;
                if(ti>=0) if(bitmap[ti][cx]>0)
                    {
                        ti=cy+1;
                        if(ti<height)
if(bitmap[ti][cx]>0)
                            {
                                tj=cx-1;
                                if(tj>=0)
if(bitmap[cy][tj]>0)
                                    {
                                        tj=cx+1;
                                        if(tj<width)
if(bitmap[cy][tj]>0)    cond=0;
                                            }
                                        }
                                    }
                                }
                            }
            if(cond==1) temp_arr[cy][cx]=0;
        }
    for(cy = 0; cy < height ; cy++) for(cx = 0; cx < width ; cx++)
bitmap[cy][cx]=temp_arr[cy][cx];
    for(cy = 0; cy < height ; cy++)
        for(cx = 0; cx < width ; cx++){
            if(temp_arr[cy][cx]>0) {
                ti=cy-1;
                if(ti>=0)
if(temp_arr[ti][cx]==0)    bitmap[ti][cx]=1;
                    ti=cy+1;
                    if(ti<height)
if(temp_arr[ti][cx]==0)    bitmap[ti][cx]=1;
                        tj=cx-1;
                        if(tj>=0)
if(temp_arr[cy][tj]==0)    bitmap[cy][tj]=1;
                            tj=cx+1;

```

```

                                if(tj<width)
if(temp_arr[cy][tj]==0)      bitmap[cy][tj]=1;
                                }

                                /*if(temp_arr[cy][cx]>0)
bitmap[cy][cx]=1;
                                else  bitmap[cy][cx]=0;*/
                                }

                                free_img(temp_arr);

/* The preceding code segment is added to fix a bug on June-12-06 by
SG. It implements opening by a cross mask */

for(cy = 1; cy < height - 1; cy++)
{
    for(cx = 1, labelindex = 0; cx < width - 1; cx++)
    {
        if(bitmap[cy][cx] == 1)// black pixel
        {
            if(labelindex != 0)// use pre-pixel label
            {
                labelmap[cy][cx] = labelindex;
            }
            else
            {
                labelindex = labelmap[cy][cx];

                if(labelindex == 0)
                {
                    labelindex =
++ConnectedComponentsCount;
                    tracingdirection = 0;
                    ContourTracing_8(cy, cx,
labelindex, tracingdirection, option);// external contour
                    labelmap[cy][cx] = labelindex;
                }
            }
        }
        else if(labelindex != 0)// white pixel optional & pre-
pixel has been labeled
        {
            if(labelmap[cy][cx] == 0)
            {
                tracingdirection = 1;
                ContourTracing_8(cy, cx - 1, labelindex,
tracingdirection, option);// internal contour
            }

            labelindex = 0;
        }
    }
}

```



```

        cx = strlen(fn);
        memcpy(buf, fn, cx - 4);
        buf[cx - 4] = '\\0';
        strcat(buf, "_8c_");
        sprintf(str, "%d", option);
        strcat(buf, str);
        // write_rlt(buf, ConnectedComponentsCount, width, height, option);
        fprintf(stderr, "CC# %d.\\n", ConnectedComponentsCount);

        return ConnectedComponentsCount;
    }

void print_results (int ConnectedComponentsCount, int feature, int width,
int height, int MIN_COMP_SIZE, int delta_ang)
{
    unsigned char **img, **imgc;
    unsigned long i, j, k, max_area=0, min_area=999999999;
    float
    *perimeters, max_per=0, min_per=999999999, compactfactor, *hist_compactness
    ;
    float *concavityratios, conc_ratio=0, conc_dev=0;
    float *compactness, compact_val=0, compact_dev=0;
    float *eccentricityvals, eccen=0, eccen_dev=0;
    float *areas, area=0, area_dev=0;
    float *compactindex, min_compact=999999999, max_compact=0, per;
    float center_i, center_j, hist_max=0;
    float
    angularity_cum=0, *angularity, angularity_mean, angularity_dev;
    int SignificantCCCount, toosmallcount=0;
    int obj_width, obj_height;
    unsigned long *leftcoor, *rightcoor, *topcoor, *bottomcoor;
    double temp_val;
    unsigned char var_UC1=0, var_UC2=0;
    FILE *fp, *fp2;

    fp=fopen("Results_Mean_Var.txt", "w");
    fp2=fopen("Results_values.txt", "w");

    areas=malloc((1+ConnectedComponentsCount)*sizeof(float));
    perimeters=malloc((1+ConnectedComponentsCount)*sizeof(float));
    compactness=malloc((1+ConnectedComponentsCount)*sizeof(float));
    concavityratios=malloc((1+ConnectedComponentsCount)*sizeof(float)
);
    eccentricityvals=malloc((1+ConnectedComponentsCount)*sizeof(float)
));
    angularity=malloc((1+ConnectedComponentsCount)*sizeof(float));

    leftcoor=malloc((1+ConnectedComponentsCount)*sizeof(long));
    rightcoor=malloc((1+ConnectedComponentsCount)*sizeof(long));
    topcoor=malloc((1+ConnectedComponentsCount)*sizeof(long));

```

```

bottomcoor=malloc((1+ConnectedComponentsCount)*sizeof(long));
hist_compactness=malloc(100*sizeof(float));
compactindex=malloc(100*sizeof(float));

for(k = 0; k <= ConnectedComponentsCount; k++)
{
    areas[k]=0; perimeters[k]=0;
    leftcoor[k]=999999999; rightcoor[k]=0;
    topcoor[k]=999999999; bottomcoor[k]=0;
}
for(i=0;i<height;i++) for(j=0;j<width;j++)
{
    k=labelmap[i][j]-1;
    if(k>=0 && k<=ConnectedComponentsCount) { areas[k]+=1;
        if(i<topcoor[k]) topcoor[k]=i;
        if(i>bottomcoor[k]) bottomcoor[k]=i;
        if(j<leftcoor[k]) leftcoor[k]=j;
        if(j>rightcoor[k]) rightcoor[k]=j;
    }

    k=contourmap[i][j]-1;
    if(k>=0 && k<=ConnectedComponentsCount) perimeters[k]+=1;
}

per=0;area=0;
for(k = 0; k < ConnectedComponentsCount; k++)
{
    temp_val=k*20/((double)ConnectedComponentsCount);
    var_UC1=temp_val;
    if (var_UC1 != var_UC2) {printf ("%d\n",var_UC1*5); var_UC2
= var_UC1;}

    if(areas[k]<MIN_COMP_SIZE)
    {
        perimeters[k]=0;areas[k]=0;compactness[k]=0;concavityratios[k]=0;
        eccentricityvals[k]=0;angularity[k]=0;
        toosmallcount++;
    }
    else {
        obj_width=rightcoor[k]-leftcoor[k];
        obj_height=bottomcoor[k]-topcoor[k];
        if(obj_width>0 && obj_height>0)
        {
            img=alloc_img(obj_width+1,obj_height+1);
            imgc=alloc_img(obj_width+1,obj_height+1);
            for(i=0;i<=obj_height;i++) for(j=0;j<=obj_width;j++) {
img[i][j]=255; imgc[i][j]=255; }

            for(i=topcoor[k] ; i<=bottomcoor[k] ; i++)
            for(j=leftcoor[k] ; j<=rightcoor[k] ; j++)
            { if(labelmap[i][j]==k+1) img[i-topcoor[k]][j-
leftcoor[k]]=0;
                if(contourmap[i][j]==k+1) imgc[i-
topcoor[k]][j-leftcoor[k]]=0;

```

```

        }
        find_center(imgc,obj_width+1,obj_height+1,&center_j,&center_i);
    }

    perimeters[k]=find_perimeter(imgc,obj_width+1,obj_height+1);
    area+=areas[k];
    per+=perimeters[k];

    if(1==feature){
        compactness[k]= perimeters[k]*perimeters[k]*1.0
        / (areas[k]*4*M_PI);
        if(compactness[k]>max_compact)    max_compact=compactness[k];
        if(compactness[k]<min_compact)    min_compact=compactness[k];
    }

    if(2==feature){
        //
        eccentricityvals[k]=find_eccentricity(img,obj_width+1,obj_height+1,center_j,center_i);

        eccentricityvals[k]=find_eccentricity2(img,obj_width+1,obj_height+1,center_j,center_i);
        eccen+=eccentricityvals[k];
    }

    if(3==feature){
        //
        concavityratios[k]=find_concavityratios_45deg(imgc,obj_width+1,obj_height+1,center_j,center_i,areas[k]);
        conc_ratio+=concavityratios[k];
    }

    if(4==feature){
        angularity[k]=find_angularity(imgc,obj_width+1,obj_height+1,center_j,center_i,areas[k],delta_ang);
        angularity_cum+=angularity[k];
    }

    //    fprintf(stderr, "eccentricity: %.2f concavity_ratio: %.2f ,
    compactness:
    %.2f\n",eccentricityvals[k],concavityratios[k],compactness[k] );

    //    img_to_pgm_file(imgc,"sil.pgm",obj_width+1,obj_height+1);
    //    show_pgm_file("sil.pgm");
    //    free_img(img);
    //    free_img(imgc);

    }
}
SignificantCCCount=ConnectedComponentsCount-toosmallcount;

```

```

/*
    for(k = 0; k < 100; k++)
    {
        hist_compactness[k]=0;
        compactindex[k]=(k/99.0)*(max_compact-min_compact)+min_compact;
    }

    hist_max=0;
    for(k = 0; k < ConnectedComponentsCount; k++)
    if (areas[k] >= MIN_COMP_SIZE)
    {
        compactfactor=100*(compactness[k]-min_compact)/(max_compact-
min_compact);
        i=(int)compactfactor;
        if(i>0 && i<100) { hist_compactness[i]+=1; if
(hist_compactness[i]>hist_max) hist_max=hist_compactness[i];}
    }

    for(k = 0; k < 100; k++)
    {
        hist_compactness[k]=hist_compactness[k]/hist_max;
//        printf(" %.2f %.8f\n",compactindex[k], hist_compactness[k]);
    }
*/

//find_mean_and_dev(areas,                ConnectedComponentsCount+1,
&area,                &area_dev);
//find_mean_and_dev(concavityratios, ConnectedComponentsCount+1,
&conc_ratio, &conc_dev);
//find_mean_and_dev(compactness,                ConnectedComponentsCount+1,
&compact_val, &compact_dev);
//find_mean_and_dev(eccentricityvals, ConnectedComponentsCount+1,
&eccen,                &eccen_dev);

fprintf(fp2,"%d\n",SignificantCCCount);

if (9==feature) { find_mean_and_dev(areas,
SignificantCCCount, &area,                &area_dev);
    fprintf(fp,"AREA \nMEAN:%.6f    DEV:%.6f\nCOUNT:%d    SIGNIFICANT
COUNT:%d\n",

area,area_dev,ConnectedComponentsCount,SignificantCCCount);
    for (k=0;k<ConnectedComponentsCount;k++) if(areas[k]>0)
fprintf(fp2,"%d ",(int)areas[k]); }
if (1==feature) { find_mean_and_dev(compactness,
SignificantCCCount, &compact_val, &compact_dev);
    fprintf(fp,"COMPACTNESS \nMEAN:%.6f    DEV:%.6f\nCOUNT:%d
SIGNIFICANT COUNT:%d\n",

compact_val,compact_dev,ConnectedComponentsCount,SignificantCCCount);
    for (k=0;k<ConnectedComponentsCount;k++) if(areas[k]>0)
fprintf(fp2,"%%.6f ",compactness[k]); }

```

```

if (2==feature) { find_mean_and_dev(eccentricityvals,
SignificantCCCCount, &eccen, &eccen_dev);
    fprintf(fp, "ECCENTRICITY-ELONGATDNESS \nMEAN:%.6f
DEV:%.6f\nCOUNT:%d SIGNIFICANT COUNT:%d\n",

eccen, eccen_dev, ConnectedComponentsCount, SignificantCCCCount);
    for (k=0; k<ConnectedComponentsCount; k++) if (areas[k]>0)
fprintf(fp2, "%.6f ", eccentricityvals[k]); }
if (3==feature) { find_mean_and_dev(concavityratios,
SignificantCCCCount, &conc_ratio, &conc_dev);
    fprintf(fp, "CONCAVITY_RATIO \nMEAN:%.6f DEV:%.6f\nCOUNT:%d
SIGNIFICANT COUNT:%d\n",

conc_ratio, conc_dev, ConnectedComponentsCount, SignificantCCCCount);
    for (k=0; k<ConnectedComponentsCount; k++) if (areas[k]>0)
fprintf(fp2, "%.6f ", concavityratios[k]); }
if (4==feature) { find_mean_and_dev(angularity, SignificantCCCCount,
&angularity_mean, &angularity_dev);
    fprintf(fp, "ANGULARITY \nMEAN:%.6f DEV:%.6f\nCOUNT:%d SIGNIFICANT
COUNT:%d\n",

angularity_mean, angularity_dev, ConnectedComponentsCount, SignificantCCCCount);
    for (k=0; k<ConnectedComponentsCount; k++) if (areas[k]>0)
fprintf(fp2, "%.6f ", angularity[k]); }

fprintf(stderr, "Count:%d Significant
Count:%d\n", ConnectedComponentsCount, SignificantCCCCount);
//fprintf(stderr, "Average compactness Eccentricity
RatioToConcaveArea\n");
//printf(" %.6f %.6f
%.6f\n", per*per*1.0/(SignificantCCCCount*area*4*M_PI), eccen/SignificantCCCCount, conc_ratio/SignificantCCCCount);
fprintf(stderr, "Mean area : Area deviation : Mean compactness :
Compactness dev : Eccentricity : Eccen dev : \
RatioToConcaveArea : RatioToCon dev\n");
fprintf(stderr, " [%.6f, %.6f, %.6f, %.6f, %.6f, %.6f, %.6f,
%.6f]\n", area, area_dev, compact_val, compact_dev, eccen, eccen_dev, conc_ratio, conc_dev);

    free(areas);
    free(perimeters);
    free(compactness);
    free(eccentricityvals);
    free(angularity);
    free(concavityratios);
    free(compactindex);
    free(leftcoor);
    free(rightcoor);
    free(topcoor);
    free(bottomcoor);

```

```

        free(hist_compactness);

fclose(fp);
fclose(fp2);

}

void freearrays(int height, int option)
{
    int i;
    for(i = 0; i < height; i++)
    {
        free(bitmap[i]);
        free(labelmap[i]);

        if(option == 1)
        {
            free(contourmap[i]);
        }
    }

    free(bitmap);
    free(labelmap);

    if(option == 1)
    {
        free(contourmap);
    }
}

void find_mean_and_dev(float *arr, int size, float *mean, float *dev)
{
    int i;
    float count=0, newsize=0;

    /*
    for (i=0; i<size; i++)
    {
        if(arr[i]==0) newsize--;
        else count+=arr[i];
    }
    if(newsize>0) *mean=count/newsize;

    count=0;
    for (i=0; i<size; i++)
    {
        if(arr[i]==0) newsize--;
        else count+=pow((arr[i]- *mean),2);
    }
    if(newsize>0) *dev=sqrt(count/newsize);

```

```

*/
fprintf(stderr, "\n ----- \n");
for (i=0; i<size; i++)
{
// fprintf(stderr, "[%.3f] ", arr[i]);
if(arr[i]>0.001) { count+=arr[i]; newsize=newsize+1.0; }
}

if(newsize>0) *mean=count/newsize;    else *mean=0;

count=0;
for (i=0; i<size; i++)
{
if(arr[i]>0.001) count+=pow((arr[i]- *mean),2);
}
if(newsize>0) *dev=sqrt(((float)count)/newsize); else *dev=0;

}

float find_concavityratios(unsigned char **img,int width,int
height,float center_j,float center_i,float area)
{
int i,j,k,l,m,n,flag=1;
unsigned long newcount=0;
unsigned char check,**img1,**img2;
img1=alloc_img(width,height);
img2=alloc_img(width,height);
// img_to_pgm_file(img,"sil.pgm",width,height);
// show_pgm_file("sil.pgm");

for(i=0;i<height;i++) for(j=0;j<width;j++) {img1[i][j]=img[i][j];
img2[i][j]=img[i][j];}

for(i=0;i<height;i++) for(j=0;j<width;j++)
if(img1[i][j]==0)
{
for(k=0;k<height;k++) for(l=0;l<width;l++)
if(img1[k][l]==0 && (k!=i || l!=j))
{
for(m=0;m<height;m++) for(n=0;n<width;n++)
if(img2[m][n]!=0 && (m!=i || n!=j) && (m!=k || n!=l))

if(PointInTriangleYesNo((float)n,(float)m,(float)l,(float)k,(float)j,(float)i,center_j,center_i))
{
img2[m][n]=0;
}

}

img1[i][j]=128;
}

for(i=0;i<height;i++) for(j=0;j<width;j++) {if (img2[i][j]==0)
newcount++;}
// img_to_pgm_file(img2,"sil.pgm",width,height);

```

```

//      show_pgm_file("sil.pgm");

        free_img(img1);
        free_img(img2);
return((float)newcount/area);
}

int PointInTriangleYesNo(float plj,float pli,float aj,float ai,float
bj,float bi, float cj,float ci)
{
/* Based on http://www.blackpawn.com/texts/pointinpoly/default.html */

if(fabs(ai*(bj-cj)+bi*(cj-aj)+ci*(aj-bj))<0.1) return(0);
/* Collinearity check from
http://mathworld.wolfram.com/Collinear.html*/
if(PointsSameSideYesNo(plj,pli,aj,ai,bj,bi,cj,ci) &&
    PointsSameSideYesNo(plj,pli,bj,bi,aj,ai,cj,ci) &&
    PointsSameSideYesNo(plj,pli,cj,ci,aj,ai,bj,bi) ) return(1);
else return(0);
}

int PointsSameSideYesNo(float plj,float pli,float p2j,float p2i,float
aj,float ai,float bj,float bi)
{
float x,y;
/* Based on http://www.blackpawn.com/texts/pointinpoly/default.html */
x=(bi-ai)*(plj-aj)-(bj-aj)*(pli-ai);
y=(bi-ai)*(p2j-aj)-(bj-aj)*(p2i-ai);
if (x*y>=0) return(1);
else return (0);
}

float find_concavityratios45deg(unsigned char **img,int width,int
height)
{
int i,j,flag=1,count;
unsigned char check,**img1,**img2;
img1=alloc_img(width,height);
img2=alloc_img(width,height);
    img_to_pgm_file(img,"sil.pgm",width,height);
    show_pgm_file("sil.pgm");

for(i=0;i<height;i++) for(j=0;j<width;j++) {img1[i][j]=img[i][j];
img2[i][j]=img[i][j];}

while (flag==1)
{
count=0;
for(i=0;i<height;i++) for(j=0;j<width;j++) {
check=0;
if(i>0 && j>0)                if(img1[i-1][j-1]==0) check=check | (1<<0);
if(i>0)                        if(img1[i-1][j]==0)   check=check | (1<<1);
if(i>0 && j<width-1)          if(img1[i-1][j+1]==0) check=check | (1<<2);

```



```

if(j<width-1)          if(img1[i][j+1]==0)    check=check | (1<<3);
if(i<height-1 && j<width-1) if(img1[i+1][j+1]==0) check=check | (1<<4);
if(i<height-1)          if(img1[i+1][j]==0)    check=check | (1<<5);
if(i<height-1 && j>0)      if(img1[i+1][j-1]==0) check=check | (1<<6);
if(j>0)                  if(img1[i][j-1]==0)    check=check | (1<<7);

if(img2[i][j]!=0)
if((check&240)==240 || (check&120)==120 || (check&60)==60
|| (check&30)==30 ||
   (check&15)==15
|| (check&135)==135 || (check&195)==195 || (check&225)==225)
{ img2[i][j]=0; count+=1; }
}

for(i=0;i<height;i++) for(j=0;j<width;j++) img1[i][j]=img2[i][j];
if(count==0) flag=0;

}

img_to_pgm_file(img1,"sil.pgm",width,height);
show_pgm_file("sil.pgm");

free_img(img1);
free_img(img2);
}

float find_angularity(unsigned char **img,int width,int height,float
center_j,float center_i,
                        float area,int delta_ang)
{
/* img here is the 1 pixel wide border image */
int i,j,flag=1,count,theta_int,temp;
float
theta_indeg,angle_hist[360],angle_hist_interpolated[360],radius,tot,max
rad=0,angularity,angularity_sum=0;
unsigned char **img1;

/*
img1=alloc_img(360,360);
img_to_pgm_file(img,"sil.pgm",width,height);
show_pgm_file("sil.pgm");
*/

for(i=0;i<360;i++) { angle_hist[i]=0;angle_hist_interpolated[i]=0;}

for(i=0;i<height;i++)
for(j=0;j<width;j++)
if(img[i][j]==0) /* foreground pixel */
{
radius=sqrt(pow((i-center_i),2)+pow((j-center_j),2));
if(maxrad<radius) maxrad=radius;
theta_indeg=(atan2((i-center_i),(j-center_j))+M_PI)*180.0/M_PI;
theta_int=(int)theta_indeg;
if(theta_int<360 && theta_int>=0) {
if(angle_hist[theta_int]<1) angle_hist[theta_int]=radius;

```

```

        else angle_hist[theta_int]=0.5*(radius+angle_hist[theta_int]);
    }
}

for(i=0;i<360;i++) { angle_hist_interpolated[i]=angle_hist[i];}

for(i=0;i<360;i++) { flag=1;j=i;
    if (angle_hist_interpolated[i]==0)
        while (flag ==1) {
            j=(j+1)%360;
            if (angle_hist[j]!=0) {
angle_hist_interpolated[i]=angle_hist[j]; flag=0; }
            }
        }

for(i=0;i<360;i++) {
if(0!=angle_hist_interpolated[i])
angularity_sum+= fabs(angle_hist_interpolated[i]-
angle_hist_interpolated[(i+delta_ang)%360])/angle_hist_interpolated[i];
}

//angularity=angularity_sum/360.0;
angularity=angularity_sum;

/*
for(j=0;j<360;j++)
for(i=0;i<360;i++)
{
temp=(int) (359.0*angle_hist[j]/maxrad);
if(i<temp) img1[359-i][j]=0; else img1[359-i][j]=255; }

img_to_pgm_file(img1,"sil.pgm",360,360);
show_pgm_file("sil.pgm");

for(j=0;j<360;j++)
for(i=0;i<360;i++)
{
temp=(int) (359.0*angle_hist_interpolated[j]/maxrad);
if(i<temp) img1[359-i][j]=0; else img1[359-i][j]=255; }

img_to_pgm_file(img1,"sil.pgm",360,360);
show_pgm_file("sil.pgm");

free_img(img1);
*/
return (angularity);
}

float find_eccentricity(unsigned char **img, int width, int
height,float center_j,float center_i)
{
int i,j;
float m11,m20,m02,val,denom,term1,term2;
long count=0,m11count=0,m20count=0,m02count=0;

```

```

for(i=0;i<height;i++)
    for(j=0;j<width;j++)
        if(img[i][j]==0)
        {
            count++;
            m11count+=(i-center_i)*(j-center_j);
            m20count+=pow((i-center_i),2);
            m02count+=pow((j-center_j),2);
        }

if(count ==0) return(0);

m11=(float)m11count/count;
m20=(float)m20count/count;
m02=(float)m02count/count;

term1=m20+m02;

term2=sqrt(pow((m20-m02),2)+4*pow(m11,2));

//printf("%d %d %d %.6f %.6f %.6f %.6f %.6f %.2f\n",count,width,height,m11,m20,m02,term1,term2,center_i,center_j);

denom=(float)(term1);
if (denom!=0) val=(term2/term1);
    else val=1;
return(val);

/* Alternative elongation measure:
term2=2*count*count*sqrt(4*m11*m11+pow((m20-m02),2));
if (term1!=0) val=term2/term1;
    else val=0;
return(val);
*/
}

float find_eccentricity2(unsigned char **img, int width, int height,float center_j,float center_i)
{
    int i,j;
    float m11,m20,m02,val,denom,term1,term2;
    long count=0,m11count=0,m20count=0,m02count=0;

    for(i=0;i<height;i++)
        for(j=0;j<width;j++)
            if(img[i][j]==0)
            {
                count++;
                m11count+=(i-center_i)*(j-center_j);
                m20count+=pow((i-center_i),2);
                m02count+=pow((j-center_j),2);
            }

```

```

if(count ==0) return(0);

m11=(float)m11count/count;
m20=(float)m20count/count;
m02=(float)m02count/count;

term1=pow((m20+m02),2);
term2=pow((m20-m02),2)+4*pow(m11,2);

denom=(float)(term1);
if (denom!=0) val=(term2/term1);
    else val=1;
return(val);

}

void find_center(unsigned char **img,int width,int height,float
*center_j,float *center_i)
{
int i,j;
unsigned long sumi=0,sumj=0;
float count=0;

for(i=0;i<height;i++)
    for(j=0;j<width;j++)
        if(img[i][j]==0) {count+=1,sumi+=i,sumj+=j;} /* if foreground */

*center_j=sumj/count;
*center_i=sumi/count;
}

float find_perimeter(unsigned char **img, int width, int height)
{
int i,j,k,l,ni,nj;
float sqrt2,per=0;
unsigned char **img1;
img1=alloc_img(width,height);

for (i=0;i<height;i++) for (j=0;j<width;j++) img1[i][j]=img[i][j];
sqrt2=sqrt(2.0);
for (i=0;i<height;i++)
    for (j=0;j<width;j++){
        if (img1[i][j]==0) { /* if foreground */

            for (k=-1;k<=1;k++)
                for (l=-1;l<=1;l++) {

                    ni=i+k; nj=j+l;
                    if((ni!=i || nj!=j) && (ni>=0) && (ni<height) && (nj>=0) &&
(nj<width))
                        if (img1[ni][nj]==0) /* if foreground */

```

```

        {
            if (k==0 || l==0) per+=1.0;
            else per+=sqrt2;
        }
        img1[i][j]=128;

    }
}

free_img(img1);
return(per);
}

int main(int argc, char* argv[])
{
    int NC, NR, count, option, feature, minsize, delta_ang;
    char *opt, *pbm_file;

    if(argc == 5) {
        feature=atoi(argv[1]);
        pbm_file=argv[2];
        minsize=atoi(argv[3]);
        delta_ang=atoi(argv[4]);
    }
    else { printf("Usage:  Progame feature pbmfile minsize
delta_ang \n"); exit (-1); }

    option=1;  // also implements contour detection

    count=ConnectedComponentLabeling_8(pbm_file, option, &NC, &NR);

    print_results(count, feature, NC, NR, minsize, delta_ang);

    freearrays(NR, option);
}

```

**EK B - FARKLI GEOMETRİK ÖZELLİKLERDEKİ
AGREGALAR İÇİN KANONİK DİSKRİMİNAT
FONKSİYONU ANALİZİ**

GET TRANSLATE

FILE='C:\Program Files\MATLAB\R2006a\work\neural\makalefeatures.wk1'
/TYPE=WK /MAP .

Data written to the working file.

19 variables and 237 cases written.

Variable: A	Type: Number	Format: F9.1
Variable: B	Type: Number	Format: F9.1
Variable: C	Type: Number	Format: F9.1
Variable: D	Type: Number	Format: F9.1
Variable: E	Type: Number	Format: F9.1
Variable: F	Type: Number	Format: F9.1
Variable: G	Type: Number	Format: F9.1
Variable: H	Type: Number	Format: F9.1
Variable: I	Type: Number	Format: F9.1
Variable: J	Type: Number	Format: F9.1
Variable: K	Type: Number	Format: F9.1
Variable: L	Type: Number	Format: F9.1
Variable: M	Type: Number	Format: F9.1
Variable: N	Type: Number	Format: F9.1
Variable: O	Type: Number	Format: F9.1
Variable: P	Type: Number	Format: F9.1
Variable: Q	Type: Number	Format: F9.1
Variable: R	Type: Number	Format: F9.1
Variable: S	Type: Number	Format: F9.1

DATASET NAME DataSet1 WINDOW=FRONT.

DISCRIMINANT

/GROUPS=A(1 5)

/VARIABLES=B C D E F G H I J K L M N O P Q R S

/ANALYSIS ALL

/PRIORS EQUAL

/STATISTICS=COEFF TABLE CROSSVALID

/PLOT=CASES

/CLASSIFY=NONMISSING POOLED.

Discriminant

Notes		
Output Created		25.Ara.2007 10:25:34
Comments		
Input	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	237
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values are treated as missing in the analysis phase.
	Cases Used	In the analysis phase, cases with no user- or system-missing values for any predictor variable are used. Cases with user-, system-missing, or out-of-range values for the grouping variable are always excluded.
Syntax		DISCRIMINANT /GROUPS=A(1 5) /VARIABLES=B C D E F G H I J K L M N O P Q R S /ANALYSIS ALL /PRIORS EQUAL /STATISTICS=COEFF TABLE CROSSVALID /PLOT=CASES /CLASSIFY=NONMISSING POOLED.
Resources	Processor Time	00:00:00,109
	Elapsed Time	00:00:00,140

[DataSet1]

Analysis Case Processing Summary		
Unweighted Cases		Percent
Valid		100,0
Excluded	Missing or out-of-range group codes	0,0
	At least one missing discriminating variable	0,0
	Both missing or out-of-range group codes and at least one missing discriminating variable	0,0
	Total	0,0
Total		100,0

Group Statistics			
A		Valid N (listwise)	
		Unweighted	Weighted
1	B	48	48,000
	C	48	48,000
	D	48	48,000
	E	48	48,000
	F	48	48,000
	G	48	48,000
	H	48	48,000
	I	48	48,000
	J	48	48,000
	K	48	48,000
	L	48	48,000
	M	48	48,000
	N	48	48,000
	O	48	48,000
	P	48	48,000
	Q	48	48,000

	R	48	48,000
	S	48	48,000
2	B	51	51,000
	C	51	51,000
	D	51	51,000
	E	51	51,000
	F	51	51,000
	G	51	51,000
	H	51	51,000
	I	51	51,000
	J	51	51,000
	K	51	51,000
	L	51	51,000
	M	51	51,000
	N	51	51,000
	O	51	51,000
	P	51	51,000
	Q	51	51,000
	R	51	51,000
	S	51	51,000
3	B	17	17,000
	C	17	17,000
	D	17	17,000
	E	17	17,000
	F	17	17,000
	G	17	17,000
	H	17	17,000
	I	17	17,000
	J	17	17,000
	K	17	17,000
	L	17	17,000
	M	17	17,000
	N	17	17,000

	O	17	17,000
	P	17	17,000
	Q	17	17,000
	R	17	17,000
	S	17	17,000
4	B	48	48,000
	C	48	48,000
	D	48	48,000
	E	48	48,000
	F	48	48,000
	G	48	48,000
	H	48	48,000
	I	48	48,000
	J	48	48,000
	K	48	48,000
	L	48	48,000
	M	48	48,000
	N	48	48,000
	O	48	48,000
	P	48	48,000
	Q	48	48,000
	R	48	48,000
	S	48	48,000
5	B	73	73,000
	C	73	73,000
	D	73	73,000
	E	73	73,000
	F	73	73,000
	G	73	73,000
	H	73	73,000
	I	73	73,000
	J	73	73,000
	K	73	73,000

	L	73	73,000
	M	73	73,000
	N	73	73,000
	O	73	73,000
	P	73	73,000
	Q	73	73,000
	R	73	73,000
	S	73	73,000
Total	B	237	237,000
	C	237	237,000
	D	237	237,000
	E	237	237,000
	F	237	237,000
	G	237	237,000
	H	237	237,000
	I	237	237,000
	J	237	237,000
	K	237	237,000
	L	237	237,000
	M	237	237,000
	N	237	237,000
	O	237	237,000
	P	237	237,000
	Q	237	237,000
	R	237	237,000
	S	237	237,000

Analysis 1

Variables Failing Tolerance Test ^a			
	Within-Groups Variance	Tolerance	Minimum Tolerance
E	,001	,000	,000
G	6,740E-6	,000	,000
I	,000	,000	,000
N	,000	,000	,000
Q	5,544E-10	,004	,000
R	2,761E-9	,000	,000
All variables passing the tolerance criteria are entered simultaneously.			
a. Minimum tolerance level is ,001.			

Summary of Canonical Discriminant Functions

Eigenvalues				
Function	Eigenvalue	% of Variance	Cumulative %	Canonical Correlation
1	1741,566 ^a	98,4	98,4	1,000
2	26,677 ^a	1,5	99,9	,982
3	,874 ^a	,0	100,0	,683
4	,343 ^a	,0	100,0	,505
a. First 4 canonical discriminant functions were used in the analysis.				
Wilks' Lambda				
Test of Function(s)	Wilks' Lambda	Chi-square	df	Sig.
1 through 4	,000	2663,209	48	,000
2 through 4	,014	965,350	33	,000
3 through 4	,397	209,914	20	,000
4	,745	67,010	9	,000

Standardized Canonical Discriminant Function Coefficients

	Function			
	1	2	3	4
B	,913	-,534	,762	-,005
C	-,116	-,911	-,318	1,813
D	,001	,000	-,438	,434
F	1,837	-,276	1,555	-1,983
H	-1,927	1,330	-1,500	,076
J	-,033	,265	-,221	-,582
K	2,776	1,386	,078	1,335
L	,662	-1,118	-,431	1,151
M	,456	,220	-,521	-,392
O	-1,481	1,996	,585	-,870
P	2,946	1,381	,124	1,242
S	,007	,057	,415	-,599

Structure Matrix				
	Function			
	1	2	3	4
L	-,634*	,132	,089	,329
Q ^a	,620*	,428	,250	,247
O	-,513*	,468	,185	,208
P	,249*	,097	,044	-,099
R ^a	,249*	,097	,044	-,099
M	,007	,185	-,580*	-,158
N ^a	,007	,185	-,580*	-,158
S	,004	-,173	,567*	-,324
E ^a	-,002	,236	-,450*	,025
D	-,002	,236	-,450*	,025
C	-,007	,016	,224*	-,150
J	-,029	,121	-,193	-,553*
K	-,024	,056	,041	,185*
F	-,004	,015	,133	-,184*
B	-,002	-,002	,056	,139*
I ^a	,001	,001	-,052	-,131*
G ^a	,001	,001	-,052	-,131*
H	,002	-,033	,023	-,061*
Pooled within-groups correlations between discriminating variables and standardized canonical discriminant functions Variables ordered by absolute size of correlation within function.				
*. Largest absolute correlation between each variable and any discriminant function				
a. This variable not used in the analysis.				

Functions at Group Centroids				
A	Function			
	1	2	3	4
1	-47,827	,039	-,819	-,780
2	-49,109	-1,227	,743	,716
3	41,961	-7,531	-2,470	,935
4	40,192	-6,251	,899	-,429
5	29,558	6,696	,003	,076
Unstandardized canonical discriminant functions evaluated at group means				

Classification Statistics

Classification Processing Summary		
Processed		237
Excluded	Missing or out-of-range group codes	0
	At least one missing discriminating variable	0
Used in Output		237

Prior Probabilities for Groups			
A	Prior	Cases Used in Analysis	
		Unweighted	Weighted
1	,200	48	48,000
2	,200	51	51,000
3	,200	17	17,000
4	,200	48	48,000
5	,200	73	73,000
Total	1,000	237	237,000

Classification Function Coefficients					
	A				
	1	2	3	4	5
B	9,973E6	9,973E6	9,979E6	9,979E6	9,978E6
C	-7,518E6	-7,517E6	-7,518E6	-7,518E6	-7,518E6
D	-1,939E6	-1,939E6	-1,939E6	-1,939E6	-1,939E6
F	2,731E7	2,731E7	2,732E7	2,732E7	2,731E7
H	-3,585E8	-3,585E8	-3,588E8	-3,588E8	-3,587E8
J	2,933E3	2,932E3	2,931E3	2,931E3	2,932E3
K	1,328E10	1,328E10	1,328E10	1,328E10	1,328E10
L	1,093E8	1,093E8	1,093E8	1,093E8	1,093E8
M	8,367E6	8,367E6	8,370E6	8,369E6	8,369E6
O	-4,120E7	-4,120E7	-4,123E7	-4,122E7	-4,122E7
P	8,018E10	8,018E10	8,021E10	8,021E10	8,021E10
S	2,557E3	2,557E3	2,556E3	2,557E3	2,557E3
(Constant)	-1,244E10	-1,244E10	-1,245E10	-1,245E10	-1,244E10
Fisher's linear discriminant functions					

Classification Results ^{b,c}								
		A	Predicted Group Membership					Total
			1	2	3	4	5	
Original	Count	1	46	2	0	0	0	48
		2	5	46	0	0	0	51
		3	0	0	17	0	0	17
		4	0	0	2	46	0	48
		5	0	0	0	0	73	73
	%	1	95,8	4,2	,0	,0	,0	100,0
		2	9,8	90,2	,0	,0	,0	100,0
		3	,0	,0	100,0	,0	,0	100,0
		4	,0	,0	4,2	95,8	,0	100,0
		5	,0	,0	,0	,0	100,0	100,0
Cross-validated ^a	Count	1	46	2	0	0	0	48
		2	7	44	0	0	0	51
		3	0	0	17	0	0	17
		4	0	0	2	46	0	48
		5	0	0	0	0	73	73
	%	1	95,8	4,2	,0	,0	,0	100,0
		2	13,7	86,3	,0	,0	,0	100,0
		3	,0	,0	100,0	,0	,0	100,0
		4	,0	,0	4,2	95,8	,0	100,0
		5	,0	,0	,0	,0	100,0	100,0
a. Cross validation is done only for those cases in the analysis. In cross validation, each case is classified by the functions derived from all cases other than that case.								
b. 96,2% of original grouped cases correctly classified.								
c. 95,4% of cross-validated grouped cases correctly classified.								