



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



DOKTORA TEZİ

**İSTANBUL AVRUPA YAKASI AGREGA OCAKLARINDA AÇIĞA ÇIKAN
KUMTAŞI-ŞEYL ARTIKLARININ GENLEŞTİRİLMİŞ KİL AGREGASI
OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ**

Erdi AVCI

DANIŞMAN
Prof. Dr. Atiye TUĞRUL

II. DANIŞMAN
Prof. Dr. Abdulkerim YÖRÜKOĞLU

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeoloji Mühendisliği Programı

Ağustos, 2022



Değerli eşim Şükriye YILDIZ AVCI ve ailemizin yeni üyesi oğlum Doğu AVCI'ya

BÜTÇE DESTEKLERİ

İstanbul Avrupa Yakası Agregatör Ocaklarında Açığa Çıkan Kumtaşı-Şeyl Artıklarının Genleştirilmiş Kil Agregatörü Olarak Değerlendirilmesi

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.



TEŞEKKÜR

Doktora eğitim hayatım boyunca bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren, her daim desteklerini eksik etmeyen, birlikte çalışmaktan onur duyduğum değerli tez danışmanlarım Prof. Dr. Atiye TUĞRUL ve Prof. Dr. Abdulkerim YÖRÜKOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen, bana daimi yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. İbrahim UYSAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezin hazırlanması sürecinde katkılarıyla destek veren değerleri hocalarım Doç. Dr. Kenan ÇİNKU, Doç. Dr. Namık AYSAL ve Doç. Dr. Cem KAHRUMAN'a çok teşekkür ederim.

Tez kapsamında elde edilen verilerin analizlerini gerçekleştiren Çin Bilimler Akademisi Jeoloji ve Jeofizik Enstitüsü öğretim üyesi Prof. Dr. Ben-Xun Su, Ersin KAYGISIZ ve Ulusal Bor Enstitüsü mühendisleri ile çalışanlarına teşekkür ederim.

Deneylein yapılması aşamasında yol gösterip yardımcı olan Dr. Öğr. Ü. Selman Er'e, laboratuvar çalışmalarında yardımcı olan Araş. Gör. Murat BEREN, Jeo. Yük. Müh. Levent KUŞ'a ve artık numunelerinin temin edilmesi hususunda yardımlarını eksik etmeyen Maden Mühendisi Birol BOZKURT'a çok teşekkür ederim.

Numunelerin belirli boyut ve şekillerde hazırlanması için gerekli kalıpların üretimi ve blok modellerin tasarımı aşamasında yardımlarını esirgemeyen Elektrik-Elektronik Mühendisi Kemal ÇOLAK'a çok teşekkür ederim.

Desteklerini her daim yanımda hissettiğim değerli aileme ve özellikle eşim Dr. Şükriye YILDIZ AVCI'ya ne kadar teşekkür etsem azdır.

Ağustos 2022

Erdi AVCI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI.....	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ.....	xi
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. ÇALIŞMANIN AMACI.....	1
1.2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ	3
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	13
2.1. GENLEŞTİRİLMİŞ KİL AGREGALARI İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	13
2.2. MİNERALLERİN TERMAL VE KIZILÖTESİ SPEKTROMETRESİ ÖZELLİKLERİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	18
3. YÖNTEM	21
3.1. ANALİZ YÖNTEMLERİ VE KOŞULLARI.....	21
3.2. HAM VE BELİRLİ SICAKLIKLARA MARUZ BIRAKILAN ARTIKLARDA GERÇEKLEŞTİRİLEN ANALİZLER	22
3.3. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI, GENLEŞTİRME KOŞULLARI VE GENLEŞME ORANLARININ SAPTANMASI.....	24
3.3.1. Numunelerin Hazırlanması ve Genleştirme Koşulları	24
3.3.2. Genleştirilecek Numunelerin Boyut ve Sürelerinin Belirlenmesi.....	26
3.3.3. Artık Numunelerinin Genleşme Oranlarının Saptanması	33
3.3.4. Genleştirilen Numunelerin Yenilme Yüklerinin Saptanması	34
4. BULGULAR	37

4.1. ARTIKLARIN SICAKLIĞA MARUZ BIRAKILMADAN ÖNCEKİ ÖZELLİKLERİ	37
4.1.1. Artıkların Mineralojik Bileşimi.....	37
4.1.2. Artıkların Jeokimyası	39
4.1.3. Artıkların Dane Boyutları.....	39
4.1.4. Artıkların Termal Özellikleri	40
4.1.5. Artıkların FTIR Analizleri	40
4.2. ARTIKLARIN FARKLI SICAKLIKLARA MARUZ BIRAKILDIKTAN SONRAKİ ÖZELLİKLERİ.....	43
4.2.1. Artıkların Mineralojik Bileşimindeki Değişimler	43
4.2.2. Artıklardaki Minerallerin Bünyesinde Bulunan OH ⁻ Moleküllerinin Farklı Sıcaklıklardaki Davranışları	47
4.2.3. Artıkların Genleşme Oranları.....	48
4.3. GENLEŞTİRİLEN ARTIKLARIN FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERİ	52
4.3.1. Küçük Boy (Ø=1,45 cm) Agregaların Fiziksel Özellikleri	52
4.3.2. Büyük Boy (Ø=1,6 cm) Agregaların Fiziksel Özellikleri	60
4.3.3. Küçük Boy (Ø=1,45 cm) Agregaların Mekanik Özellikleri	67
4.3.4. Büyük Boy (Ø=1,6 cm) Agregaların Mekanik Özellikleri	67
5. TARTIŞMA.....	70
5.1. DEHİDROKSİLASYON REAKSİYONLARININ GENLEŞMEYE ETKİLERİ.....	70
5.2. HAM MADDE ÖZELLİKLERİNİN GENLEŞMEYE ETKİLERİ.....	72
5.3. ÜRETİLEN AGREGALARIN MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI İÇİN UYGUNLUKLARI	73
5.4. BOŞLUK BOYUTU VE DAĞILIMININ FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ.....	78
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR.....	83
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI	89
ETİK KURUL İZİN YAZISI	90
KURUM İZİN YAZILARI.....	91
ÖZGEÇMİŞ	92

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Agregat ocaklarının havadan alınmış görüntüleri.	4
Şekil 1.2: Trakya Formasyonu grovak ve şeylleri arasında kalınlıkları 0,2-1,5 m arasında değişen, ince-orta ve yer yer kalın tabakalı çakıltası-kumtaşı seviyeleri (Tuğrul ve diğ., 2018).	5
Şekil 1.3:Trakya Formasyonu içerisinde bulunan blok boyutunda grovak, şeyl ve metamorfik kaya parçaları içeren çakıltası seviyesi (Tuğrul ve diğ., 2018).	5
Şekil 1.4: Cebeci Maden Bölgesinin kuzeyindeki ocaklarda görülen içerisinde ince–orta tabakalı şeyl düzeyleri ile ardalanmalı grovaklar (Tuğrul ve diğ., 2018).....	6
Şekil 1.5: Cebeci Maden Bölgesi kuzeyindeki ocaklarda görülen yeşilimsi kahve, boz ayrışma renkli grovak ve şeyller (Tuğrul ve diğ., 2018).....	6
Şekil 1.6: Cebeci Maden Bölgesi güneyindeki ruhsat sahalarında görülen fay düzlemlerinin etkisiyle ikincil olarak gelişmiş dolomitik kireçtaşları (Tuğrul ve diğ., 2018).	7
Şekil 1.7: Cebeci Maden Bölgesinde gözlenen Cebeciköy kireçtaşı üyesi ve bu birimle tektonik donaklı kumtaşı–şeyl birimleri.....	8
Şekil 1.8: İnceleme alanının genelleştirilmiş stratigrafik sütun kesiti (Gözübol ve Aysal, 2008).	9
Şekil 1.9: Genleştirilmiş kil agregalarının bazı kullanım alanları (Boudaghpour ve Hashemi, 2008'den değiştirilmiştir).....	12
Şekil 3.1: Artık numunelerine gerçekleştirilen analiz ve deneyler (ölçekler 1 cm'dir).	23
Şekil 3.2: Artıkların 600 °C'de ön ısıtma yapıldıktan sonra genleşmeye tabi tutulmuş görüntüleri.	24
Şekil 3.3: Ekstrüder cihazı ile şekillendirilen ve sonrasında genleştirilen silindirik numune.	25
Şekil 3.4: El ile şekillendirilen numuneler ve onların genleştirilmiş halleri.....	26
Şekil 3.5: Artıkların farklı boyut ve sürelerde genleştirilmesi, a: AR*, b: CN, c: CB*.....	27
Şekil 3.6: Farklı boyutlarda hazırlanan CB*, CN, AR* numunelerinin farklı sürelerdeki genleşmeleriyle elde edilen birim ağırlık ve yenilme yükleri.	31
Şekil 3.7: Genleştirilen numunelerin yenilme yüklerinin belirlendiği pres makinesi.....	35

Şekil 4.1. Ham artıkların XRD analiz sonuçları.....	38
Şekil 4.2: Artıkların DTA ve TG grafikleri, a: Cebeci agrega ocakları artıkları, b: Cendere agrega ocakları artıkları, c: Arnavutköy agrega ocakları artıkları.....	41
Şekil 4.3: Artıkların FTIR analiz grafikleri.....	42
Şekil 4.4: CB, CN, AR numunelerinin 560-600 °C aralığında ısıtıldıktan sonraki mineralojik bileşimleri.....	44
Şekil 4.5: CB, CN, AR numunelerinin 775-800 °C aralığında ısıtıldıktan sonraki mineralojik bileşimleri.....	45
Şekil 4.6: CB, CN, AR numunelerinin 1130-1140 °C aralığında ısıtıldıktan sonraki mineralojik bileşimleri.....	46
Şekil 4.7: 560-600 °C aralığında iki saat bekletilen CB, CN, AR artıklarının FTIR grafikleri.....	47
Şekil 4.8: 775-800 °C aralığında iki saat bekletilen CB, CN, AR artıklarının FTIR grafikleri.....	48
Şekil 4.9: 1130-1140 °C aralığında iki saat bekletilen CB, CN, AR artıklarının FTIR grafikleri.....	48
Şekil 4.10: CB, CN ve AR artıklarının genleşme oranlarının karşılaştırılması.....	49
Şekil 4.11: CB, CN ve AR artıklarının farklı sürelerdeki genleşme görüntüleri (ölçekler 1 cm'dir).....	51
Şekil 5.1: Genleştirilen numunelerin yenilme yüklerinin karşılaştırılması.....	76
Şekil 5.2: Genleştirilen numunelerin porozite değerlerinin karşılaştırılması.....	77
Şekil 5.3: 1,6 cm ve 1,45 cm çaplı numunelerin genleştirilmiş görüntüleri (ölçekler 1 cm'dir).....	78
Şekil 5.4: Bu çalışma (a) ve diğer çalışmalarda (b: Bernhardt ve diğ., (2013); c: Ardakani ve Yazdani, (2014)) üretilen agregaların boşluk yapılarının karşılaştırılması.....	79
Şekil 5.5: Genleştirildikten sonra a ve b: CB*, c ve d: CN, e ve f: AR* numunelerinin boşluk yapıları (ölçekler 1 cm'dir).....	80

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 3.1: 1,45 cm çaplı agregaların yenilme yükleri ve birim ağırlık değerleri.....	29
Tablo 3.2: 1,6 cm çaplı agregaların yenilme yükleri ve birim ağırlık değerleri.....	30
Tablo 3.3: 1,75 cm çaplı agregaların yenilme yükleri ve birim ağırlık değerleri.....	33
Tablo 4.1: Artıkların yüzde olarak mineral bileşimi.	37
Tablo 4.2: Artıkların anaoksit kimyası.	39
Tablo 4.3: Artıkların dane boyutu dağılımları.....	39
Tablo 4.4: Silindirik numunelerin genleşme öncesi, sonrası özellikleri ve genleşme oranları.	50
Tablo 4.5: 1,45 cm çaplı CB* numunelerinin genleşme sonrası fiziksel özellikleri.	54
Tablo 4.6: 1,45 cm çaplı CN numunelerinin genleşme sonrası fiziksel özellikleri.....	56
Tablo 4.7: 1,45 cm çaplı AR* numunelerinin genleşme sonrası fiziksel özellikleri.....	58
Tablo 4.8: 1,6 cm çaplı CB* numunelerinin genleşme sonrası fiziksel özellikleri.	61
Tablo 4.9: 1,6 cm çaplı CN numunelerinin genleşme sonrası fiziksel özellikleri.....	63
Tablo 4.10: 1,6 cm çaplı CN numunelerinin genleşme sonrası fiziksel özellikleri.....	65
Tablo 4.11: 1,45 cm çaplı numunelerinin genleşme sonrası yenilme yükleri ve kırılma dayanımı değerleri.	68
Tablo 4.12: 1,6 cm çaplı numunelerinin genleşme sonrası yenilme yükleri ve kırılma dayanımı değerleri.	69
Tablo 5.1: CB*, CN ve AR* agregaları ile diğer agregaların fiziko-mekanik özellikleri.....	75

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
\emptyset	: Çap
γ	: Birim ağırlık
W_k	: Numunenin kuru ağırlığı
V_t	: Toplam hacim
S_a	: Ağırlıkça su emme
W_d	: Doygun ağırlık
S_h	: Hacimce su emme
p	: Porozite
k	: Komposite
ρ	: Yoğunluk
D	: Doygunluk derecesi
W_p	: Parafin film ağırlığı
V_p	: Parafin film hacmi
V	: Hacim
F_c	: Yenilme yükü
N	: Newton
gr	: Gram
kg	: Kilogram
cm	: Santimetre
mm	: Milimetre
σ	: Gerilme
C	: Kırılma dayanımı
C_s	: Standarta göre belirlenen kırılma dayanımı
C_h	: Hesaplanan kırılma dayanımı
\emptyset_{ort}	: Genleşme sonrası ortalama çap

Kısaltmalar	Açıklama
CB	: Cebeci
CN	: Cendere
AR	: Arnavutköy
XRD	: X Işını Kırınımı
XRF	: X Işını Floresans
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
TG	: Termogravimetrik Analiz
GO	: Genleşme Oranı
GÖH	: Genleşme Öncesi Numune Hacmi
GSH	: Genleşme Sonrası Numune Hacmi
Ort	: Ortalama
Maks	: Maksimum
Min	: Minimum
GKA	: Genleştirilmiş Kil Agregası
AK	: Ateşte kayıp
MPa	: Mega Pascal

ÖZET

DOKTORA TEZİ

İSTANBUL AVRUPA YAKASI AGREGA OCAKLARINDA AÇIĞA ÇIKAN KUMTAŞI-ŞEYL ARTIKLARININ GENLEŞTİRİLMİŞ KİL AGREGASI OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Erdi AVCI

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeoloji Mühendisliği Programı

Danışman : Prof. Dr. Atiye TUĞRUL

II. Danışman : Prof. Dr. Abdulkerim YÖRÜKOĞLU

İstanbul Avrupa yakasındaki agrega ocaklarında (Cebeci, Cendere ve Arnavutköy) açığa çıkan dane çapı 63 μm 'den küçük olan malzemeler artık olarak nitelendirilmekte ve herhangi bir alanda değerlendirilememektedir. Bu çalışmada, artıklarının herhangi bir katkı malzemesi ilave edilmeden genleşme potansiyelinin belirlenmesi ve genleşmeyi sağlayan etkilerin ortaya koyulması amaçlanmıştır. Cebeci (CB), Cendere (CN) ve Arnavutköy (AR) agrega ocağı artıklarının ana oksit içerikleri benzerlik sunmakta olup, SiO_2 içeriği %53-59, Al_2O_3 içeriği %15-18 ve ergiticilerin toplamı ise (CaO, Na_2O , Fe_2O_3 , K_2O , MgO) %18-19 aralığındadır. Ayrıca artıklarının ateşte kayıp değerleri sırasıyla %5,96, %7,66 ve %5,44 olarak bulunmuştur. Her üç bölgeye ait artıkların mineralojik bileşimi aynı olup, artıkların kuvars, albit, muskovit, klorit ve kalsit minerallerinden oluştuğu belirlenmiştir. Artıkların dane boyutları ise sırasıyla 2-71 μm , 2-56 μm ve 2-77 μm aralığında değişmektedir. Genleşme testleri 1200-1210 $^{\circ}\text{C}$ aralığında gerçekleştirilmiş olup, her üç bölgeye ait artıkların bu sıcaklık aralığında genleşme gösterdiği belirlenmiştir. Artıklar 2-8 dakika aralığında genleşme testlerine tabi tutulmuş olup,

her dakikada genleşme oranları belirlenmiştir. Artık malzemelerinin ateşte kayıp değerleri ve dane boyu dağılımları ile uyumlu olarak, Cendere bölgesindeki agrega ocağı artıklarının genleşme oranlarının Cebeci ve Arnavutköy bölgesindeki agrega ocağı artıklarına kıyasla daha fazla olduğu belirlenmiştir. Yapılan termal analizler sonucunda artık numunelerdeki klorit ve muskovit minerallerinin OH⁻ salınımının (dehidroksilasyon) yaklaşık 560 °C’de gerçekleştiği belirlenmiştir. Dehidroksilasyon sonucunda, artıklar kısmi ergimeye uğramaktadır ve dolayısıyla genleşmeyi sağlayabilecek gazları numunede hapsedebilecek viskoz yapıyı oluşturmaktadır. Viskoz yapının oluşmasıyla birlikte 1200-1210 °C aralığında klorit, muskovit ve kalsit minerallerinden açığa çıkan H₂O ve CO₂ gazları numunede hapsolarak malzemelerin genleşmesini sağlamıştır. Genleştirilen CB*, CN ve AR* artıklarının su emme oranları ve dayanım parametreleri, hâlihazırda birçok Avrupa ülkesinde üretimi yapılan ve birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılan agregalar ile benzerlik sunması, çalışma kapsamında üretilen agregaların da mühendislik uygulamalarında kullanılabilirliğini göstermektedir. |

Ağustos 2022 , [111] sayfa.

Anahtar kelimeler: [Genleştirilmiş kil agregaları, kil mineralleri, grovak, artık geri dönüşümü, genleşme, dehidroksilasyon]

ABSTRACT

[Ph.D. THESIS]

**[ASSESSMENT of SANDSTONE-SHALE WASTES RELEASED in the QUARRIES
LOCATED in EUROPEAN SIDE of İSTANBUL AS EXPANDED CLAY
AGGREGATES]**

[Erdi AVCI]

**İstanbul University-Cerrahpaşa
Institute of Graduate Studies
Department of Geological Engineering
Geological Engineering Programme**

[Supervisor : Prof. Dr. Atiye TUĞRUL

Co-Supervisor: Prof. Dr. Abdulkerim YÖRÜKOĞLU]

[Materials with grain sizes of less than 63 μm from the quarries (Cebeci, Cendere and Arnavutköy) in Istanbul (Turkey) are considered as waste and cannot be utilized in any area. In this study, we aimed to determine the expansion potential of the wastes and the factors that trigger the expansion. The grain sizes of the sandstone-shale waste from the Cebeci (CB), Cendere (CN) and Arnavutköy (AR) quarries range between 2-71 μm , 2-56 μm and 2-77 μm , respectively. The mineral paragenesis of the wastes from the investigated regions are the same, and consists of quartz, albite, muscovite, chlorite, and calcite. The SiO_2 and Al_2O_3 contents of the wastes range between 53-59 wt.% and 15-18 wt.%, respectively, and the sum of the fluxing agents (CaO , Na_2O , Fe_2O_3 , K_2O , MgO) range between 18-19 wt.%. The loss on ignition values of these samples varies from 5 to 8 wt.%. Expansion tests show that quarry waste samples expanded at the temperatures between 1200-1210 $^\circ\text{C}$. The wastes were subjected to expansion tests in the range of 2-8 minutes, and their expansion rates were determined every minute. Consistent with the loss on ignition values and grain size distributions of the waste materials, it

was determined that the expansion rate of the quarry wastes in the Cendere region is higher than those from the Cebeci and Arnavutköy regions. Thermal analyses results indicate that the OH⁻ release (dehydroxylation) of chlorite and muscovite minerals in waste samples occurred at approximately 560 °C. As a result of dehydroxylation, the wastes undergo partial melting and thus form a viscous structure that can trap gases and provide expansion in the samples. With the formation of viscous structure, H₂O and CO₂ gases released from chlorite, muscovite, calcite minerals and organic matter in the range of 1200-1210 °C were trapped in the samples and allowed them to expand. The water absorption and strength parameters of the expanded CB*, CN and AR* wastes are similar to the aggregates currently produced in many European countries and widely used in many engineering applications, showing that the aggregates produced within the scope of the study can also be used in engineering applications. |

August 2022, [111] pages.

Keywords: [Expanded clay aggregates, clay minerals, greywacke, waste recycling, expansion, dehydroxylation]

1. GİRİŞ

1.1. ÇALIŞMANIN AMACI

Dünya genelinde ham madde kaynaklarının giderek yoğun bir şekilde tüketilmesinden dolayı, madencilik sektörünün hemen hemen her kolunda artıkların değerlendirilmesi önemli bir yer tutmaktadır. İstanbul Avrupa yakasındaki agrega ocaklarında (Cebeci, Cendere, Arnavutköy agrega ocakları) kireçtaşı ve kumtaşı (grovak)-şeyl ham madde olarak kullanılmaktadır. Kireçtaşı ham maddesi en küçük boyutuna kadar değerlendirilirken kumtaşı-şeyl için aynı durum söz konusu değildir. Agregada ocaklarından elde edilen kumtaşı-şeyl farklı boyutlarda (dane çapı > 5 mm) kırılarak asfalt veya beton agregası olarak kullanılırken, 5 mm'den küçük dane boyuna sahip olan malzeme yıkanarak kil-silt boyutundaki malzemelerden arındırılmaktadır. Çöktürme havuzlarında biriken kil-silt boyutundaki malzeme daha sonra filtre preslerden geçirilerek artık sahalarında biriktirilmektedir. Koordinatörlüğünü Prof. Dr. Atiye TUĞRUL'un yapmış olduğu Cebeci Maden Bölgesi Projesi kapsamında, 12 milyon ton/yıl malzemenin yaklaşık %20'si mekanik karıştırma, %20'si yıkanmaksızın asfalt üretimine kalan %60'ı olan 7,2 milyon ton/yıl malzemenin ise yaklaşık %40'ı (0-5mm boyut grubundaki ince malzeme) yıkamaya gideceği belirtilmiştir. Dolayısıyla yıkanacak malzeme miktarı 7,2 milyon ton/yıl x %40 = yaklaşık 3 milyon ton (fiili üretimin %25'i) olacaktır. Yıkanacak malzeme içerisinde yıkama sonrası artığa gidecek olan 63 mikron altındaki malzeme miktarının yaklaşık %12 olacağı kabulüyle 3 Milyon ton/yıl x %12 = 360.000 ton/yıl artık açığa çıkacağı belirtilmiştir. Cendere ve Arnavutköy agrega ocaklarının yıllık üretim miktarlarının Cebeci agrega ocakları ile benzer olduğu kabul edilirse, yıllık yaklaşık 1 milyon ton artık üretileceği tahmin edilmektedir. Herhangi bir alanda değerlendirilemeyen bu malzeme artık olarak nitelendirilmekte ve agrega ocaklarında yapay tepeler oluşturacak boyutlara ulaşmaktadır. Bu durum hem ekonomik bir kayıp hem de büyük bir çevre sorununa yol açmaktadır.

Genleştirilmiş kil agregaları toz haline getirilmiş kil ve zeolit gibi hammaddelerin peletleme yöntemiyle belirli boyutlara getirildikten sonra yüksek sıcaklıklarda (1100-1300 °C) pişirilerek elde edilebilmektedir (Özgüven ve Gündüz, 2012; Dondi ve diğ., 2016; Ayati ve diğ., 2018). Hammaddelerin yanı sıra, doğal taş madenciliğinin yapıldığı sahalarda (mermer ve kırmataş

ocakları) üretim ve işleme sonucunda açığa çıkan toz artıklar, ısı işleme tabii tutularak geliştirilmiş kil agregası olarak değerlendirilmektedir (Aineto ve diğ., 2006; Gunning ve diğ., 2009; Han ve diğ., 2015; Franus ve diğ., 2016). Doğal agrega ocaklarında açığa çıkan artıklardan farklı olarak, su arıtma tesislerinde biriken çamurlar, cam işleme fabrikalarında açığa çıkan cam artıkları, kömür tozu ve kül gibi artıklar geliştirilmiş kil agregası üretiminde yan ürün olarak kullanılmaktadır (Chiou ve diğ., 2006; Ducman ve Mirtič, 2009; González-Corrochano ve diğ., 2009a, 2009b; Huang ve Wang, 2013; Dondi ve diğ., 2016).

Artıkların geliştirilmiş kil agregası olarak değerlendirilmesi süresince genişmeyi etkileyen faktörler birçok araştırmacı tarafından ortaya koyulmuştur. Buna göre, artıkların jeokimyasal ve mineralojik bileşimleri, dane boyutları ve vitrik fazların yüksek sıcaklıktaki viskozitesi gibi parametreler genişmeyi etkileyen faktörler olarak belirtilmiştir (Riley, 1951; González-Corrochano ve diğ., 2009b; Özgüven ve Gündüz, 2012; Dondi ve diğ., 2016). Bu faktörlerin yanı sıra, yüksek sıcaklık etkisiyle malzemede viskoz yapının oluşması ve açığa çıkan gazların bu yapı sayesinde hapsedilmesi, genişmeyi sağlayan oldukça önemli bir etkidir (Riley, 1951; de' Gennaro ve diğ., 2004; Aineto ve diğ., 2006; Fakhfakh ve diğ., 2007; Dondi ve diğ., 2016). Genleşmeye tabi tutulan malzemelerde viskoz yapının önemi düşünüldüğünde, viskoz yapıyı sağlayan etkilerin ortaya konulması, geliştirilmiş kil agregalarının oluşum süreçlerini daha net ortaya koyacaktır. Bu kapsamda, Riley (1951), viskoz yapının oluşabilmesi için malzemenin kimyasal bileşiminin belirleyici özellik olduğunu ve CaO, Na₂O, Fe₂O₃, K₂O, MgO gibi ergitici bileşenler (fluxing agents) ile SiO₂ ve Al₂O₃ konsantrasyonlarının uygun oranlarda olması gerektiğini belirtmiştir. de' Gennaro ve diğ., (2004), malzemede viskoz yapının oluşabilmesi için SiO₂/ergitici bileşenler oranının yüksek olması gerektiğini belirtmiştir.

Bu zamana kadar yapılan geliştirilmiş kil agregası çalışmalarında birçok artık malzeme ve/veya ham madde kullanılmış ve bu malzemelerin genişebilmesi için gerekli şartlar ortaya koyulmuştur. Bu çalışmada ise, bu zamana kadar kullanılmış olan artık ve ham maddelerden farklı olarak grovak türü kayaların filtre pres artıkları geliştirilmiş kil agregası olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu zamana kadar yapılan çalışmalardaki önerilerden farklı olarak, genişmeyi sağlayan viskoz yapının gerçekleşebilmesi için gerekli mineralojik bileşim ortaya konulmuştur. Bu kapsamda, İstanbul'un Avrupa yakasında işletilen Cebeci, Cendere, Arnavutköy agrega ocaklarında açığa çıkan kumtaşı (grovak)-şeyl artıklarının jeokimyasal, mineralojik bileşimleri, dane boyutları ve termal özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler yardımıyla her üç bölgeye ait artıkların genişme potansiyelleri ve genişmeyi sağlayan gaz

kaynağı ortaya koyulmuştur. Ayrıca sıcaklığın artmasıyla birlikte mineralojik bileşimin nasıl değiştiği de belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda, genleşme için gerekli şartların yanı sıra, genleşmeyen artık veya ham madde için genleşmeyi sağlayabilecek katkı malzemesi önerilmiştir. Genleşmeyi sağlayan etkilerin yanı sıra artıklardan elde edilen geliştirilmiş kil agregalarının fiziko-mekanik ve termal özellikleri belirlenerek, hâlihazırda piyasada satışı yapılan ürünler ile karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.

Genleştirilmiş kil agregalarının uluslararası piyasadaki satış fiyatının yaklaşık 200 \$/m³ olması dikkate alındığında, üretilen geliştirilmiş kil agregaları ile hem artıkların çevreye olumsuz etkileri azaltılmış olacaktır hem de katma değerli ürün üretilerek ekonomik kazanç elde edilecektir.

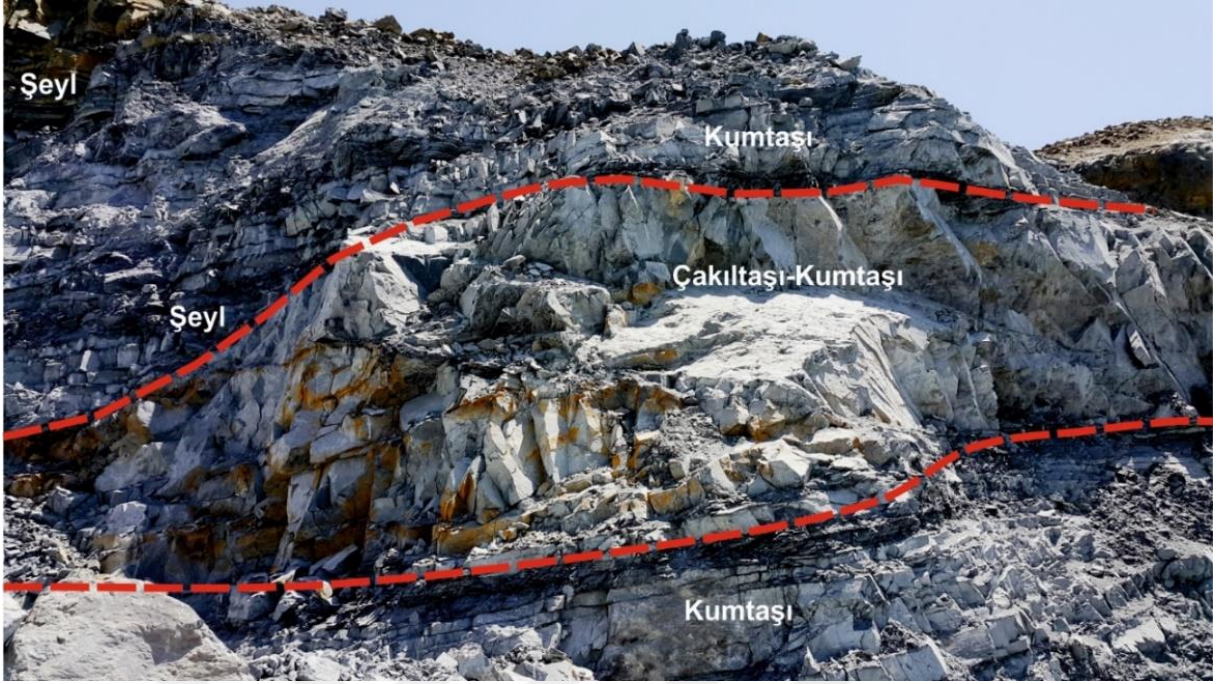
1.2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ

İstanbul Avrupa yakasında yer alan Cebeci, Cendere ve Arnavutköy agrega ocakları sırasıyla Sultangazi (Cebeci köyü), Sarıyer (Ayazağa), Arnavutköy ilçelerinde yer almaktadır (Şekil 1.1). Her üç agrega ocağında da Trakya Formasyonu'na ait kumtaşı-şeyl ve bu formasyona ait Cebeciköy kireçtaşı üyesinden agrega üretilmektedir.. Cendere ve Arnavutköy agrega ocaklarında sadece grovak-şeyl içeren üyelerden üretim yapılırken, Cebeci agrega ocaklarında diğer ocaklardan farklı olarak Cebeciköy kireçtaşı üyesinden de üretim yapılmaktadır.

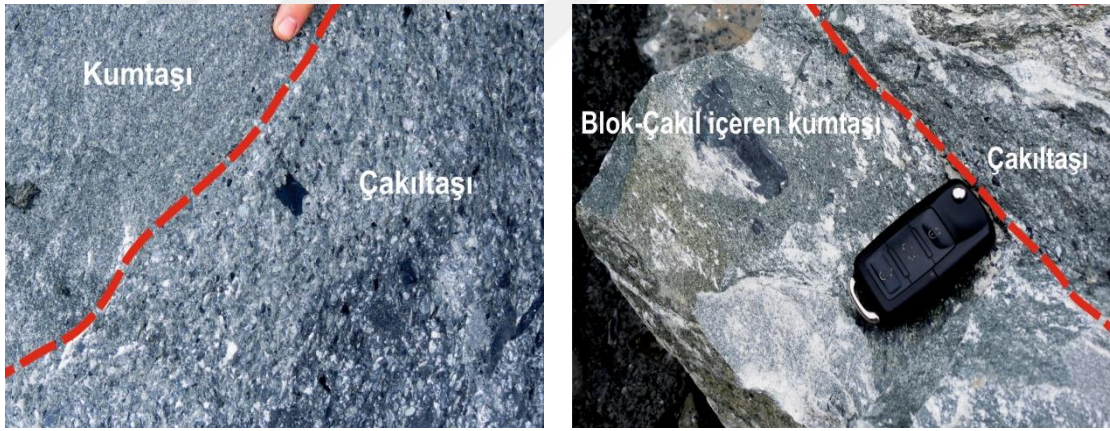


Şekil 1.1: Agrega ocaklarının havadan alınmış görüntüleri.

Trakya Formasyonu, değişik boyutlardaki şeyl-grovak aralanmalarından oluşmaktadır. Formasyon büyük oranda şeyl ve az olarak da polijenik konglomera, kalkerli şeyl, kireçtaşı, kuvars-çakıltası ve kuvars-kumtaşından oluşmaktadır (Şekil 1.2). Şeyller, genellikle koyu gri ve yeşilimsi gri, sarımsı gri, yersel olarak soluk kırmızı pembe ayrışma renklidir. Şeyl içinde çok ince laminalı siltaşından çok kaba çakıltalarına kadar türbiditik oluşuklar bulunur (Tuğrul ve diğ., 2018). Çakıltaları açık yeşilimsi gri ve grimsi sarı ile soluk kahverengi arasında ayrışma renkli (Şekil 1.2), polijenik, çok kötü ile orta arası boylanmıştır (Şekil 1.3). Bileşenleri oluşturan taneler çok ince çakılcıkla ufak-blok arasında, yarı yuvarlaklaşmış beyaz kuvars, metakuvarsit, koyu renkli çört, lidit, iyi yuvarlaklaşmış mikaşist, fillit; şeyl, grovak ve kireçtaşıdır (Tuğrul ve diğ., 2018). Trakya Formasyonu lidit çakılcıklı konglomera ile başlar, bol bitkisel kalıntı, artan kumtaşı ve azalan karbonat oranı ile sonlanır (Kaya, 1971).



Şekil 1.2: Trakya Formasyonu grovak ve şeylleri arasında kalınlıkları 0,2-1,5 m arasında değişen, ince-orta ve yer yer kalın tabakalı çakıltaşı-kumtaşı seviyeleri (Tuğrul ve diğ., 2018).



Şekil 1.3:Trakya Formasyonu içerisinde bulunan blok boyutunda grovak, şeyl ve metamorfik kaya parçaları içeren çakıltaşı seviyesi (Tuğrul ve diğ., 2018).

Grovaklar yeşilimsi gri, sıkı; yarı yuvarlaklaşmış kuvars, koyu renkli çört, taş kırıntıları, mika ve feldspattan oluşmaktadır (Şekil 1.4). Taneler ikincil büyüme, silis çimento ve kil hamuru ile bağlanmıştır. Ayrışmış örnekleri grimsi sarı ile soluk kahverengi arasında, gözenekli, demirle boyanmış, bol mikalı ve dayanımsızdır (Şekil 1.5).



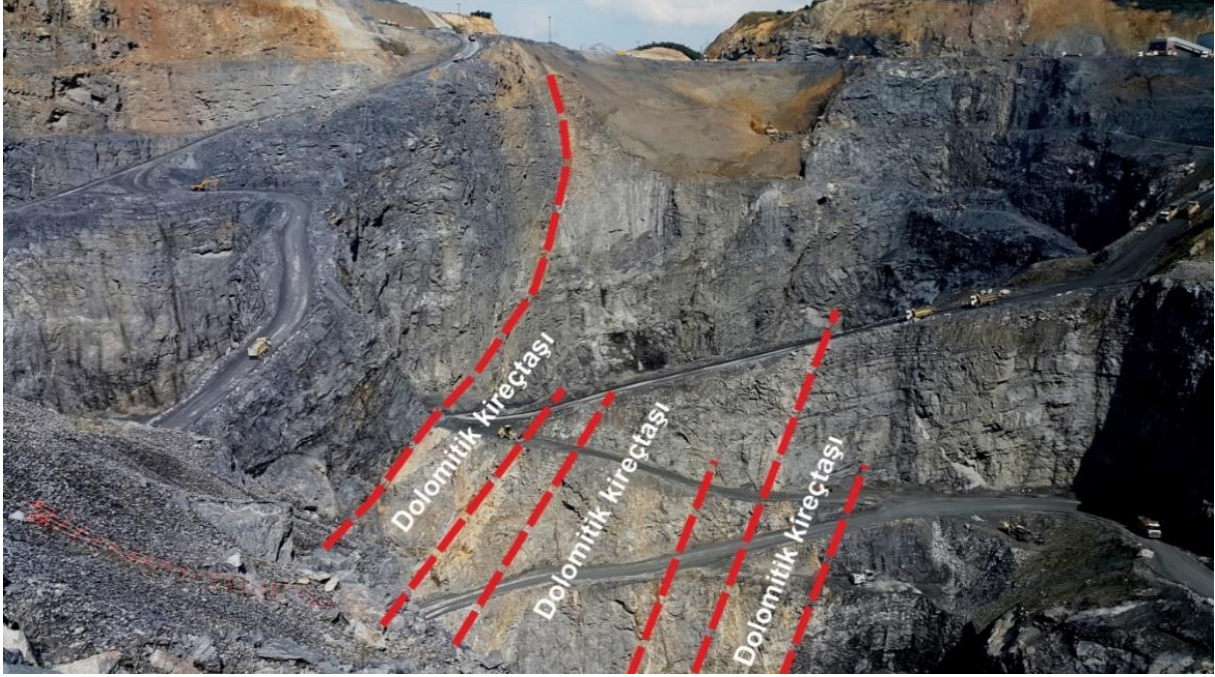
Şekil 1.4: Cebeci Maden Bölgesinin kuzeyindeki ocaklarda görülen içerisinde ince–orta tabakalı şeyl düzeyleri ile ardalanmalı grovaklar (Tuğrul ve diğ., 2018).



Şekil 1.5: Cebeci Maden Bölgesi kuzeyindeki ocaklarda görülen yeşilimsi kahve, boz ayrışma renkli grovak ve şeyller (Tuğrul ve diğ., 2018).

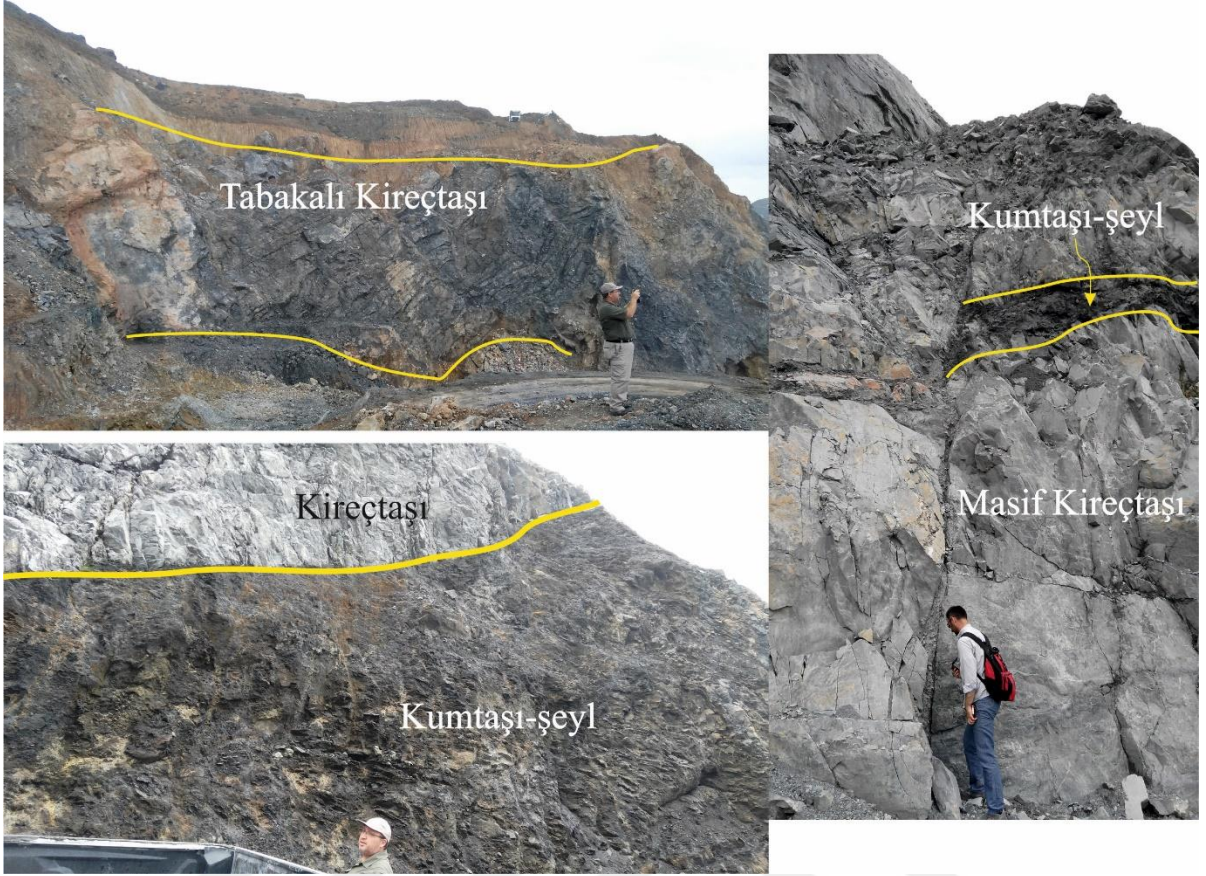
Karbonatlı kumtaşları genel olarak karbonatlı şeyller ile kireçtaşları arasında dar bir alanda geçiş zonunda izlenmektedir. İnce-orta tabakalı ve yer yer laminalı bir görünüm sunmaktadır. Bol miktarda kuvars kırıntısı içerirler. Kuvars miktarlarının azalmasıyla giderek Cebeciköy kireçtaşı üyesine geçerler (Tuğrul ve diğ., 2018). Cebeciköy kireçtaşı üyesinde de az miktarda kuvars kırıntısı bulunmaktadır. Kaya (1971) karbonatlı şeylleri ve kumtaşlarını Cebeciköy kireçtaşı üyesine dahil etmiştir.

Cebeciköy kireçtaşı üyesi gri, siyahımsı gri, mavimsi gri renkli, ince orta-kalın tabakalı yer yer masif kireçtaşlarından oluşur. Birim, kireçtaşlarının yanı sıra karbonatlı şeyl, killi kireçtaşı ve kumlu kireçtaşları ile ikincil dolomitik kireçtaşlarından oluşmaktadır (Tuğrul ve diğ., 2018). Dolomitleşmeler yaygın olarak ana fay düzlemlerini takip etmekte olup fay düzlemlerinden uzaklaştıkça dolomitleşme etkisini yitirmektedir (Şekil 1.6).



Şekil 1.6: Cebeci Maden Bölgesi güneyindeki ruhsat sahalarında görülen fay düzlemlerinin etkisiyle ikincil olarak gelişmiş dolomitik kireçtaşları (Tuğrul ve diğ., 2018).

Cendere ve Arvutköy agrega ocaklarında Cebeciköy kireçtaşı üyesi yüzeylenme göstermez iken, Cebeci agrega ocaklarında kumtaşı-şeyl aralanmalı Trakya Formasyonu üyeleri ile tektonik dokanaklı olarak bulunduğu tespit edilmiştir (Şekil 1.7). Cebeci, Cendere ve Arnavutköy agrega ocaklarında Trakya Formasyonu'nu uyumsuz olarak örten kil ara seviyeli, çakıl, kum, tabanda yer yer çapraz tabakalı kumtaşlarından oluşan, kalınlığı 10-20 m aralığında olan Belgrad Formasyonu Kırışık üyesi bulunmaktadır (Gözübol ve Aysal, 2008) (Şekil 1.8).



Şekil 1.7: Cebeci Maden Bölgesinde gözlenen Cebeciköy kireçtaşı üyesi ve bu birimle tektonik donaklı kumtaşı-şeyl birimleri.

HOLOSEN YAŞ	ALÜVYON FORMASYON	ÜYE	KAYA TÜRÜ	AÇIKLAMALAR
HOLOSEN	ALÜVYON	0-15 m		Alüvyon: Güncel dere çökelleri, blok, çakıl, kum, silt ve kil.
MIYOSEN	BELGRAD	10-20 m		İstanbul formasyonu, Kıraç üyesi: Kil ara seviyeli, çakıl, kum, kil, tabanda yer yer çapraz tabakalı kumtaşlarından oluşur.
KARBONİFER	TRAKYA			Trakya formasyonu: Gri renkli kumtaşı - şeyl ardalanması, Gri renkli ince katmanlı kumtaşı
		CEBECİKÖY KIREÇTAŞI > 100 m		Cebeci kireçtaşı üyesi: Kireçtaşı, orta - kalın tabakalı, yer yer dolomitleşmiş kireçtaşı, alt düzeyleri kumlu kireçtaşı ve karbonatlı şeyl.
				Açık yeşil renkli silisli kumtaşı, kalın tabakalı. Gri renkli silisli kumtaşı, ince - orta tabakalı. Yer yer koyu yeşil renkli, mafik dayklarla kesilmiş

Ölçeksiz

Şekil 1.8: İnceleme alanının genelleştirilmiş stratigrafik sütun kesiti (Gözübol ve Aysal, 2008).

1.3. GENLEŞTİRİLMİŞ KİL AGREGALARININ AVANTAJLARI VE KULLANIM ALANLARI

Genleştirilmiş kil agregalarının jeoteknik uygulamalarında kullanılma durumunda sağladığı esas avantajlar aşağıdaki gibi listelenebilir:

- Yığın yoğunluğunun az olması
- Yüksek yalıtım kapasitesine sahip olması
- İyi düzeyde drenaj sağlaması
- Yanıcı özelliğinin olmaması
- Isınma ve donmaya karşı dayanıklı olması
- Düşük kapilariteye sahip olmaları
- Yayılma ve sıkıştırma işlemlerinin kolay olması
- Deformasyona karşı dayanıklı olmaları
- Kimyasal tehlikesinin olmaması
- Mantar, çürüme, böcek ve haşerelere karşı dayanıklı olmaları
- Düşük nakliye ücretleri

Gevşek yığın yoğunluğuna sahip, hafif ve drenaj özelliği oldukça iyi olan genleştirilmiş kil agregaları bu özellikleri sayesinde, taşıma gücü düşük ve oturmaların fazla olduğu zeminlerde alternatif malzeme olarak kullanılabilir (Şekil 1.9a). Şekil 1.9'daki taşıma gücü düşük ve oturmanın fazla olduğu zemin ortamında, temelden alınacak olan zeminin ağırlığının yapının ağırlığı ve zemine serilen genleştirilmiş kil agregaların ağırlığına eşit olduğu belirtilmiştir (Boudaghpour ve Hashemi, 2008). Bu durumda yapı ve hafif agregadan gelecek olan yükler zeminin taşıyabileceği aralıkta olacaktır.

Genleştirilmiş kil agregalarının istinat duvarlarında dolgu malzemesi olarak kullanıldığında, istinat duvarına etki eden yük geleneksel dolgu malzemelerine kıyasla yaklaşık %75 oranında

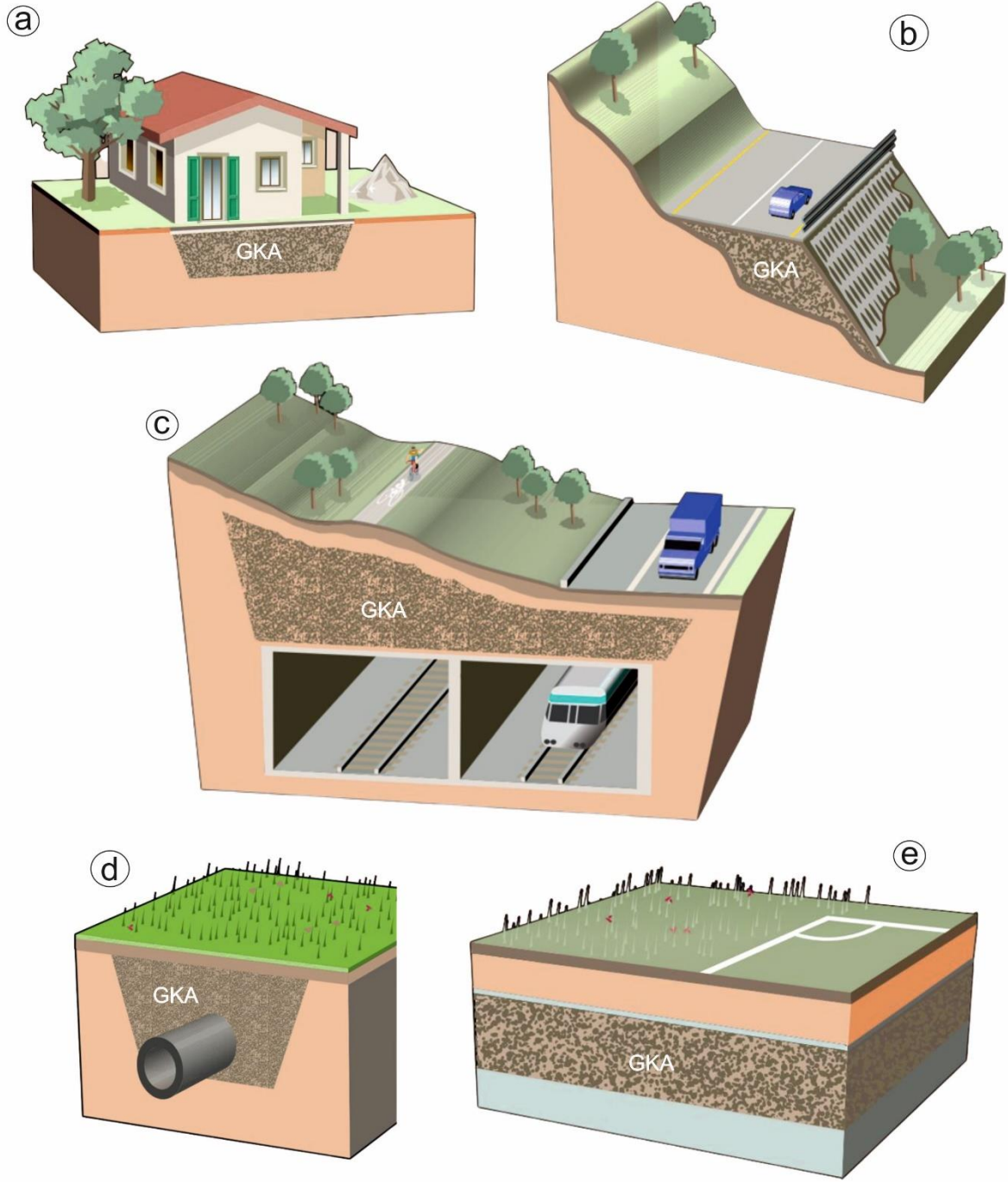
daha az olacaktır (Şekil 1.9b). Yükteki bu azalma istinat duvarının yenilme riskini de azaltmaktadır.

İyi bir drenaj sağlayıcı malzeme olarak kullanılan geliştirilmiş kil agregaları, bu özelliği sayesinde yeraltı suyunun üst yapılara aktarmasını engelleyecektir. Eğimli arazilerde yeraltı suyunun etkisinin bulunması durumunda yamaçta yenilme ve yolda bozulmalar meydana gelebilmektedir. Bu durumda yol yapımında dolgu malzemesi olarak geliştirilmiş kil agregası kullanılması halinde hem drenaj sağlanmış olacaktır hem de suyun kapiler etki ile yamaçlara iletilmesi engellenecektir (Şekil 1.9b).

Geleneksel dolgu malzemelerine kıyasla daha hafif olması, su emme değerlerinin düşük olması ve bulunduğu ortamın drenajını sağlayabilmesi gibi özellikleri düşünüldüğünde, geliştirilmiş kil agregaları çökme riski bulunan tünellerde kullanılarak destek sistemine ekstra ağırlık yüklenmemiş olur (Şekil 1.9c). Bu durumda daha pahalı olan yük transferleri gibi yöntemler yerine hafif agregalar kullanılarak ekonomik kazanç sağlanabilir.

Yumuşak zeminli ortamlarda yeraltı artık suyu, temiz yeraltı suyu veya yakıt borularla taşımada zemine uygulanacak yükü azaltmak adına geliştirilmiş kil agregaları kullanılabilir (Şekil 1.9d). Ayrıca boruları kapatmak için kullanılan dolgu malzemesinin yerine daha hafif olan geliştirilmiş kil agregalarının kullanılması daha güvenli olacaktır.

Sportif faaliyetlerin gerçekleştirildiği alanlarda yağmur suyunun tahliye edilmesi durumunda geliştirilmiş kil agregaları etkin olarak kullanılabilir (Şekil 1.9e).



Şekil 1.9: Genleştirilmiş kil agregalarının bazı kullanım alanları (Boudaghpour ve Hashemi, 2008'den değiştirilmiştir)

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. GENLEŞTİRİLMİŞ KİL AGREGALARI İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

de' Gennaro ve diğ., (2004); Bu çalışmada, granit ve seramiklerin kesim, parlatma esnasında açığa çıkan artıkların yeniden kullanılarak geliştirilmiş hafif agrega üretimi gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar deneyleri ile örnekler peletler haline getirilip, 1300 °C'de döner fırınlarda genleşmeye tabi tutulmuş ve daha sonra genleşen örneklerin bileşim ve fiziko-mekanik özellikleri ortaya konmuştur. Granit ve seramiklerin parlatılması sonucu açığa çıkan tozların geliştirilmesinde açığa çıkan SiC (silisyum karbür) söz konusu peletlerin genleşmesini sağlayan ana etmen olarak belirtilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda %50 parlatılan seramiklerden elde edilen toz ile %50 granitlerin kesimi sonucu oluşan tozların karışımı ile elde edilen karışımdan yapılan agregaların 28 günlük basınç gerilmesi 20 MPa'dan fazla, yoğunluğu ise 1.4-2.0 Mg/m³ arasında bulunmuştur.

Pioro ve Pioro, (2004); Kendiliğinden genleşme özelliği göstermeyen killer kömür tozu, kumtaşı gibi malzemeler ile karıştırılıp oksijen gazı, hava veya farklı gazlar ilave edilerek geliştirilmiş kil agregası olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen agregaların yığın yoğunlukları 160-850 kg/m³ aralığında bulunmuş olup, bu agregalardan üretilen betonların dayanımları ise 0,78-14,4 MPa aralığında bulunmuştur. Betonların normal betonlara kıyasla 2 kat daha hafif ve en az iki kat daha düşük termal iletkenliğe sahip oldukları saptanmıştır.

Chiou ve diğ., (2006); Genleşen killer ile benzer özellik sunan artık su arıtma çamurdan elde edilen küller (SSA) geliştirilmiş kil agrega üretimi için ana malzeme olarak kullanılmıştır. Bu malzemenin yanı sıra, genleşen kil agregalarını sinterleştirmek için de artık su arıtma çamuru (SS) katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Sonuçlar, SSA ve SS'nin birlikte veya tek başına sentetik geliştirilmiş kil agregası üretiminde sinterleştirici olarak kullanılabilceğini göstermektedir. SS miktarının artmasıyla peletleme oranının azaldığı belirtilmiştir. Buna karşılık, SSA'ya % 20-30 oranında SS ilavesiyle uygun geliştirilmiş kil agregası elde edilebileceği belirtilmiştir.

Fakhfakh ve diğ., (2007); Tunus Güney Atlas bölgesindeki 12 farklı bölgeden alınan simektitçe zengin kil ve marn taşları geliştirilmiş kil agregası olarak değerlendirilmiştir. 10-

12 mm boyutundaki peletler öncelikle yaklaşık olarak iki saat ham maddeye bağlı olarak 600 °C, 700 °C ve 800 °C'de ön ısıtma işlemine tabi tutulduktan sonra genişleme işlemine tabi tutulmuştur. Ayrıca ham maddeye farklı oranlarda (%5, %10 ve %15) kuvars kumu ve %1 kullanılmış oranında otomobil yağı eklenerek genişlemeye tabi tutulmuştur. Edilen ürünler Fransa Argidécór firmasının üretmiş olduğu geliştirilmiş kil agregaları ile karşılaştırılmıştır.

Hung ve Hwang, (2007); Tayland'daki Shih-Men su arıtma tesisinde biriken ince tortu malzemelerinden geliştirilmiş kil agregaları üretilmiştir. Artıkların karakterizasyonu yapılmış ve killer düşük plastisiteli olarak sınıflandırılmıştır. Artıkların Riley (1951)'in belirtmiş olduğu genişleme alanına düştüğü belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda su arıtma tesisinde biriken ince tortuların 1200-1300 °C aralığında ve 10-12 dk. sürelerinde genişlediği saptanmıştır.

Ducman ve Mirtič, (2009); Silis çamuru, agrega ocaklarında dekapaj malzemesi olarak çıkarılan killer, artık camlar ve farklı türdeki taşların parlatılması sonucu açığa çıkan kalıntı malzemelerden geliştirilmiş kil agregası elde edilmiştir. SiC ve MnO₂ geliştirici malzeme olarak kullanılmıştır. Artık malzemelerinin genişleme sıcaklıklarını düşürmek için artıklara feldspat mineralleri ve küçük parçacıklar halinde camlar eklenmiştir. Toz haline getirilen artık malzemeler ile genişmeyi sağlayacak olan malzemeler karıştırılarak örnekler hazırlanmış ve hazırlanan örnekler 1150-1220 °C sıcaklığa sahip fırında geliştirilmiştir.

González-Corrochano ve diğ., (2009a); Agregá ocaklarından elde edilen agrega çamuru, Aliaga (Teruel, İspanya) termal enerji fabrikasından açığa çıkan uçucu küller ve arabalardan elde edilen kullanılmış motor yağlarının fiziksel, kimyasal ve mineralojik tanımlamaları yapılmıştır. Artıklar karıştırılmış, öğütülmüş ve peletler haline getirilmiştir. Numuneler 5 dk. ön ısıtmaya tabi tutulmuş ve ardından döner fırında 1150 °C, 1175 °C, 1200 °C ve 1225 °C sıcaklıklarda 10 ve 15 dk. bekletilmiştir. %75 agrega çamuru-%25 uçucu kül ve %50 agrega çamuru-%50 uçucu kül karışımları ile farklı sıcaklık ve bekleme süreleri altında geliştirilmiş agregalar (LWA) elde edilmiştir. Elde edilen hafif agregalar düşük yığın ve parçacık yoğunluğu, düşük su emme ve yüksek basınç dayanımı göstermiştir. Üretilen LWA'ların, yalıtım veya jeoteknik uygulamalar, bahçecilik, bahçecilik ve / veya prefabrik hafif yapılar ve hafif yalıtım betonları gibi ticari ürünlerle aynı veya benzer uygulamalarda kullanılabileceği belirtilmiştir.

González-Corrochano ve diğ., (2009b); Agregá ocaklarındaki yıkama tesislerinde biriken çamurlar, su arıtma tesislerinde biriken çamurlar ve kilce zengin sedimentler fiziksel, kimyasal

ve mineralojik bakımdan incelenmiştir. Söz konusu bu malzemeler karıştırılarak, peletler haline getirilmiştir. Peletler 5 dk. ön ısıtmaya tabii tutulmuş ve ardından 1150 °C, 1175 °C, 1200 °C ve 1225 °C’de her bir sıcaklıkta 10 ve 15 dk. döner fırında genleşmeye tabii tutulmuştur. Agregaların yıkanması sonucu biriken çamurdan kilce zengin sedimentlerin yarı yarıya karıştırılmasıyla elde edilen geliştirilmiş agreganın genleşme indeksi (BI) > 0, yoğunluğu ve su emmesi en düşük ve basınç dayanımı ise en fazla olarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen geliştirilmiş kil agregaları hali hazırda İspanya’da ticari anlamda üretim ve satış yapan Artila firmasının geliştirilmiş kil agregaları ile karşılaştırılmış ve Artila agregaları ile benzer ya da aynı kullanım alanlarına sahip agrega üretildiği belirtilmiştir.

González-Corrochano ve diğ., (2011); Yıkanmış agregaların çamurları, arıtma tesislerinde biriken çamurlar ve kilce sedimentler bu çalışmada geliştirilmiş kil agregası olarak değerlendirilmiştir. Mineralojik analizler sonucunda plajiyoklas ve piroksen minerallerinin yeniden oluşumu saptanmıştır. Agregaların fırında bekleme süresi ve ısıtma sıcaklığı oluşan malzemenin porozitesini etkilediği ve agregaların dış yüzeyinde camsı yapının olmaması durumunda su emme içeriğinin ise boşluk sayısına bağlı olduğu belirtilmiştir.

Özgüven ve Gündüz, (2012); Bu çalışmada, farklı parametrelerin üretimi nasıl etkilediğini belirlemek için üç ayrı sahadan örnekler kullanılarak genleşme testleri yapılmıştır. Kil dane boyutu, pelet boyutu, fırında sıcaklık ve pişirme süresi genleşme testlerinde parametre olarak seçilmiştir. Üretim üzerindeki etkileri ayrı ayrı kanıtlanmıştır. Kil dane boyutunun azaltılmasının genleşme üzerinde olumlu bir etki gösterdiği belirlenirken, pelet büyüklüğündeki azalmanın ise genleşmeyi olumsuz etkilediği ortaya konulmuştur. Ayrıca, fırın sıcaklığı ve örneğin fırında kalma süresi de kaliteli agrega üretimi açısından önemli bir yere sahip olduğu saptanmıştır.

Bernhardt ve diğ., (2013); Pilot ölçekte döner fırın ve laboratuvar ortamındaki sabit fırınlarda geliştirilmiş kil agregaları üretilmiştir. Genleştirilen agregaların mekanik özellikleri Avrupa Birliği standartlarına (EN) göre belirlenmiştir. Elde edilen veriler yardımıyla, porozite değeri %82’den küçük olan agregaların dayanım parametresini belirleyebilecek deneysel formül önerilmiştir.

Huang ve Wang, (2013); Su arıtma tesislerinde biriken çamurlardan hafif agrega (LWA) üretimi ve söz konusu hafif agregalar ile elde edilen betonlar ele alınmıştır. Çalışma, Tayvan’daki 10 farklı su tesisinden alınan çamurlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Beş örnekten

yapısal LWA (yoğunluk = 1.2–1.8 gr/cm³) ve diğer beş örnekten ise yapısal olmayan LWA (yoğunluk ≤ 1 g/cm³) üretilmiştir. Yapısal LWA, iri agrega için 880 kg/m³'ten daha az birim hacim ağırlığı ile ASTM C330 standartlarına uygun olduğu ve yapısal beton için kullanılabilir olduğu belirtilmiştir. Yapısal LWA'dan elde edilen betonun mühendislik özellikleri yapısal hafif beton gereksinimlerine uygun olduğu da belirtilmiştir.

Loutou ve diğ., (2013); Fosfat çamurları 900-1200 °C aralığındaki sıcaklıklara maruz bırakılmış ve daha sonra bu numunelerin termal özellikleri ile mineralojik bileşimleri belirlenmiştir. Ayrıca fosfat çamuru farklı oranlarda şişme potansiyeline sahip killer ile karıştırılarak bu karışımlardan elde edilen geliştirilmiş kil agregalarının yoğunluk, su emme ve dayanım gibi parametreleri sıcaklığın ve kil içeriğinin fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Su emme değerleri hariç fiziksel özellikler esas olarak sıcaklığın etkisi ile daha fazla değiştiği belirtilmiştir. Kil ile karıştırılan numunelerin 900-1100 °C aralığında genişlediği ve dayanımlarının ise 2,5-4 MPa aralığında olduğu belirtilmiştir.

Han ve diğ., (2015); Termik santrallerde, yüksek sıcaklık fırınlarında tabana ve yan duvarlara yapışıp kalan taban külü ve taş tozu geliştirilmiş kil agregası olarak değerlendirilmiştir. Optimum oranda genişleyen artıkların Na₂SO₄, Na₂CO₃, CaSO₄, CaCO₃ ve NaOH gibi uçucu bileşen içerikleri belirlenmiştir. Ayrıca optimum genişleme ve sinterleme için gerekli fırın koşulları da belirtilmiştir.

Dondi ve diğ., (2016); Genleştirilmiş kil agregalarının genişlemesinin tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılan ve günümüzde birçok araştırmacı tarafından kabul gören Riley (1951)'in üçgen diyagram yönteminin doğru sonuçlar vermediği belirtilmiştir. Bu yüzden bu çalışmada malzemenin genişlenebilirliğinin tahmin edilmesinde yeni bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Bu kapsamda, malzemenin detaylı bir şekilde tanımlanması ve karakterizasyonunun ortaya konulması, sıcak tablalı (hot-stage) mikroskop ile genişlemesinin kontrolü, faz bileşimi ve mikro çatlaklarının belirlenmesi gibi işlemler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ham kil, artık cam parçaları ve seramiklerin parlatılması sonrası açığa çıkan tozlar kullanılmıştır. Bu çalışmada ayrıca genişleme için viskoz yapının oluşmasının kritik öneme sahip olduğu belirtilmiştir.

Franus ve diğ., (2016); Su arıtma çamurları 1100 °C (LWA1) ve 1150 °C (LWA2) sıcaklıklarında geliştirilmiştir. LWA1'in su emme ve porozite değerleri sırasıyla %14,4 ve %60 bulunurken, LWA2'nin su emme ve porozite değerleri ise sırasıyla %16,2 ve %66 olarak

bulunmuştur. LWA2'nin su emme ve porozite değerlerinin LWA1'e kıyasla fazla olması, sıcaklık arttıkça organik madde kaynaklı gazların daha fazla etkin olması ile açıklanmıştır. LWA2 ve LWA1'in kırılma dayanımları sırasıyla 4,64 MPa ve 0,79 MPa olarak bulunmuştur.

Loutou ve Hajjaji, (2017); Kil ham maddesi, çimento döner fırın tozu ve fosfat çamurlarından elde edilen genleştirilmiş kil agregalarının pişirme süresince sıcaklığın fonksiyonu olarak termal özelliklerinde meydana gelen değişiklikler XRD, DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre), FT-IR (Fourier Dönüştümlü Kızılötesi Spektrometresi) ve SEM ile belirlenmiştir. Buna göre kalk-alümina silikat fazların 900 °C'den küçük sıcaklıklarda kaolinit, klorit ve karbonatların parçalanmasından oluştuğu önerilmiştir. Ayrıca florapatit minerallerinin de kalsiyum fosfata ve peletlerin sinterleşmesini sağlayan ergiyiğe dönüştüğü belirtilmiştir. Sıcaklığın artmasıyla peletlerin kırılma dayanımının arttığı, yoğunluk ve porozite değerlerinin ise azaldığı belirtilmiştir.

Ayati ve diğ., (2018); Kilin, kolayca işlenebildiği ve nispeten düşük sıcaklıklarda sinterlendiğinde düşük yoğunluklu fakat yüksek dayanımlı agrega parçacıkları oluşturduğu için hafif agregaların üretiminde hammadde olarak kullanıldığı belirtilmiştir. Böylece, büyük projeler tarafından üretilen artık killerden hafif agrega üretiminin olumlu çevresel bir etkiye sahip olduğu ve ekonomik döngüye katkıda bulunduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada, kilden hafif agregalar üretmek için üretim süreci ve işleme koşullarının agregaların özelliklerine etkisi incelenmiştir.

2.2. MİNERALLERİN TERMAL VE KIZILÖTESİ SPEKTROMETRESİ ÖZELLİKLERİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Smykatz-Kloss W., (1974); Minerallerin farklı sıcaklıklardaki DTA-TG analizleri detaylı olarak sunulmuş olup, ana mineral gruplarının DTA-TG pikleri saptanmıştır. DTA grafiklerindeki endotermik ve ekzotermik piklere sebep olan reaksiyonlar veya faz değişimleri belirtilmiştir. Özellikle klorit minerallerindeki Fe^{2+} 'nın Mg^{2+} ile yer değiştirmesi sonucunda endotermik ve ekzotermik reaksiyon sıcaklıklarının düştüğü belirtilmiştir.

Borggaard ve diğ., (1982); Demirce zengin klorit minerali dehidroksilasyona uğratılmadan oksidasyona maruz bırakılmış ve sonrasında yapılan kimyasal, termal, kızılötesi, Mössbauer ve XRD analizleri sonucunda Fe^{2+} 'nın sadece ara sekiz yüzlü katmanda (interlayer octahedral layer) bulunduğu belirtilmiştir. Ayrıca Fe^{2+} 'nin oksidasyonu sonucunda H_2 gazının oluştuğu da belirtilmiştir.

Villiéras ve diğ., (1993); Mg-klorit minerallerin dehidroksilasyon reaksiyonlarının iki aşamalı olarak gerçekleştirildiği belirtilmiştir. İlk olarak yaklaşık 550 °C civarında brusit ($MgOH_2$) benzeri katmanın, daha sonra da sıcaklığın artışı ile birlikte yaklaşık 800 °C civarında da 2:1 (iki dört yüzlü, bir sekiz yüzlü katman) katmanın dehidroksilasyona uğradığı belirtilmiştir. Dehidroksilasyon reaksiyonları sonrasında da mikro boşlukların oluştuğu ve bu boşlukların da atmosferik suyla dolduğu saptanmıştır.

Russell ve Fraser, (1994); 3600 cm^{-1} civarındaki dalga sayılarına sahip üçlü omuzun klorit minerallerindeki sekiz yüzlü ara katmandaki O-H kaynaklı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca 700-800 cm^{-1} dalga sayısı aralığında ve 400 cm^{-1} dalga sayısı civarında ise albit piklerinin olduğu belirtilmiştir. Kalsit mineralinin 1400 cm^{-1} civarında pikler verdiği, ayrıca Ca ile Mg veya Fe'in yer değiştirmesi sonucu piklerde kaymaların meydana geldiği belirtilmiştir. 1009 ve 471 cm^{-1} 'deki Si-O bağları Fe'ce zengin klorit mineralinin (şamozit) varlığını ortaya koymaktadır.

Mazzucato ve diğ., (1999); Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan toz halindeki muskovit minerallerdeki faz değişiklikleri belirlenmiştir. Buna göre 700-1000 °C aralığında meydana gelen faz değişikliğinin tamamen dehidroksilasyona bağlı olduğu saptanmıştır. Bu sıcaklık aralığında tamamen dehidroksilasyona uğramış, beş koordinasyon sayısına sahip alüminyum çekirdeklerinin oluştuğu saptanmıştır.

Schroeder, (2002); Kaolinit, serpantin, klinoklor, gibsit, talk vs. gibi minerallerin FTIR analizlerini gerçekleştirerek, mineralleri oluşturan atom ve moleküller arasındaki bağlar, dolayısıyla mineral fazları belirlenmiştir. Buna göre, O-H bağları arasındaki titreşimlerden elde edilen piklerin dalga sayısı $3400-3750 \text{ cm}^{-1}$ aralığında değiştiği belirtilmiştir. Ayrıca klinoklor minerallerinin ara sekizyüzlü katmandaki (interlayer octahedral sheet) O-H piklerinin dalga sayısı değerlerinin 2:1 katmanındaki O-H piklerinden daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Gridi-Bennadji ve diğ., (2008); Muskovit minerallerinin $650 \text{ }^\circ\text{C}$, $980 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $1095 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de kristal kafesinde meydana gelen değişimler X ışınları ve nötron yansımaları yöntemleriyle belirlenmiştir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte kristal kafesindeki düzensizliğin arttığı fakat katmanlı yapının ise $1095 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar korunduğu saptanmıştır.

Ritz ve diğ., (2012); FTIR analizi mineral tayini için yeni bir yöntem olarak önerilmiştir. Farklı bölgelerden toplanan kil mineralleri feldspat, karbonatlar, sülfat mineralleri ve kuvars minerallerinde gerçekleştirilen analizlerin sonuçları istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre FTIR analiz yönteminin mineralleri ayırmada kullanılabileceği belirtilmiştir.

Chukanov, (2014); Bütün mineral gruplarına ait minerallerin FTIR analizleri sonucunda elde edilen grafikler her bir mineral için ayrıntılı olarak sunulmuştur. Ayrıca katı ergiyik serisine sahip mineral gruplarında element değişikliğine bağlı olarak FTIR grafiklerinde meydana gelebilecek değişiklikler de tartışılmıştır. Analiz edilen numunede kalsit miktarının fazla olması durumunda dalga sayısı 1400 cm^{-1} civarında ve art arda 3-4 pik sunduğu belirtilmiştir. Ayrıca kil minerallerindeki O-H bağlarında meydana gelen titreşimlerden dolayı $3250-3750 \text{ cm}^{-1}$ civarında dalga sayısı pikleri alındığı belirtilmiştir.

Chen ve diğ., (2015); Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresinin (FTIR) kayaçların jeokimyasının belirlenmesinde ve kömür, şeyl gibi malzemelerdeki organik maddelerin belirlenmesinde kullanılması tartışılmıştır.

Studel ve diğ., (2016); Klinoklor ve şamozit katı ergiyik serisinin yüksek sıcaklıklarda ($1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar) termal özellikleri belirlenmiştir. Bu minerallerdeki Fe^{2+} 'nin $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den itibaren oksitlenmesi ile H_2 gazının oluştuğu ve ardından dehidroksilasyon reaksiyonlarının gerçekleştiği belirtilmiştir. Dehidroksilasyon reaksiyonlarının ise klorit minerallerinin

öncelikle ara sekizyüzlü katmanında (interlayer octahedral sheet) sonrasında ise sıcaklığın artmasıyla birlikte 2:1 katmanında gerçekleştiği belirtilmiştir.



3. YÖNTEM

3.1. ANALİZ YÖNTEMLERİ VE KOŞULLARI

Cebeci, Cendere ve Arnavutköy agrega ocaklarında açığa çıkan artıkların dane boyut analizleri Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü'nde (BOREN) Mastersizer Hydro 3000 cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Filtre preslerden geçen ıslak artık malzeme öncelikle etüvde kurutulmuş ve daha sonra herhangi bir öğütme işlemine tabi tutulmadan artık malzemelerinin dane boyutu, süspansiyon halinde lazer ışık saçılımı ile belirlenmiştir. Dağıtıcı olarak su kullanılmış olup, Refractive Index'i 1.33 olarak alınmıştır. Partiküllerin ise Refractive Index'i 1.56, Particle Absorption Index'i ise 1.00 olarak alınmıştır.

Her üç bölgedeki agrega ocaklarına ait artık numunelerinin ana oksit bileşimi Phillips PW 2400 X-ışınları floresans spektrometresi ile Çin Bilimler Akademisi Jeoloji ve Jeofizik Enstitüsü'nde (Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences) gerçekleştirilmiştir. Artıkların ana oksit analizleri için Fan ve diğ., (2004) tarafından belirtilen ve Çin Standart Referansları olarak kabul edilen GSR1 (granit) ve GSR3 (bazalt) standartları kullanılmıştır.

Artık numunelerinin mineralojik bileşimi ise X-ışınları kırınımı analizleri (X-ray Diffraction Analysis, XRD) ile İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde gerçekleştirilmiştir. XRD analizlerinde, GNR marka APD 2000 Pro model cihaz ve bakır anot kullanılmıştır. Analizler 40 kV gerilim ve 30 mA akım altında $2\theta=1^\circ/\text{dk}$ hızı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, $3^\circ-65^\circ$ arasında alınmış ve alınan veriler Philips X'pert Highscore yazılımında değerlendirilmiştir.

Artık malzemelerinin Termogravimetrik (TG) ve Diferansiyel Termal Analiz (DTA) gibi termal özellikleri Jupiter STA 449 F3 cihazı ile Türkiye Ulusal Bor Enstitüsü'nde gerçekleştirilmiştir. DTA ve TG analizleri inert ortamda, sıcaklık dakikada 10°C artacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan toz halindeki Cebeci, Cendere, Arnavutköy agrega ocağı artıklarındaki hidroksil molekülleri içeren minerallerinin dehidroksilasyon reaksiyonlarının

gerçekleşme durumu FTIR analiz yöntemiyle belirlenmiştir. FTIR analizleri Türkiye Ulusal Bor Enstitüsü'nde Varian/660-IR Marka FTIR Cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

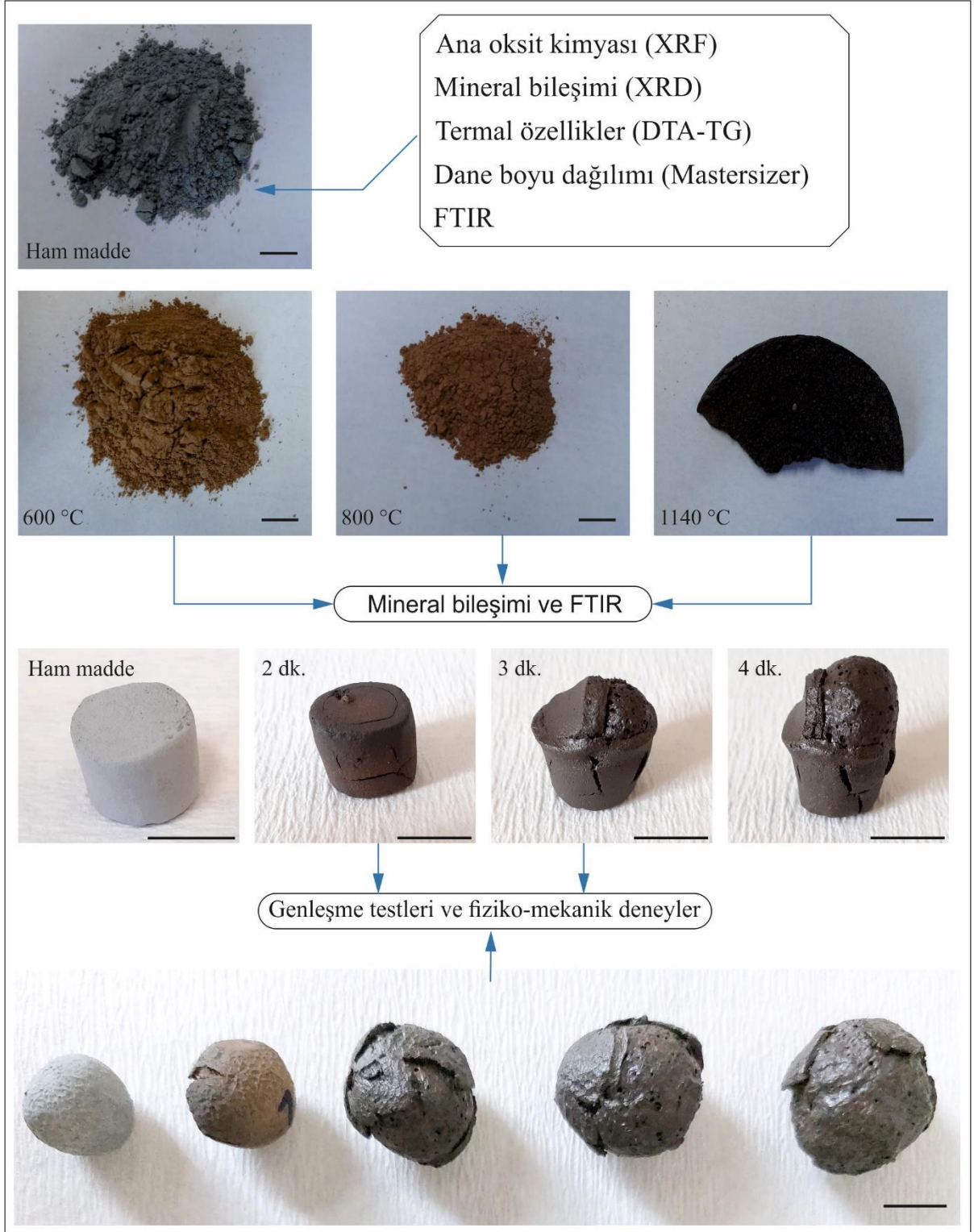
3.2. HAM VE BELİRLİ SICAKLIKLARA MARUZ BIRAKILAN ARTIKLARDA GERÇEKLEŞTİRİLEN ANALİZLER

Cebeci, Cendere, Arnavutköy agrega ocaklarında açığa çıkan artıkların öncelikle XRD analizleri gerçekleştirilerek mineralojik bileşimleri belirlenmiştir. Mineralojik bileşimleri belirlenen artıkların dane boyutları, DTA ve TG analizleri yardımıyla termal özellikleri, ana oksit kimyası ve FTIR özellikleri belirlenmiştir (Şekil 3.1).

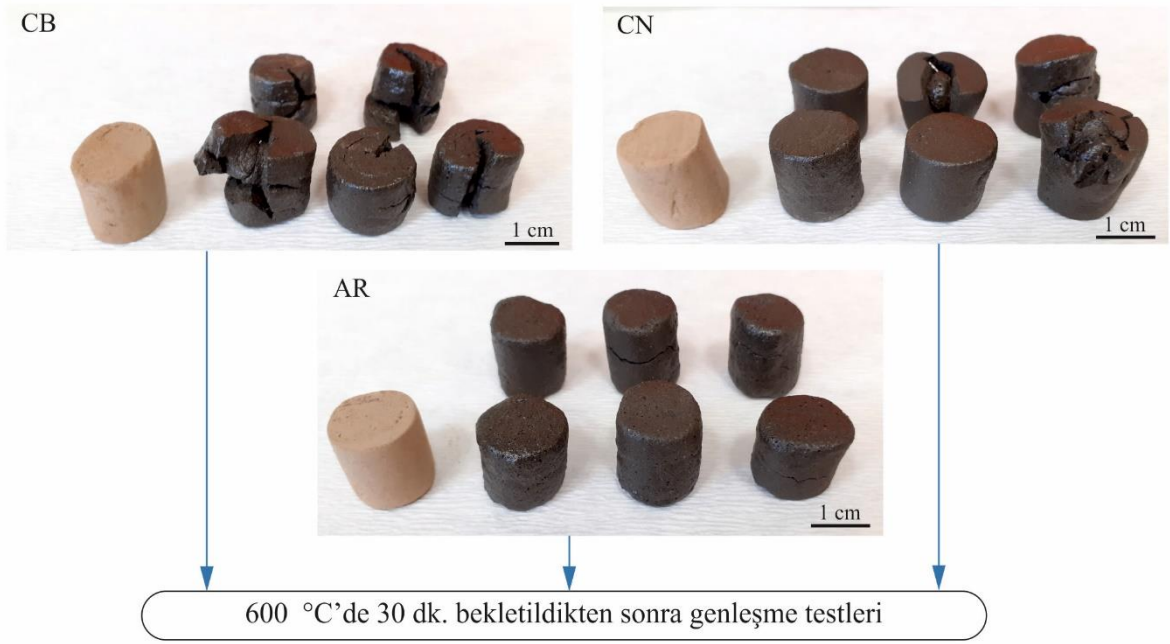
Sıcaklığın artmasıyla birlikte ham maddenin mineralojik bileşiminde meydana gelebilecek değişikliklerin belirlenebilmesi için ham maddelerde DTA ve TG analizleri yapılarak endotermik ve ekzotermik reaksiyon sıcaklık aralıkları belirlenmiştir. Ham numuneler bu belirlenen sıcaklıklarda ikişer saat bekletilmiş ve ardından fırın kapağı açılmadan numuneler soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra soğuyan bu numunelerde XRD analizleri gerçekleştirilerek, numunelerin mineralojik bileşimlerindeki değişimler belirlenmiştir (Şekil 3.1). Mineralojik bileşimlerin yanı sıra, soğuyan numunelerdeki OH^- moleküllerinin davranışlarını belirlemek adına FTIR analizleri de gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1).

Sıcaklığın artışı ile artık numunelerinde gerçekleşen endotermik ve ekzotermik reaksiyonların gerçekleştiği sıcaklıklar belirlendikten sonra, bu sıcaklıklardaki mineralojik değişimler belirlenmiştir. Mineralojik değişimlerin gerçekleştiğinden emin olunması için, artık numuneleri endotermik ve ekzotermik reaksiyonların gerçekleştiği sıcaklıklardan 10-80 °C yüksek sıcaklıklarda ikişer saat bekletilmiştir.

Artıklardaki klorit ve muskovit gibi sulu minerallerin yapısında bulunan OH^- moleküllerinin farklı sıcaklıklardaki davranışı artık numunelerinin genişleme sıcaklıklarını ve özelliklerini etkilediğinden, artık numuneleri belirlenen sıcaklıklarda bekletildikten sonra da genişmeye tabi tutulmuştur. Artık numunelerinin termal özellikleri ve FTIR analizleri dikkate alındığında, genişmeye tabi tutulacak numuneler öncelikle 600 °C'de 30 dk. bekletildikten sonra genişmeye tabi tutulmuştur (Şekil 3.2).



Şekil 3.1: Artık numunelerine gerçekleştirilen analiz ve deneyler (ölçekler 1 cm'dir).



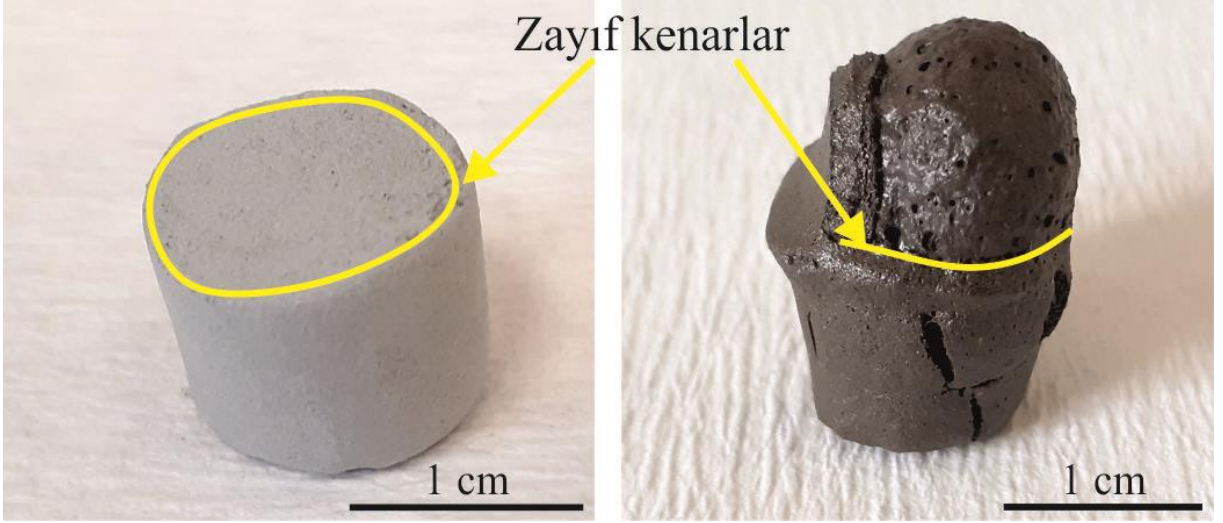
Şekil 3.2: Artıkların 600 °C'de ön ısıtma yapıldıktan sonra genişlemeye tabi tutulmuş görüntüleri.

3.3. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI, GENLEŞTİRME KOŞULLARI VE GENLEŞME ORANLARININ SAPTANMASI

3.3.1. Numunelerin Hazırlanması ve Genleştirme Koşulları

Agrega ocaklarından alınan artık numuneleri herhangi bir öğütme işlemine tabi tutulmadan su ile karıştırıldığında kolayca şekillenebilir hale dönüşmektedir. Bu durumda öncelikle artıkların, şekillendirilebileceği optimum su içeriği belirlenmiştir. Optimum su içeriği belirlenirken öncelikle, su ile karıştırılacak numunenin kuru ağırlığı belirlenmiştir. Ardından, artık numunelerine el ile şekil verilebilecek kıvama gelinceye kadar su ilave edilmiştir ve şekil verilebilir numunenin ağırlığı belirlenmiştir. İki ağırlık değeri arasındaki fark, numunelerin şekillendirilebilmesi için gerekli optimum su içeriğini vermektedir.

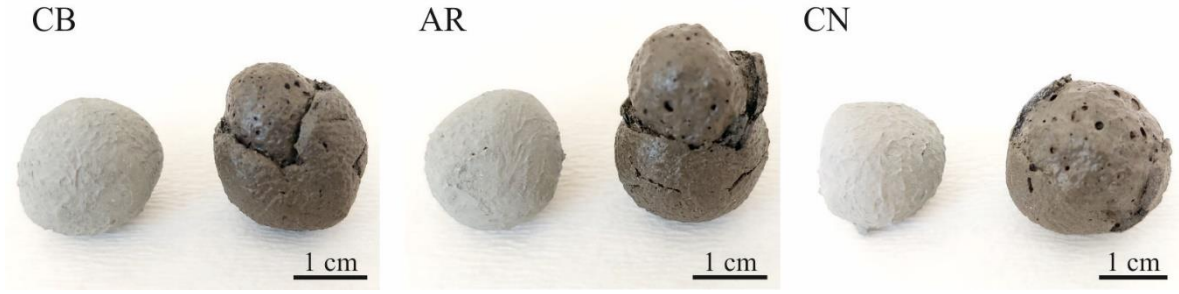
Artık numunelerine su ilave edildikten sonra numuneler ekstrüder cihazıyla şekillendirilmiştir. Ekstrüder cihazından çıkan numuneler düzgün şekilli ve eşit basınç altında oluşturulduğu için bu cihaz kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Ekstrüder cihazından çıkan silindirik numunelerin çapları 1.4 cm ve uzunlukları ise 1.27 ila 1.55 cm aralığındadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Ekstrüder cihazı ile şekillendirilen ve sonrasında geniştirilen silindirik numune.

Silindirik şekilli numuneler, etüvde 105 °C’de 24 saat kurutulduktan sonra yüksek dereceli fırında 1200-1210 °C aralığında genişleme işlemine tabi tutulmuştur. Farklı sürelerde genişleme oranlarını belirleyebilmek için, artık numuneleri 2 ila 8 dakika aralığında fırında bekletilmiştir. Artık numunelerinin genişleme işlemleri için ise Protherm markalı yüksek sıcaklık (1600 °C’ye kadar) yatay fırın kullanılmıştır.

Ekstrüder cihazından çıkan silindirik şekilli numunelerin üst ve alt yüzeylerini yan yüzeylerle birleştiren kenarlar zayıf bölgeler olduğundan genişleme bu bölgelerden dışarıya doğru gerçekleşmiştir (Şekil 3.3). Bu durumda, oluşan genişleştirilmiş agregalar düzensiz bir şekle sahip olmuştur. Bu problemi önlemek adına silindirik numunelerden farklı olarak, küre şekilli numuneler de hazırlanarak genişleme testlerine tabi tutulmuştur (Şekil 3.4). Küre şekilli numuneler ise optimum su miktarı eklendikten sonra el ile şekillendirilmiştir. El ile şekillendirilen küresel numuneler genişlemeye tabi tutulduğunda, CB ve AR numuneleri küresel formu bozulurken CN numuneleri çoğunlukla küresel formunu bozmadan genişmiştir (Şekil 3.4).



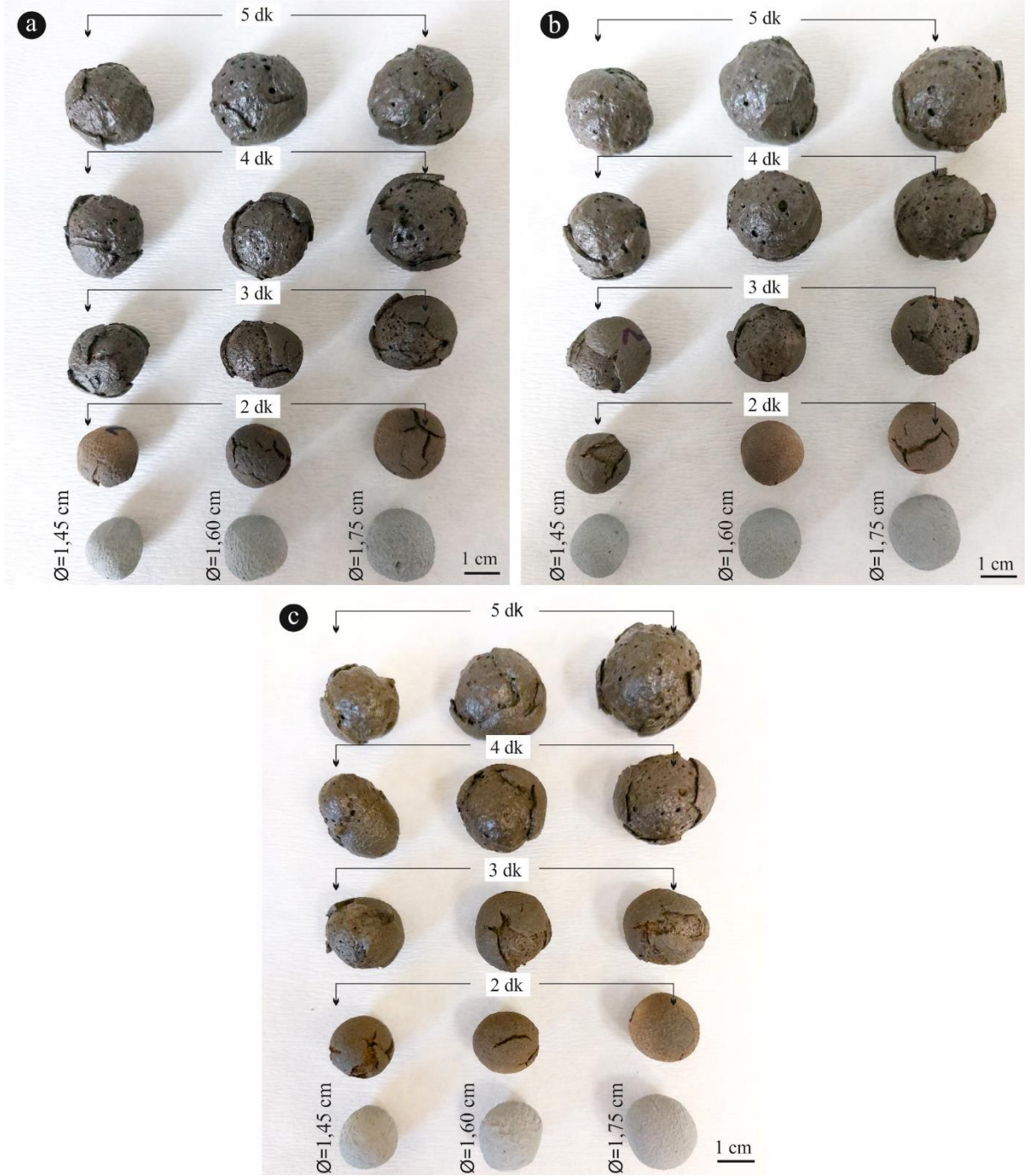
Şekil 3.4: El ile şekillendirilen numuneler ve onların genişletilmiş halleri.

Genleştirme işlemlerine devam edebilmek için, genişleme sonrası elde edilen ürünlerin küresel şekle yakın olması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, küresel şekle en yakın genişletilmiş numuneler olan CN artıkları, CB ve AR artıklarına eklenerek genişletme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Cebeci ve Arnavutköy agrega ocaklarında açığa çıkan artıklara ağırlıkça aynı oranda CN artıkları eklenmiştir. Böylelikle CN, CB-CN ve AR-CN kodlarıyla üç farklı grup oluşturulmuştur. Bire bir oranında karıştırılan CB-CN ve AR-CN karışımları kuru toz halinde iken mikser yardımıyla karıştırılmıştır. Cendere artıkları ve CB-CN, AR-CN karışımlarına ağırlıkça %35 su eklenerek el ile şekillendirilmiştir. Daha sonra bu numuneler 1200-1210 °C aralığında genişlemeye tabi tutulduğunda genellikle küresel yapı bozulmadan genişlediği gözlenmiştir (Şekil 3.5). Bu durumda, CB ve AR artıklarına CN artıkları eklenerek genişletme işlemlerine devam edilmiştir. CN artıkları ise genişleme aşamasında küresel formunu bozmadığı için herhangi bir malzeme ile karıştırılmadan genişletilmiştir. Çalışmanın bu aşamasından sonra gerçekleştirilen bütün genişletme işlemlerinde CB ve AR artık numunelerinde CN katkı malzemesi olarak kullanılmış olup, numunelerin kodlandırılmaları yine CB* ve AR* olarak kabul edilmiştir.

3.3.2. Genleştirilecek Numunelerin Boyut ve Sürelerinin Belirlenmesi

Çalışma kapsamında genleştirilecek olan numunelerin porozite, su emme, birim ağırlık, dayanım gibi fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenip, uluslararası alanda üretimi yapılan diğer agregalar ile kıyaslama yapılacağından üretilecek ürünlerin yeterli sayıda olması gerekmektedir. Bu kapsamda birçok boyut ve farklı sürelerde daha az ürün üretmek yerine, belli bir süre ve boyutlarda her grup artık numunelerinden daha fazla üretim yapmak adına boyut ve gerekli süreler belirlenmiştir. Bu kapsamda her grup artıklardan ikişer adet yaklaşık olarak 1,45

cm, 1,60 cm ve 1,75 cm çaplara sahip küre şekilli numuneler hazırlanmış olup, numuneler 2 dk., 3 dk., 4 dk. ve 5 dk. gibi sürelerle 1200-1210 °C aralığında genleşme testlerine tabi tutulmuştur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: Artıkların farklı boyut ve sürelerde geniştirilmesi, a: AR*, b: CN, c: CB*.

İdeal genleşme süresinin belirlenebilmesi için numunelerin genişip genişmediğini belirten parametre olan birim ağırlık ve dayanıklılığını belirten parametre olan yenilme yükleri belirlenmiştir. Buna göre çapı 1,45 cm olan numuneler 2 dk. genişmeye tabi tutulduğunda her üç grubun birim ağırlıklarının 1 gr/cm^3 'ten fazla olduğu saptanmıştır (Şekil 3.6a). Aynı boyuttaki artıklarda süre 3 ve üzeri dakikalara çıkarıldığında ise birim ağırlığın 1 gr/cm^3 'ün altına düştüğü görülmektedir. Bu durum artık numunelerinin geniştiğini göstermektedir. Dolayısıyla bu boyuttaki numunelerin genişebilmesi için artık numunelerinin en az 3 dakika fırında bekletilmesi gerekmektedir. Bu boyuttaki artıklar 2 dakika genleşme testine tabi tutulduktan sonra numunelere yenilme testi uygulandığında, CB* numuneleri 511,1 ve 777 N, CN numuneleri 583,7 ve 556,2 N, AR* numunelerinin ise 485,6 ve 372,8 N yükleri altında yenildiği saptanmıştır (Tablo 3.1). Genleşme süresinin 3 dk. ya çıkarılması durumunda genişen numunelerin yenilme yükleri 2 dk. geniştirilen numunelere kıyasla daha az olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.6b). Genleştirme süresinin artmasıyla birlikte bu grup numunelerinin yenilme yüklerinin azalmasıyla deneyler 5 dk. dan sonra durdurulmuştur. Bu sonuçlara göre çapı yaklaşık 1,45 cm olan küre şekilli numuneler için ideal genleşme süresi 3 dk. olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.1: 1,45 cm çaplı agregaların yenilme yükleri ve birim ağırlık değerleri.

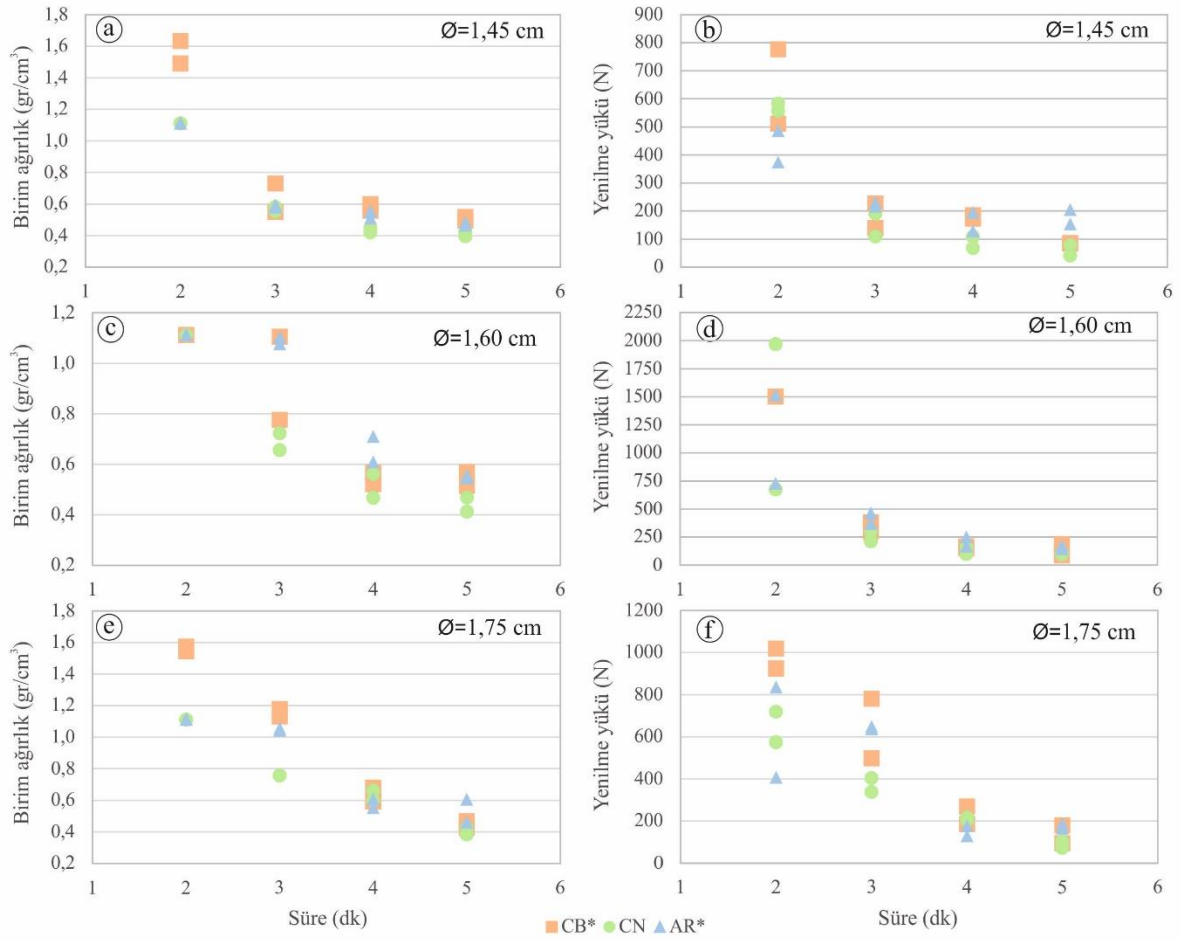
Genleşme öncesi			Genleşme sonrası								
Kod	W _k (gr)	V (cm ³)	W _k (gr)	W _p + W _k (gr)	V _p + V (cm ³)	V _p (cm ³)	V (cm ³)	GO (%)	γ (gr/cm ³)	F _c (N)	Genleşme süresi (dk)
CB*-1	2,91	1,61	2,65	3,12	2,2	0,423	1,777	11	1,49	511,1	2
CB*-2	2,84	1,57	2,65	3,18	2,1	0,477	1,623	3	1,63	777,0	2
CB*-3	2,89	1,60	2,67	3,39	4,3	0,648	3,652	129	0,73	227,6	3
CB*-4	2,80	1,55	2,62	3,32	5,4	0,63	4,77	208	0,55	139,3	3
CB*-5	2,85	1,57	2,63	3,39	5,4	0,684	4,716	200	0,56	173,6	4
CB*-6	2,85	1,57	2,64	3,41	5,1	0,693	4,407	180	0,60	185,4	4
CB*-7	2,80	1,55	2,63	3,32	5,7	0,621	5,079	228	0,52	84,4	5
CB*-8	2,85	1,57	2,68	3,44	6,1	0,684	5,416	244	0,49	86,3	5
CN-1	2,85	1,63	2,56	3,25	2,3	0,621	1,679	3	1,52	583,7	2
CN-2	2,72	1,62	2,51	3,21	2,4	0,63	1,77	9	1,42	556,2	2
CN-3	2,84	1,62	2,54	3,25	5,0	0,639	4,361	169	0,58	190,3	3
CN-4	2,75	1,57	2,52	3,23	5,2	0,639	4,561	190	0,55	109,9	3
CN-5	2,80	1,60	2,57	3,45	6,9	0,792	6,108	282	0,42	68,7	4
CN-6	2,80	1,60	2,56	3,29	6,4	0,657	5,743	259	0,45	108,9	4
CN-7	2,80	1,60	2,54	3,53	6,9	0,891	6,009	276	0,42	41,2	5
CN-8	2,75	1,57	2,52	3,36	7,1	0,756	6,344	304	0,40	78,5	5
AR*-1	2,90	1,61	2,7	3,31	2,3	0,549	1,751	9	1,54	485,6	2
AR*-2	2,90	1,61	2,7	3,34	2,4	0,576	1,824	13	1,48	372,8	2
AR*-3	2,90	1,61	2,73	3,47	5,4	0,666	4,734	194	0,58	215,8	3
AR*-4	2,90	1,61	2,71	3,39	5,2	0,612	4,588	185	0,59	228,6	3
AR*-5	2,90	1,61	2,69	3,38	5,5	0,621	4,879	203	0,55	194,2	4
AR*-6	2,90	1,61	2,69	3,48	6,0	0,711	5,289	228	0,51	127,5	4
AR*-7	2,90	1,61	2,69	3,49	6,5	0,72	5,78	259	0,47	204,0	5
AR*-8	2,90	1,61	2,69	3,6	6,4	0,819	5,581	246	0,48	153,0	5

1,6 cm çaplara sahip küre şekilli numuneler hazırlanıp, farklı sürelerde (2, 3, 4 ve 5 dk.) genleşme testlerine tabi tutularak bu boyuttaki numuneler için de ideal süre belirlenmiştir. Bu kapsamda öncelikle bu boyuttaki numuneler 2 dk. genleşme deneyine tabi tutulmuştur. İki dakikalık genleşme süresi ardından numunelerin birim ağırlıkları 1 gr/cm³'ün üzerinde kaldığı tespit edilmiştir (Şekil 3.6c). Bu numunelerin yenilme yükleri belirlendiğinde ise, CB* numunelerinin yaklaşık 1500 N'luk yüke kadar dayandığı, CN numuneleri 675,9 ve 1969,8 N'luk, AR* numunelerinin ise 725 ve 1511,7 N yükleri altında yenildiği saptanmıştır (Tablo 3.2). Süre bir dakika artırılarak tekrardan genleştirme gerçekleştirildiğinde CN numunelerinin birim ağırlıkları 1 gr/cm³'ün altına düşerken yani genleşme gerçekleşirken, CB* numunelerinden birisi ve AR* numunelerinden ise her ikisi de genleşme göstermemiştir (Şekil

3.6c). Üç dakikalık genleşme testinden sonra numunelerin yenilme yüklerinin 2 dk. ya kıyasla düştüğü de gözlenmiştir (Şekil 3.6d). Genleşme süresi 4 dk. ya çıkarıldığında ise CB* ve AR* numunelerinin tamamen genleştiği belirlenmiştir. Beşinci dakikada ise numuneler genleşme gösterirken dayanımları diğer sürelerle kıyasla oldukça düşmektedir (Şekil 3.6d). Bu sebeple çapı 1,6 cm olan numuneler için ideal genleşme süresi 4 dk. olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.2: 1,6 cm çaplı agregaların yenilme yükleri ve birim ağırlık değerleri.

Genleşme öncesi			Genleşme sonrası								
Kod	W _k (gr)	V (cm ³)	W _k (gr)	W _p + W _k (gr)	V _p + V (cm ³)	V _p (cm ³)	V (cm ³)	GO (%)	γ (gr/cm ³)	F _c (N)	Genleşme süresi (dk)
CB*-1	3,75	2,07	3,49	4,09	2,9	0,54	2,36	14	1,48	1500,9	2
CB*-2	3,75	2,07	3,44	4,15	3,1	0,64	2,46	19	1,40	1501,9	2
CB*-3	3,75	2,07	3,54	4,24	5,2	0,63	4,57	121	0,77	300,2	3
CB*-4	3,75	2,07	3,44	3,98	3,6	0,49	3,11	50	1,10	381,6	3
CB*-5	3,75	2,07	3,52	4,34	7,5	0,74	6,76	226	0,52	149,1	4
CB*-6	3,75	2,07	3,46	4,23	6,8	0,69	6,11	195	0,57	167,8	4
CB*-7	3,75	2,07	3,45	4,23	7,4	0,70	6,70	223	0,52	86,3	5
CB*-8	3,75	2,07	3,47	4,25	6,8	0,70	6,10	194	0,57	184,4	5
CN-1	3,85	2,20	3,56	4,1	3,2	0,49	2,71	23	1,31	1969,8	2
CN-2	3,85	2,20	3,58	4,15	3,5	0,51	2,99	36	1,20	675,9	2
CN-3	3,80	2,17	3,45	4,15	5,4	0,63	4,77	120	0,72	299,2	3
CN-4	3,80	2,17	3,49	4,25	6	0,68	5,32	145	0,66	212,9	3
CN-5	3,80	2,17	3,47	4,33	8,2	0,77	7,43	242	0,47	100,1	4
CN-6	3,80	2,17	3,48	4,26	6,9	0,70	6,20	185	0,56	161,9	4
CN-7	3,78	2,16	3,5	4,41	9,3	0,82	8,48	293	0,41	106,9	5
CN-8	3,78	2,16	3,48	4,56	8,4	0,97	7,43	244	0,47	96,1	5
AR*-1	3,85	2,14	3,56	4,21	3,1	0,59	2,52	18	1,42	1511,7	2
AR*-2	3,85	2,14	3,62	4,23	3,3	0,55	2,75	29	1,32	725,0	2
AR*-3	3,85	2,14	3,63	4,32	4	0,62	3,38	58	1,07	461,1	3
AR*-4	3,85	2,14	3,62	4,3	3,9	0,61	3,29	54	1,10	369,8	3
AR*-5	3,85	2,14	3,66	4,36	5,8	0,63	5,17	142	0,71	167,8	4
AR*-6	3,85	2,14	3,66	4,41	6,7	0,68	6,03	182	0,61	248,2	4
AR*-7	3,85	2,14	3,63	4,37	7,2	0,67	6,53	205	0,56	169,7	5
AR*-8	3,85	2,14	3,61	4,48	7,4	0,78	6,62	209	0,55	142,2	5



Şekil 3.6: Farklı boyutlarda hazırlanan CB*, CN, AR* numunelerinin farklı sürelerdeki genişmeleriyle elde edilen birim ağırlık ve yenilme yükleri.

Çapları 1,75 cm olan küre şekilli numuneler genişme testlerine tabi tutulduğunda, 2 dk. sonunda her üç grup numunelerin birim ağırlıkları 1 gr/cm^3 'ün üzerinde olduğu dolayısıyla genişmediği saptanmıştır (Şekil 3.6e). İki dakika sonunda CB* numunelerinin yenilme yükleri 1018,3 ve 923,1 N, CN numunelerinin 719,1 ve 573,9 N, AR* numunelerinin ise 833,9 ve 404,2 N olarak bulunmuştur (Tablo 3.3). Genleştirme süresinin artırılmasıyla birlikte numuneler genişirken yenilme yükleri de azalmaktadır. Beş dakika genişmeye tabi tutulan numunelerde yenilme yükleri daha da azaldığından, bu grup numuneler için ideal genişme süresinin 4 dk. olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.6f). Leca firması tarafından üretilen ve yaygın olarak satışı gerçekleştirilen genişleştirilmiş kil agregaları daha çok jeoteknik problemlerin çözümlerinde kullanılırken tercih edilen boyutlar çoğunlukla 2 cm'nin altındadır. Genleştirmeden önceki çapı

1,75 cm olan numuneler 4 dk. süre ile genişletildiğinde çapları 2,5 cm seviyelerine kadar çıktığı için bu çaptaki numuneler tercih edilmemiştir.

Artık numunelerinin ideal genişleme süreleri ve boyutları belirlenirken ikişer adet numune kullanılmıştır. Bu numuneler yenilme testlerine tabi tutulduğunda ise aynı agrega ocağına ait numuneler olmasına rağmen yenilme yükleri arasında fark bulunmaktadır (Tablo 3.3). Örneğin, 1,45 çapa sahip CN numuneleri 4 dk. genişletildikten sonra yenilme yükleri 7 ve 11,1 kg olarak bulunurken AR* numunelerinde ise 13,0 ve 19,8 kg olarak bulunmuştur (Tablo 3.3). Numunelerin yenilme yüklerini daha doğru belirlemek adına her grup örnekten 40 adet numune hazırlanmış ve genişlemeye tabi tutulmuştur.



Tablo 3.3: 1,75 cm çaplı agregaların yenilme yükleri ve birim ağırlık değerleri.

Genleşme öncesi			Genleşme sonrası								
Kod	W _k (gr)	V (cm ³)	W _k (gr)	W _p + W _k (gr)	V _p + V (cm ³)	V _p (cm ³)	V (cm ³)	GO (%)	γ (gr/cm ³)	F _c (N)	Genleşme süresi (dk)
CB*-1	4,85	2,68	4,5	5,1	3,4	0,54	2,86	7	1,57	1018,3	2
CB*-2	4,85	2,68	4,5	5,15	3,5	0,59	2,92	9	1,54	923,1	2
CB*-3	4,90	2,71	4,58	5,3	4,7	0,65	4,05	50	1,13	496,4	3
CB*-4	4,90	2,71	4,53	5,25	4,5	0,65	3,85	42	1,18	779,9	3
CB*-5	4,90	2,71	4,54	5,35	8,3	0,73	7,57	180	0,60	267,8	4
CB*-6	4,90	2,71	4,6	5,41	7,4	0,73	6,67	146	0,69	184,4	4
CB*-7	4,90	2,71	4,56	5,34	11,4	0,70	10,70	295	0,43	93,2	5
CB*-8	4,90	2,71	4,55	5,39	10,5	0,76	9,74	260	0,47	178,5	5
CN-1	4,80	2,74	4,39	5,25	3,8	0,77	3,04	11	1,45	719,1	2
CN-2	4,80	2,74	4,4	5,28	3,82	0,79	3,03	10	1,45	573,9	2
CN-3	4,80	2,74	4,38	5,07	6,4	0,62	5,78	111	0,76	403,2	3
CN-4	4,80	2,74	4,36	5,06	6,4	0,63	5,77	110	0,76	337,5	3
CN-5	4,80	2,74	4,4	5,12	8	0,65	7,35	168	0,60	216,8	4
CN-6	4,80	2,74	4,43	5,22	7,4	0,71	6,69	144	0,66	201,1	4
CN-7	4,83	2,76	4,41	5,42	12,4	0,91	11,49	316	0,38	104,0	5
CN-8	4,83	2,76	4,42	5,49	11,4	0,96	10,44	278	0,42	71,6	5
AR*-1	4,95	2,75	4,6	5,4	3,8	0,72	3,08	12	1,49	404,2	2
AR*-2	4,95	2,75	4,62	5,42	3,7	0,72	2,98	8	1,55	833,9	2
AR*-3	4,90	2,72	4,53	5,25	3,68	0,65	3,03	11	1,49	634,7	3
AR*-4	4,90	2,72	4,54	5,42	5,1	0,79	4,31	58	1,05	645,5	3
AR*-5	4,90	2,72	4,53	5,51	9,1	0,88	8,22	202	0,55	173,6	4
AR*-6	4,90	2,72	4,54	5,54	8,4	0,90	7,50	176	0,61	126,5	4
AR*-7	4,90	2,72	4,54	5,56	10,8	0,92	9,88	263	0,46	161,9	5
AR*-8	4,90	2,72	4,61	5,58	8,5	0,87	7,63	180	0,60	182,5	5

3.3.3. Artık Numunelerinin Genleşme Oranlarının Saptanması

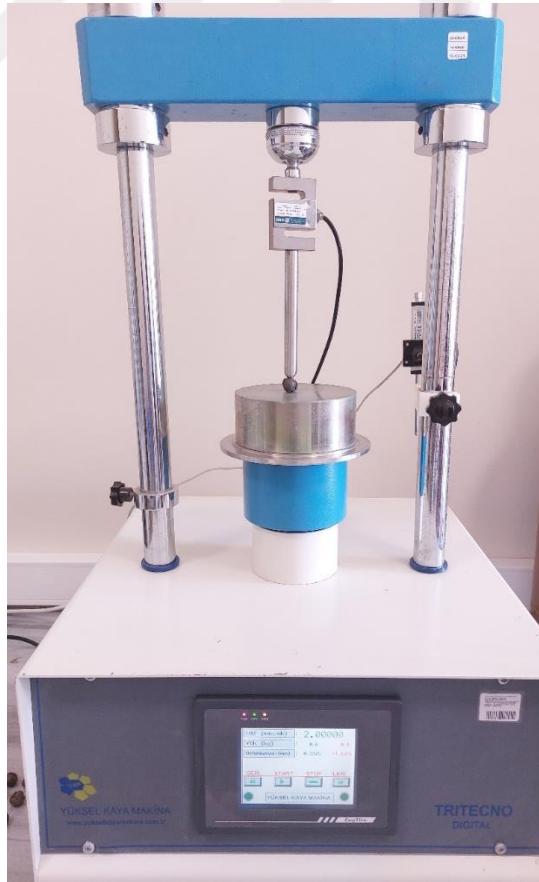
Artık numunelerinin genleşme oranlarının bulunabilmesi için, numunelerin genleşmeden önceki ve sonraki ağırlık ve hacimleri belirlenmiştir. Genleşmeden sonra numuneler hem düzenli bir şekle sahip olmadığından hem de boşluklu yapıya sahip olduğundan hacimleri Arşimet prensibi ile bulunmuştur. Genleşen numuneler, numunelerin gözeneklerinin suyla dolmaması için ölçülü kaba daldırılmadan önce parafin film ile kaplanmıştır. Genleşen numune parafin film ile kaplandıktan sonra suya daldırıldığında tamamen batmamakta ve su yüzeyinde kalmaktadır. Bu durumu önlemek için numune, hacmi bilinen ve sudan daha yoğun bir malzeme ile ölçülü kaba atılarak hacmi belirlenmiştir. Belirlenen bu hacim değeri, parafin film ve

numunenin toplam hacmi olduğundan, parafin filmin hacminin toplam hacimden çıkarılması gerekmektedir. Bu durumda, kullanılan parafin filmin yoğunluğu bilindiğinden (0.9 gr/cm^3) ve ağırlığı da önceden belirlendiğinden parafin filmin hacmi hesaplanmıştır. Böylelikle, toplam hacim değerinden, parafin filmin hacmi değeri çıkarılarak örneklerin genişmeden sonraki hacimleri hesaplanmıştır. Yapılan bu hesaplamalar sonucunda ise denklem 3.1 yardımıyla numunelerin genişleme oranları saptanmıştır:

$$GO(\%) = \frac{GSH - GÖH}{GÖH} \times 100 \quad (3.1)$$

3.3.4. Genleştirilen Numunelerin Yenilme Yüklerinin Saptanması

Numuneler genişletildikten sonra düzenli bir şekle sahip olmadıkları için birçok araştırmacı tarafından numunelerin sadece kırılma/yenilme yükleri belirlenmiştir. Bu kapsamda, CB*, CN ve AR* numuneleri genişletildikten sonra 500 kg kapasiteli pres makinesi yardımıyla yenilme yükleri belirlenmiştir (Şekil 3.7). Numuneler dakikada 2 mm deformasyon oluşturacak hızda kırılmıştır.



Şekil 3.7: Genleştirilen numunelerin yenilme yüklerinin belirlendiği pres makinesi.

3.3.5. Genleştirilmiş Kil Agregalarının Mekanik Değerlerinin Belirlenmesi

Jaeger (1967), Broch ve Franklin (1972), McDowell ve diğ., (1996) düzensiz şekle sahip olan zemin veya kaya malzemeleri için nokta yük değerleri kullanılarak gerilme hesabının yapılabileceğini önermiştir. Gerilme hesabı için önerilen formül denklem 3.2’de verilmiştir.

$$\sigma = \frac{F_c}{\phi^2} \quad (3.2)$$

Bernhardt ve diğ., (2013) ise önerilen denklem 3.2’nin genleştirilmiş kil agregaları için de kullanılabileceğini belirtmiştir. Fakat bu denklemin kullanılabilmesi için genleştirilmiş kil agregalarının porozite değerlerinin %82’den fazla olmaması gerektiği belirtilmiştir. Porozite değerinin %82’den fazla olması durumunda denklem 3.2’nin gerilme hesabında kullanılmaması gerektiği belirtilmiştir. Çalışma kapsamında genleştirilen numunelerin porozite değerleri %82’den az olduğu için denklem 3.2 kullanılarak agregaların gerilme değerleri hesaplanmıştır.

Genleştirilmiş kil agregalarının kırılma dayanımları belirlenirken tek bir dane üzerinde deney yapılmaktan ziyade BS EN 13055-1 standardında belirtilen kriterlere göre dayanım belirlenmektedir. Fakat bu standarda göre dayanım belirlenebilmesi için üretilen agreganın miktarının en az 10,5 litre ve farklı boyutlarda olması gerekmektedir. Standarda göre yaklaşık bir litre hacme sahip silindirik tüpe 4-8 mm, 8-16 mm ve 16-22 mm boyut aralığında genleştirilmiş kil agrega yerleştirilerek deney yapılmaktadır. Deney yapılmadan önce titreşim yardımıyla agregalar arası boşluklar doldurulmaktadır. Bu işlem, segregasyona neden olmadan gerçekleştirilmelidir. Standarda uygun olarak dayanım parametresinin elde edilebilmesi için gerekli agrega üretiminin laboratuvar ortamında sabit ve düşük hacimli fırınlarda gerçekleştirilmesi zor olduğundan, bu çalışmada bu standart uygulanamamıştır. Bernhardt ve diğ., (2013) bu probleme dikkat çekerek, BS EN 13055-1 standardını kullanmadan genleştirilmiş kil agregalarında kırılma dayanımının tahmin edilebileceğini ortaya koymuştur. Bu kapsamda denklem 3.3 yardımıyla sabit fırınlar ile laboratuvarda üretilen genleştirilmiş kil agregalarının kırılma dayanımları tahmin edilmiştir. Araştırmacının önermiş olduğu bu denklem yardımıyla CB*, CN ve AR* agregalarının kırılma dayanımları (C) hesaplanmıştır.

$$C = \frac{F_c}{\phi^2} x 0,74$$

(3.3)



4. BULGULAR

4.1. ARTIKLARIN SICAKLIĞA MARUZ BIRAKILMADAN ÖNCEKİ ÖZELLİKLERİ

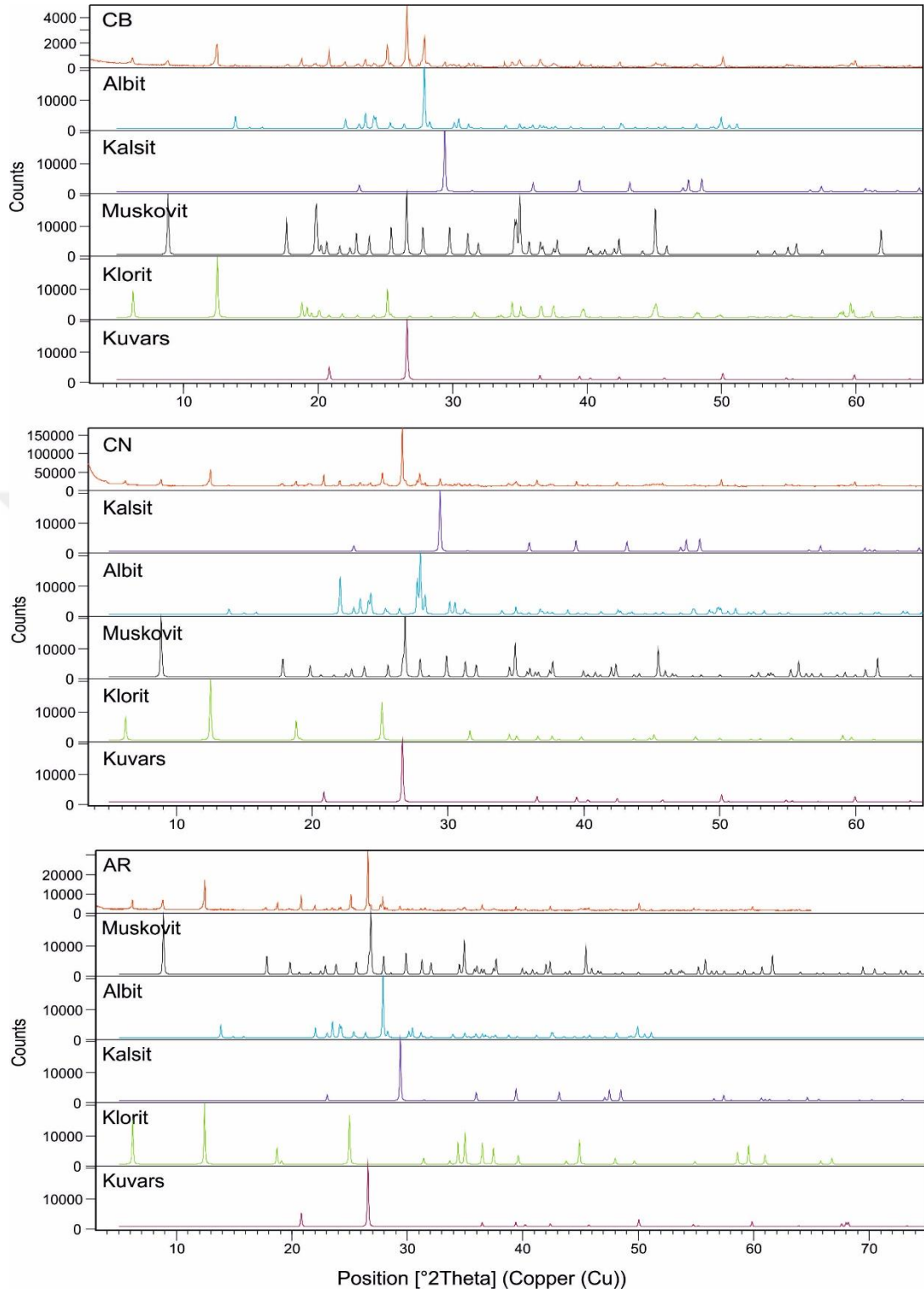
4.1.1. Artıkların Mineralojik Bileşimi

Cebeci, Cendere ve Arnavutköy agrega ocaklarında açığa çıkan fitre pres artıklarının mineralojik bileşimleri benzerlik sunmakta olup, kuvars, albit, muskovit, klorit ve kalsit minerallerinden oluşmaktadır (Şekil 4.1).

Cebeci agrega ocağı artıkları %27 kuvars, %25,9 klorit, %21,2 albit, %17,4 muskovit, %3,8 kalsit mineralleri ve %4,8 organik maddeden oluşmaktadır (Tablo 4.1). Cebeci agrega ocaklarına ait artıkların toplam uçucu mineral (muskovit, klorit kalsit) ve organik madde miktarı %51,8'dir. Cendere agrega ocağı artıkları %25,5 kuvars, %23,9 klorit, %21 muskovit, %17,6 albit, %6 kalsit mineralleri ve %6 organik maddeden oluşmaktadır. Cendere agrega ocaklarına ait artıkların toplam uçucu mineral ve organik madde içeriği ise %56,9 olarak bulunmuştur (Tablo 4.1). Arnavutköy agrega ocaklarında açığa çıkan artıklar % 29,6 kuvars, %23,4 klorit, %22,1 albit, %17,3 muskovit, %4,3 kalsit mineralleri ve %3,3 organik madde içermektedir. Arnavutköy agrega ocaklarının uçucu mineral ve organik madde içeriği Cebeci ve Cendere agrega ocağı artıklarına kıyasla az olmakta olup, toplam %48,2'dir (Tablo 4.1).

Tablo 4.1: Artıkların yüzde olarak mineral bileşimi.

Artıkların mineral bileşimi (ağırlıkça %)	CB	CN	AR
Kuvars	27.0	25.5	29.6
Albit	21.2	17.6	22.1
Muskovit	17.4	21.0	17.3
Klorit	25.9	23.9	23.4
Kalsit	3.8	6.0	4.3
Organik madde	4.8	6.0	3.3



Şekil 4.1. Ham artıkların XRD analiz sonuçları.

4.1.2. Artıkların Jeokimyası

Cebeci bölgesinde agrega ocaklarından açığa çıkan artıkların SiO₂ içeriği %56.12, Al₂O₃ içeriği %17.47, ergiticilerin (CaO, Na₂O, Fe₂O₃, K₂O, MgO) toplamı %19.05 ve ateşte kayıp değeri %5.96 olarak bulunmuştur (Tablo 4.2). Cendere agrega ocaklarına ait artıkların %53.35 SiO₂, %17.84 Al₂O₃, %19.38 ergitici içeriğine ve %7.66 ateşte kayıp değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Arnavutköy agrega ocaklarına ait artıklar %58.69 SiO₂, %17.84 Al₂O₃, %18.28 ergitici içeriğine ve %5.44 ateşte kayıp değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4.2: Artıkların anaoksit kimyası.

Örnek Kodu	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	A.K.*	Toplam
AR	58,69	0,98	15,79	7,70	0,14	3,42	2,64	2,48	2,04	0,19	5,44	99,51
CN	53,35	1,10	17,84	7,66	0,12	3,69	3,57	1,97	2,48	0,22	7,66	99,67
CB	56,19	1,03	17,47	8,16	0,18	4,14	2,33	2,37	2,05	0,20	5,96	100,07

4.1.3. Artıkların Dane Boyutları

Cebeci, Cendere ve Arnavutköy agrega ocağı artıklarının yaklaşık olarak %8.1 civarında kil, %83.3 civarında silt ve %8.6 civarında ince kum boyutunda malzemelerden oluştuğu belirlenmiştir. Ayrıca söz konusu artık numunelerinin D_v(90), D_v(50) ve D_v(10) değerleri belirlenmiş ve Tablo 4.3’de sunulmuştur. Bu verilere göre artık numunelerinin %90’ının dane çapı CB için 71 µm, CN için 56 µm ve AR için 77 µm’den küçük olduğu saptanmıştır (Tablo 4.3).

Tablo 4.3: Artıkların dane boyutu dağılımları.

Örnek kodu	D _v (10) µm	D _v (50) µm	D _v (90) µm
CB	2,301	12,361	70,797
CN	2,031	11,166	55,794
AR	2,291	13,635	76,377

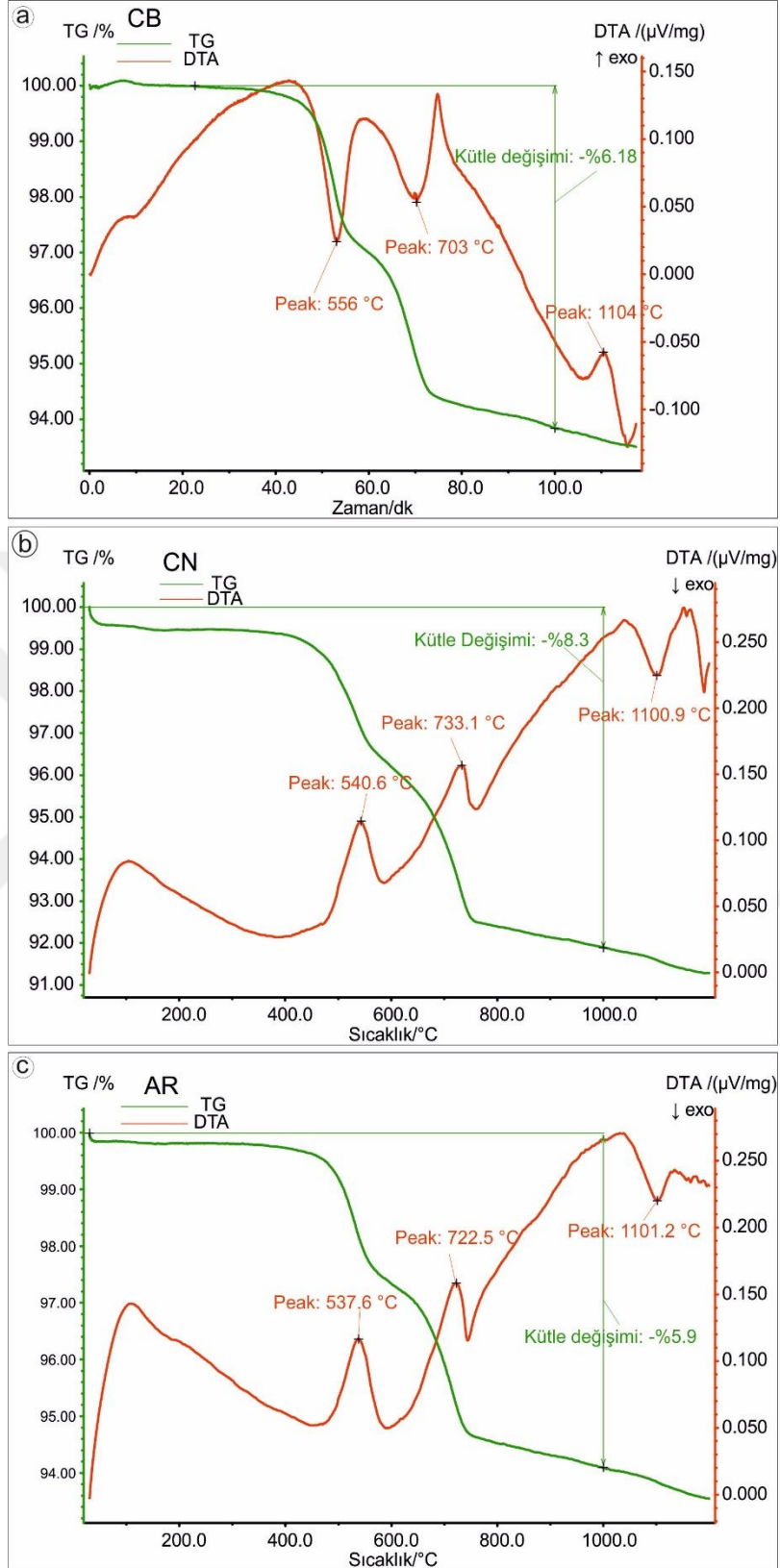
4.1.4. Artıkların Termal Özellikleri

DT analizleri sonucunda CB numunelerinde 540-560 °C ve 700-720 °C aralıklarında endotermik, 1100-1120 °C aralığında ise ekzotermik reaksiyonların meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 4.2a). Cendere agrega ocaklarına ait artık numunelerinde yaklaşık 530-550 °C 720-750 °C aralıklarında endotermik, 1100-1120 °C aralığında ise ekzotermik reaksiyonların meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 4.2b). AR numunelerinde ise 520-550 °C ve 710-730 °C aralıklarında endotermik, 1100-1120 °C aralığında ise ekzotermik reaksiyonların olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.2c).

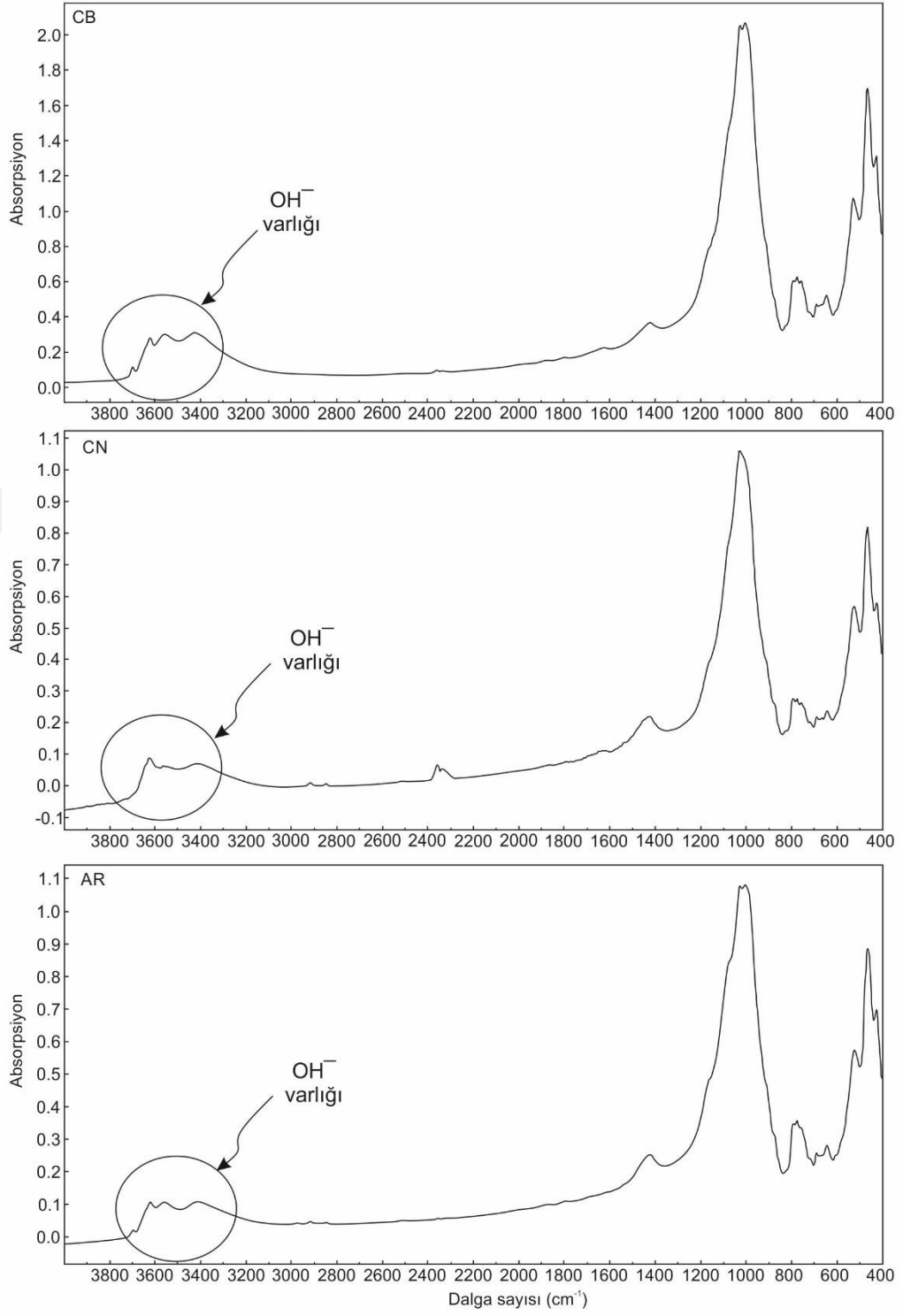
Termogravimetrik analizler sonucunda Cebeci, Cendere, Arnavutköy agrega ocaklarına ait artıklarda kütle kaybı endotermik reaksiyonlar sonucunda iki kademe gerçekleşmiştir. İlk endotermik reaksiyonların gerçekleştiği sıcaklık aralığında (520-560 °C) artıklarda yaklaşık olarak %2,5-3,5 kütle kaybı meydana gelirken, ikinci endotermik reaksiyonların gerçekleştiği sıcaklık aralığında (700-750 °C) ise kütle kaybı %3-4 aralığındadır (Şekil 4.2).

4.1.5. Artıkların FTIR Analizleri

Kızılötesi ışınlar kullanılarak minerallerdeki atom ve/veya moleküller arasındaki bağların varlığı ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Bu analiz yönteminde özellikle OH⁻ moleküllerini içeren minerallerde hidroksil moleküllerinin varlığı belirlenmiştir. Ayrıca farklı sıcaklarda OH⁻ moleküllerinin davranışları da bu yöntemle belirlenmiştir. Buna göre Cebeci, Cendere ve Arnavutköy agrega ocaklarında açığa çıkan artıkların FTIR analizleri gerçekleştirilmiş olup, üç bölgeye ait artıkların FTIR grafiklerinin benzerlik sunduğu gözlenmiştir (Şekil 4.3). Analizler sonucunda elde edilen FTIR grafiklerinde CB, CN ve AR numunelerinde 3400-3700 cm⁻¹ dalga sayısı aralığına sahip bölgelerde birden fazla pikin art arda olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.3). Her üç bölgeye ait artıkların FTIR grafiklerinde dalga sayısının 1400 cm⁻¹ olduğu bölgelerde de hafif bir pik alındığı gözlenmiştir. Artıkların en yoğun pik verdiği dalga sayısı aralığı yaklaşık 1000-1020 cm⁻¹'dir (Şekil 4.3). Bu dalga sayısı aralığından küçük bölgelerde oldukça sık ve yoğun pik varlığı da gözlenmiştir.



Şekil 4.2: Artıkların DTA ve TG grafikleri, a: Cebeci agrega ocakları artıkları, b: Cendere agrega ocakları artıkları, c: Arnavutköy agrega ocakları artıkları.



Şekil 4.3: Artıkların FTIR analiz grafikleri.

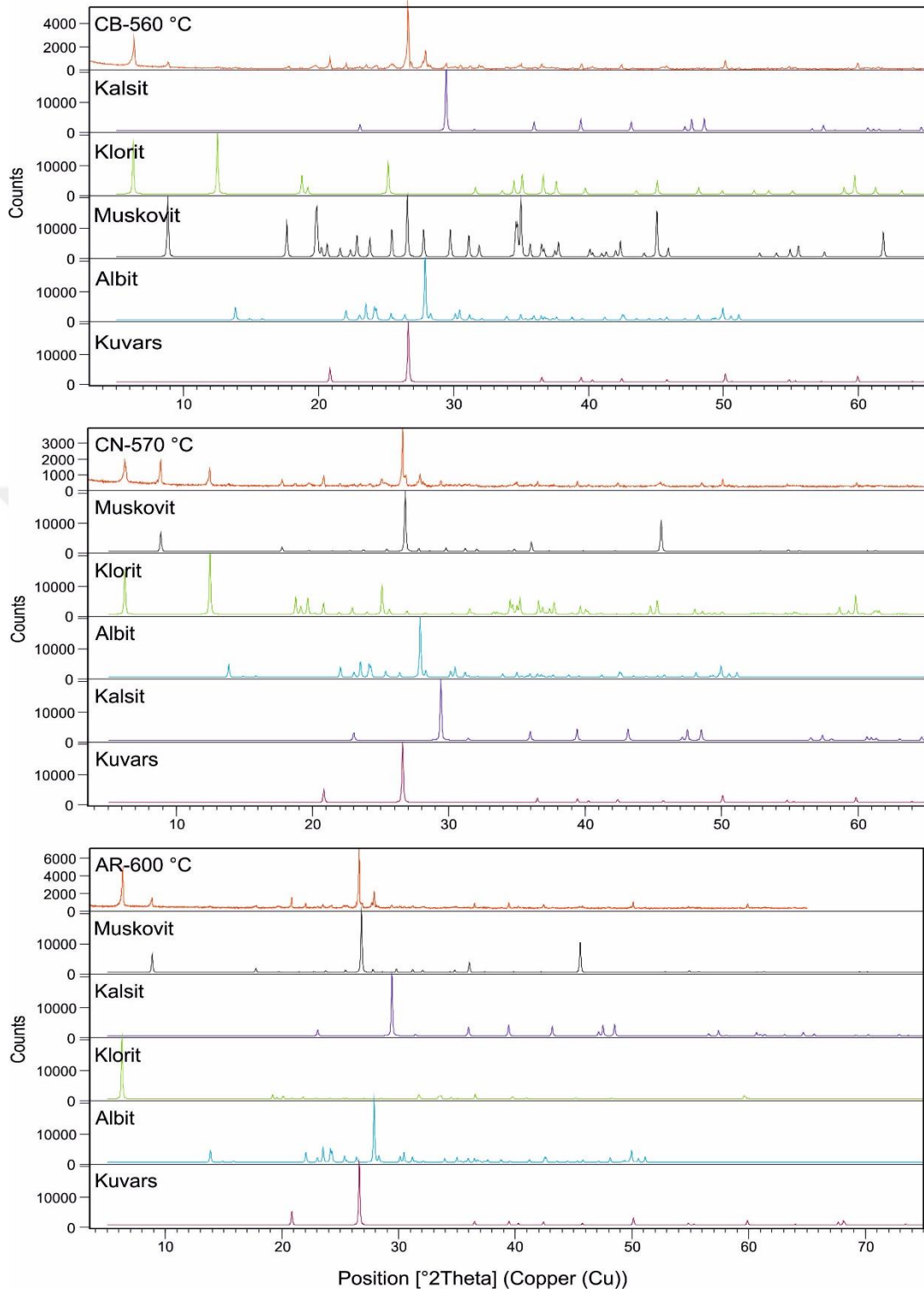
4.2. ARTIKLARIN FARKLI SICAKLIKLARA MARUZ BIRAKILDIKTAN SONRAKI ÖZELLİKLERİ

4.2.1. Artıkların Mineralojik Bileşimindeki Değişimler

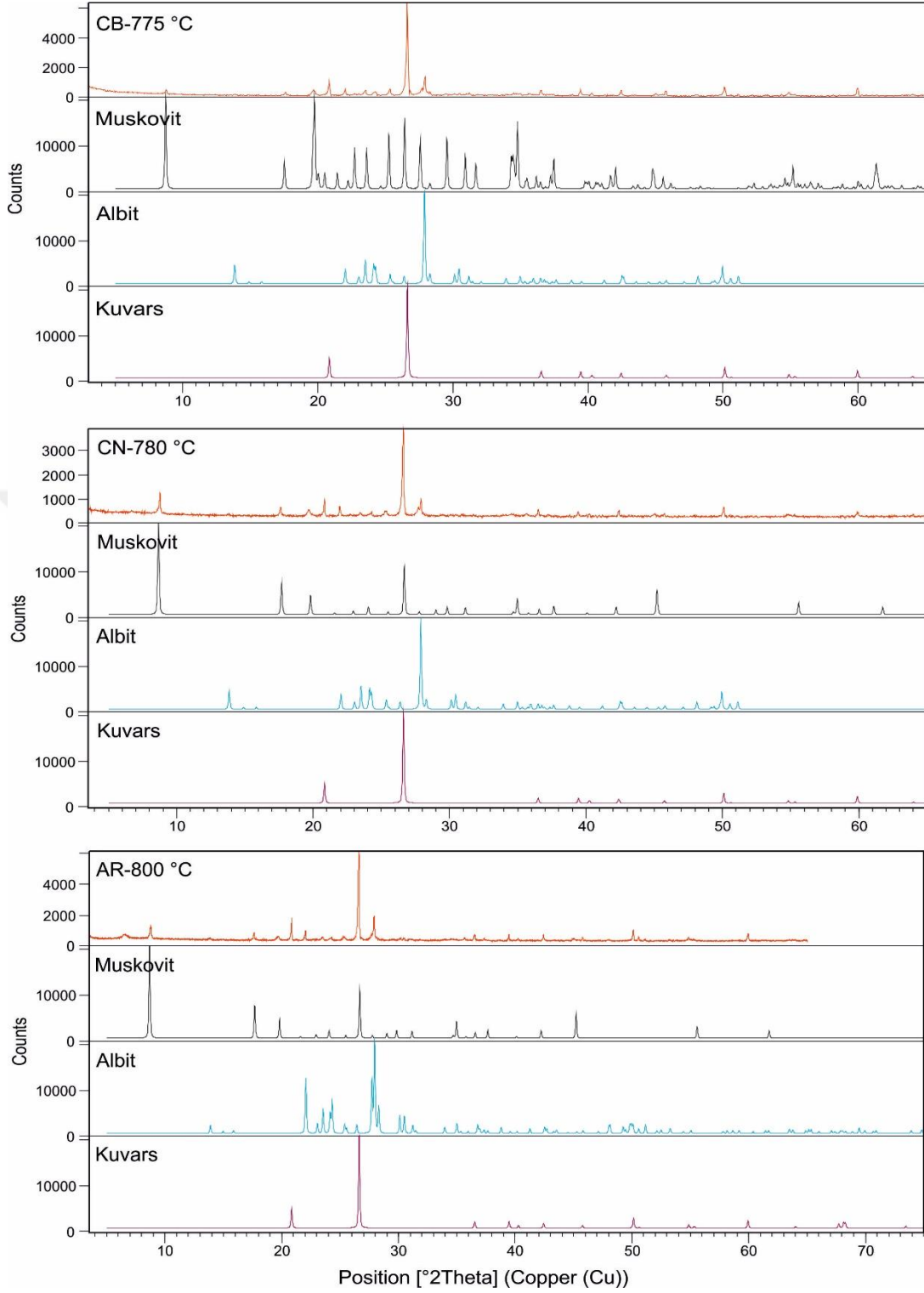
Üç farklı agrega ocağından alınan artık numunelerinin ilk endotermik sıcaklık aralığı 550-560 °C olarak belirlenmiştir ve bu sıcaklık aralığındaki mineralojik bileşimlerin belirlenmesi için numuneler ikişer saat fırında bekletildikten sonra XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Cebeci, Cendere ve Arnavutköy agrega ocaklarından alınan artık numunelerinin 560-600 °C aralığındaki mineralojik bileşimleri birbirleriyle benzerlik sunmakta olup, kuvars, klorit, muskovit, albit ve kalsit minerallerinden oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 4.4). Buna göre her üç bölgeye ait agrega ocağı artıklarının 560-600 °C aralığındaki mineralojik bileşimleri ham madde bileşimleri ile benzerlik gösterdiği saptanmıştır.

İkinci endotermik reaksiyonların gerçekleştiği sıcaklık aralığındaki (700-720 °C) mineralojik değişimler belirlenmiş olup, CB, CN ve AR numunelerinin mineralojik bileşimlerinin birbirleriyle benzerlik sunduğu saptanmıştır. Buna göre, artıkların ikinci endotermik reaksiyon sıcaklıkları aralığındaki mineralojik bileşimleri kuvars, muskovit ve albit olarak belirlenmiştir (Şekil 4.5). Ham maddeler ile kıyaslandığında 775-800 °C aralığında iki saat bekletilen CB, CN, AR numunelerinde klorit ve kalsit minerallerinin olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 4.5). Bu sıcaklık aralığındaki numunelerde yeni bir mineral fazlarının oluşmadığı da gözlenmiştir.

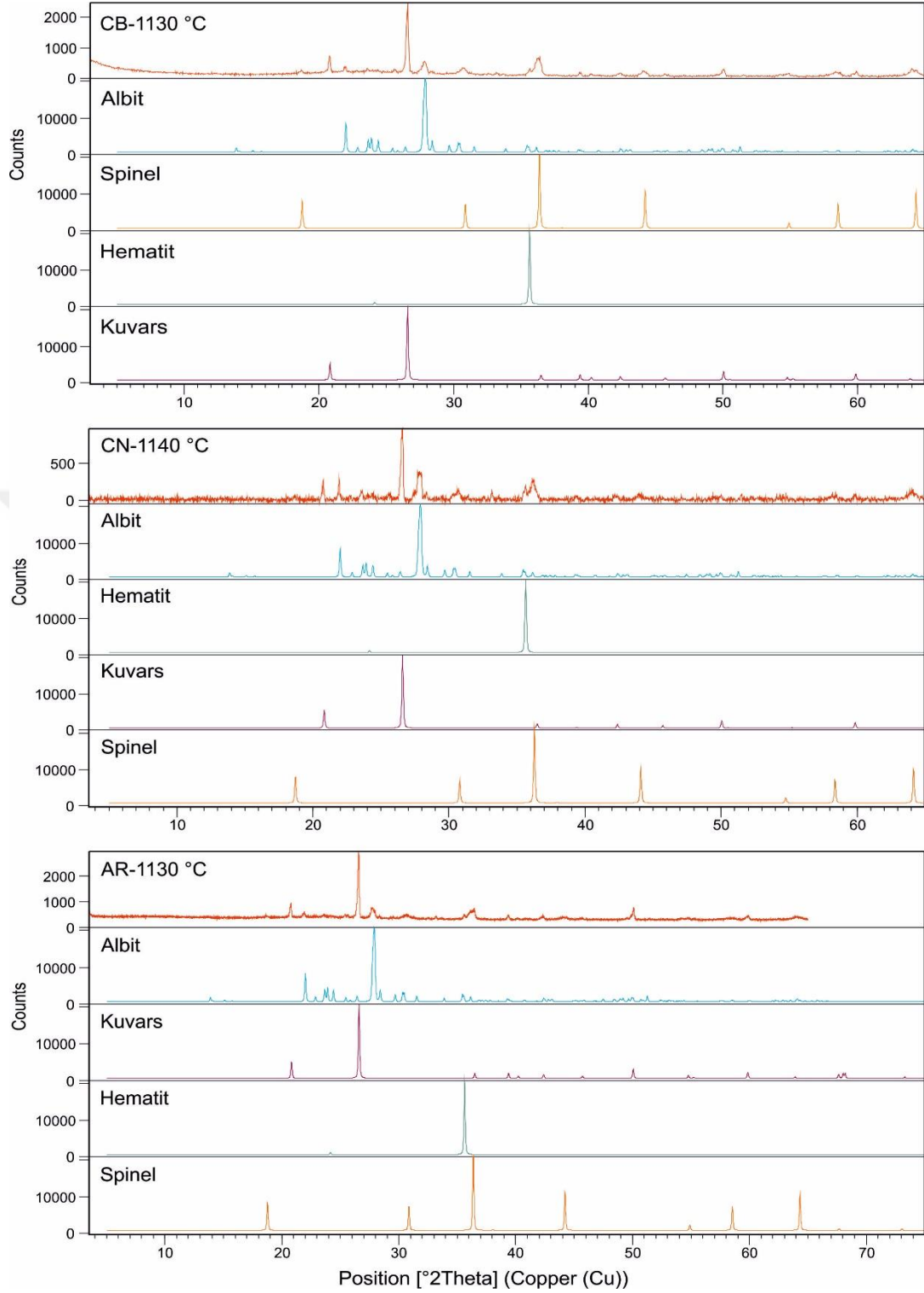
CB, CN, AR artık numunelerinde ekzotermik reaksiyonların gerçekleştiği 1130-1140 °C sıcaklık aralığındaki numunelerin XRD analizleri, bu numunelerde yeni mineral fazlarının oluştuğunu göstermiştir (Şekil 4.6). Bu sıcaklık aralığındaki numunelerin yeni mineral bileşimi kuvars, albit, hematit ve spinel olarak belirlenmiştir. Sıcaklığın bu değerlere çıkarılmasıyla birlikte CB, CN, AR artıklarının XRD analizlerinde klorit, muskovit ve kalsit piklerinin kaybolduğu gözlenmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.4: CB, CN, AR numunelerinin 560-600 °C aralığında ısıtıldıktan sonraki mineralojik bileşimleri.



Şekil 4.5: CB, CN, AR numunelerinin 775-800 °C aralığında ısıtıldıktan sonraki mineralojik bileşimleri.



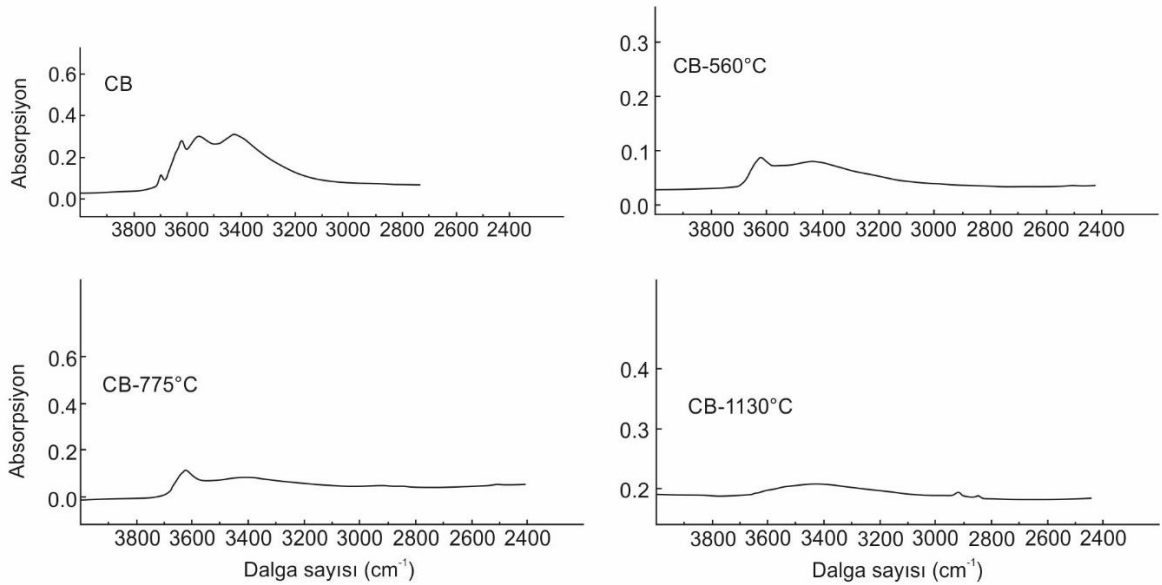
Şekil 4.6: CB, CN, AR numunelerinin 1130-1140 °C aralığında ısıtıldıktan sonraki mineralojik bileşimleri.

4.2.2. Artıklardaki Minerallerin Bünyesinde Bulunan OH⁻ Moleküllerinin Farklı Sıcaklıklardaki Davranışları

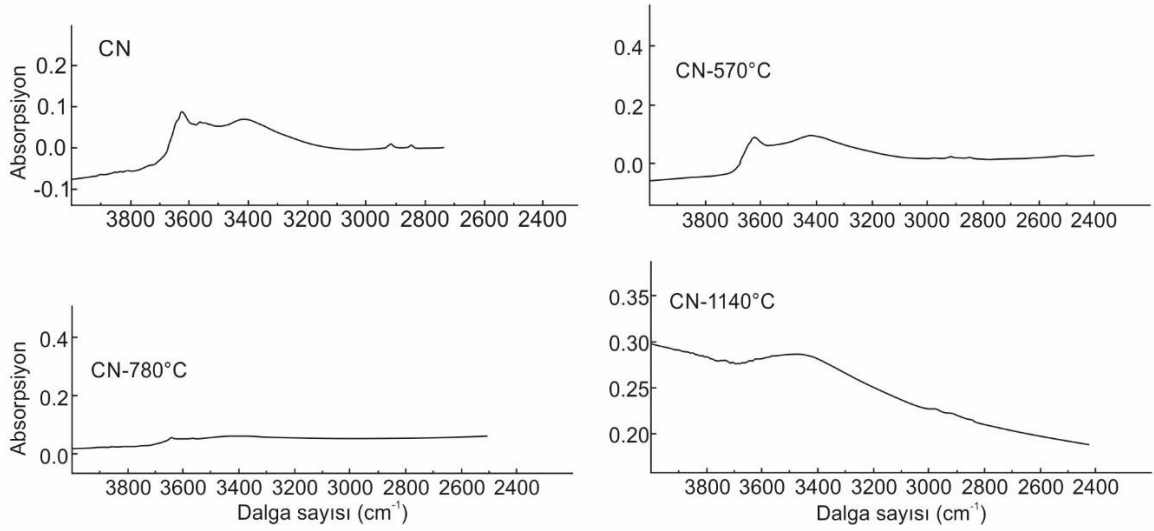
FTIR analizleri ile yüksek sıcaklıklarda CB, CN, AR artıklarındaki OH⁻ moleküllerinin diğer atom veya moleküller ile yapmış oldukları bağın varlığı tespit edilmiştir. Buna göre bu artık numunelerinin 560-600 °C aralığında iki saat bekletildikten sonraki FTIR analizleri ham maddelerin analizleri ile kısmen benzerlik sunduğu belirlenmiştir (Şekil 4.7). 560-600 °C aralığında bekletilen CB, CN, AR numunelerinin FTIR grafiklerinde 3400-3700 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında ham maddelere kıyasla az olsa da piklerin alındığı gözlenmiştir (Şekil 4.7, 4.8, 4.9).

Artık numuneleri 775-800 °C aralığında bekletildikten sonra FTIR analizleri gerçekleştirildiğinde, ham maddelere kıyasla 3400-3700 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında piklerin oldukça azaldığı saptanmıştır (Şekil 4.8). Bu sıcaklık aralığındaki CB, CN, AR numunelerinin FTIR grafikleri incelendiğinde, 3400-3700 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında CB ve AR artık numunelerinde küçük pikler gözlenirken, CN numunelerinde piklerin kaybolduğu gözlenmiştir (Şekil 4.7, 4.8, 4.9).

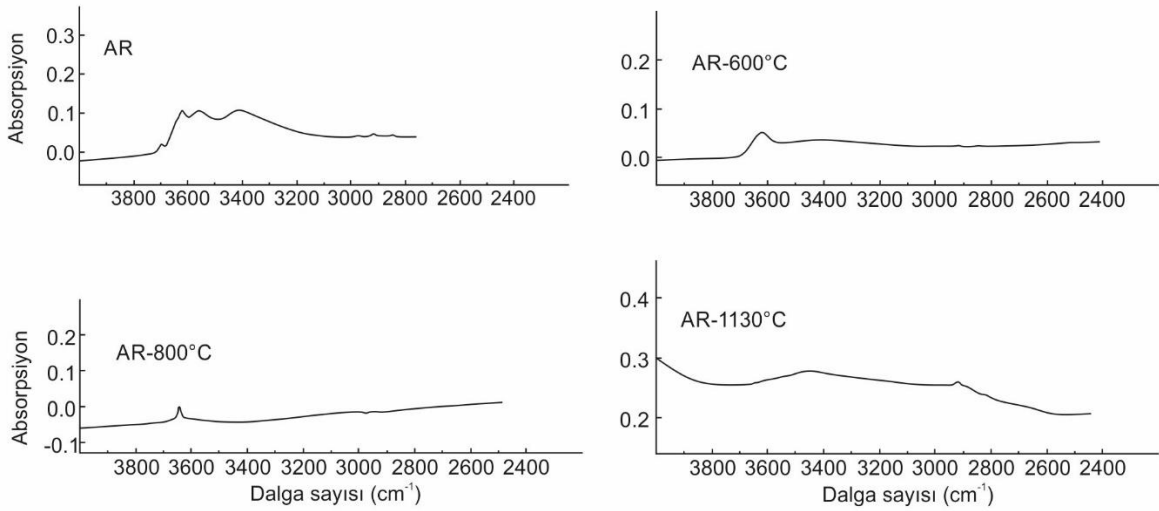
Sıcaklığın 1130-1140 °C aralığında olması durumunda, artık numunelerinin FTIR grafiklerinde 3400-3700 cm⁻¹ dalga sayısı aralığındaki piklerin tamamen kaybolduğu gözlenmiştir (Şekil 4.7, 4.8, 4.9).



Şekil 4.7: 560-600 °C aralığında iki saat bekletilen CB, CN, AR artıklarının FTIR grafikleri.



Şekil 4.8: 775-800 °C aralığında iki saat bekletilen CB, CN, AR artıklarının FTIR grafikleri.

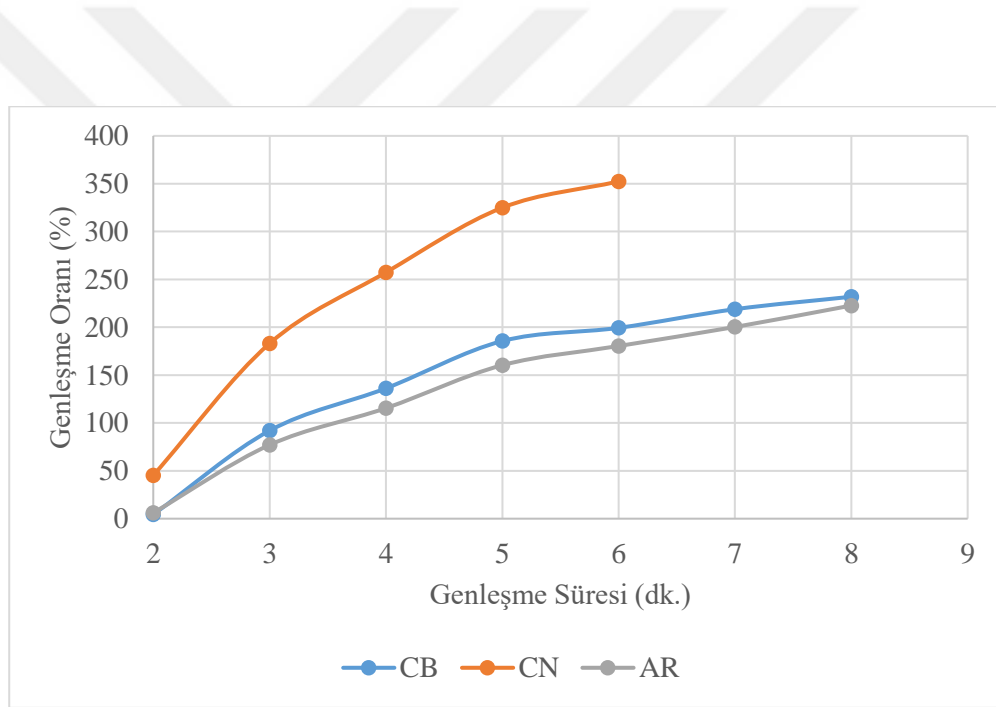


Şekil 4.9: 1130-1140 °C aralığında iki saat bekletilen CB, CN, AR artıklarının FTIR grafikleri.

4.2.3. Artıkların Genleşme Oranları

Cebeci agrega ocaklarına ait artıklar 2 dakika fırında bekletildiğinde genleşme oranı % 4.4 bulunurken, süre 8 dakikaya çıkarıldığında genleşmenin % 231.9'a kadar ulaştığı gözlenmiştir (Şekil 4.10). Cebeci agrega ocakları artıkları 8. dakikadan sonra ergimeye başladığı için deney 8 dakika ile sınırlandırılmıştır (Şekil 4.11). Cendere bölgesindeki agrega ocaklarına ait artıkların genleşme oranları 2 dakikalık sürede % 45.3 ve 6 dakikalık sürede ise % 352.4 olarak

bulunmuştur (Tablo 4.4). Cendere agrega ocakları artıkları 7. Dakikadan itibaren ergimeye başladığı için genleşme deneyleri bu dakikadan itibaren sonlandırılmıştır. Yedinci dakikada numune kısmen ergidiği için hacmi ve genleşme oranı belirlenememiştir (Şekil 4.11). Arnavutköy agrega ocaklarına ait artıkların 2. ve 8. dakikalardaki genleşme oranları sırasıyla % 6.1 ve % 222.7 olarak bulunmuştur (Tablo 4.4). Arnavutköy agrega ocağı artıkları, CB artıkları gibi 8. dakikadan itibaren ergimeye başladığı için bu süreden itibaren deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.11). Üç bölgeye ait artıkların genleşme oranlarına bakıldığında CN artıklarının CB ve AR'ye kıyasla daha fazla genleştiği görülmektedir (Şekil 4.10). Cebeci ve Arnavutköy agrega ocaklarına ait artıkların genleşme oranı kıyaslandığında CB'nin genleşme oranı kısmen daha fazladır (Şekil 4.10).

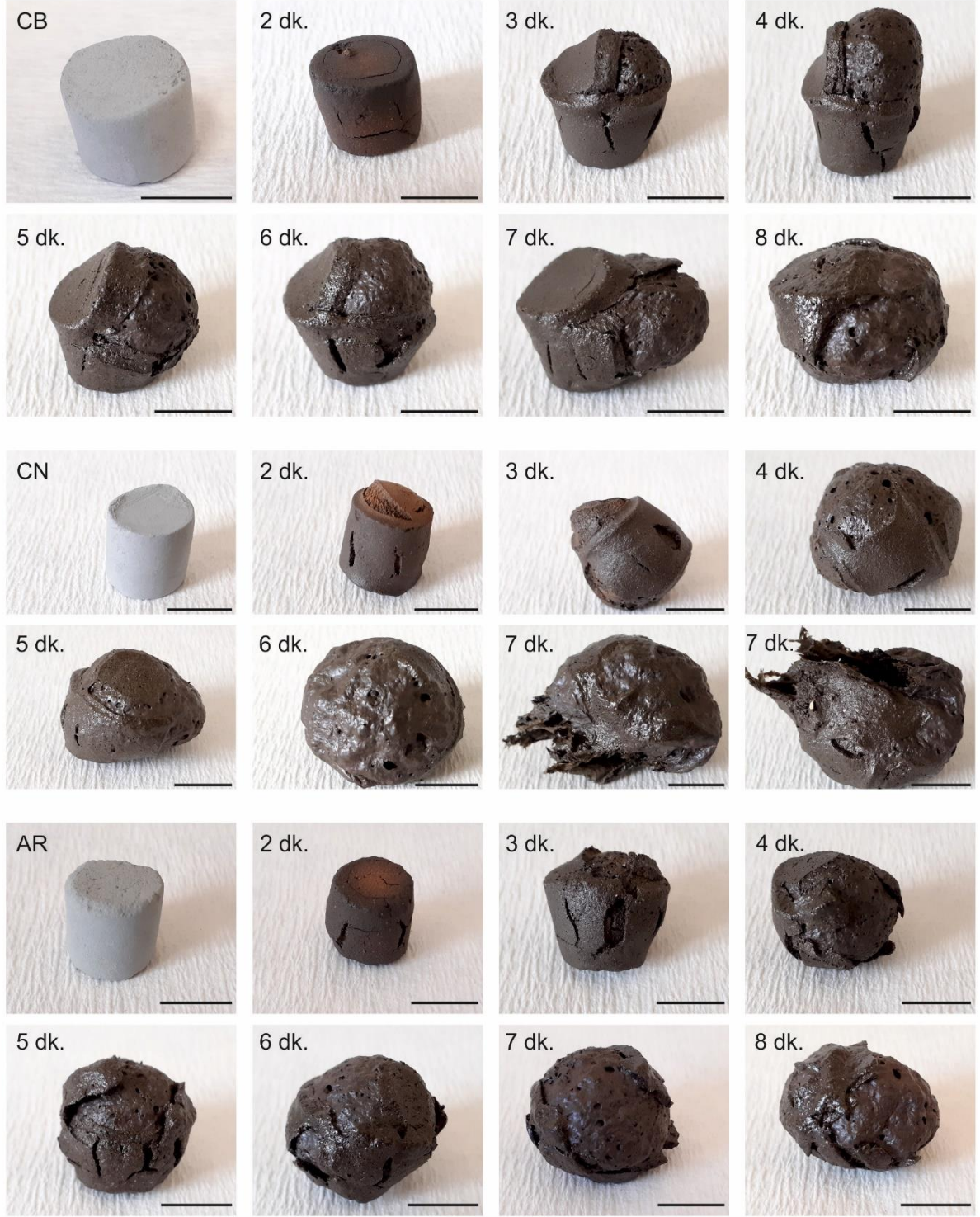


Şekil 4.10: CB, CN ve AR artıklarının genleşme oranlarının karşılaştırılması.

Tablo 4.4: Silindirik numunelerin genişleme öncesi, sonrası özellikleri ve genişleme oranları.

Örnek kodu	Genişleme Öncesi				Genişleme Sonrası					
	W _k (gr)	Boy (cm)	Ø (cm)	V (cm ³)	W _k (gr)	W _p + W _k (gr)	V _p + V (cm ³)	V (cm ³)	GO (%)	Genişleme süresi (dk.)
CB_1	3,87	1,27	1,4	1,95	3,60	4,02	2,5	2,03	4,4	2
CB_2	4,14	1,42		2,18	3,89	4,44	4,8	4,19	92,0	3
CB_3	4,39	1,51		2,32	4,11	4,93	6,4	5,49	136,2	4
CB_5	4,09	1,41		2,17	3,83	4,63	7,1	6,21	185,6	5
CB_6	4,67	1,53		2,35	4,36	5,05	7,8	7,03	199,4	6
CB_7	4,32	1,48		2,28	4,04	4,79	8,1	7,27	218,9	7
CB_8	4,35	1,49		2,30	4,11	4,98	8,6	7,63	231,9	8
CN_1	4,06	1,36		1,4	2,09	3,71	4,13	3,5	3,03	45,3
CN_2	4,39	1,46	2,24		4,01	4,5	6,9	6,36	183,1	3
CN_3	4,31	1,41	2,17		3,93	4,87	8,8	7,76	257,4	4
CN_4	4,08	1,37	2,11		3,69	4,18	9,5	8,96	325,0	5
CN_5	4,36	1,43	2,20		3,99	4,95	11,0	9,93	352,4	6
CN_6	4,49	1,55	2,39					*	*	7
AR_1	4,47	1,50	1,4	2,30	4,21	4,71	3,0	2,44	6,1	2
AR_2	4,42	1,48		2,28	4,14	4,65	4,6	4,03	77,1	3
AR_3	4,32	1,45		2,23	4,03	5,01	5,9	4,81	115,5	4
AR_4	4,47	1,52		2,33	4,05	4,7	6,8	6,08	160,4	5
AR_5	4,46	1,50		2,31	4,19	5,03	7,4	6,47	180,4	6
AR_6	4,56	1,54		2,37	4,27	5,06	8,0	7,12	200,3	7
AR_7	4,45	1,50		2,30	4,17	4,77	8,1	7,43	222,7	8

*: Belirlenemedi



Şekil 4.11: CB, CN ve AR artık numunelerinin farklı sürelerdeki genişleme görüntüleri (ölçekler 1 cm'dir).

4.3. GENLEŞTİRİLEN ARTIKLARIN FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERİ

4.3.1. Küçük Boy (Ø=1,45 cm) Agregaların Fiziksel Özellikleri

Çapları 1,45 cm olan ham artık numuneleri küçük boy olarak adlandırılmıştır. Her grup örnekten kırk adet genişletilen artık numunelerinin birim ağırlıkları, genişleme oranları, ağırlıkça ve hacimce su emme, porozite, doygunluk derecesi ve yenilme yük değerleri belirlenmiştir. CB*, CN ve AR* numunelerinin genişleme sonrası birim ağırlıkları sırasıyla 0,54-0,68 gr/cm³, 0,53-0,7 gr/cm³ ve 0,54-0,7 gr/cm³ aralığında olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.5, 4.6, 4.7). Agregaların birim ağırlıkları denklem 4.1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\gamma = \frac{W_k}{V_t} \quad (4.1)$$

Genleştirilen numunelerin ağırlıkça ve hacimce su emme değerleri için TS EN 1097-6, (2022) standardı dikkate alınmış olup, sırasıyla denklem 4.2 ve denklem 4.3 yardımıyla hesaplanmıştır. Ağırlıkça su emme değerleri CB* numuneleri için %6,9-11,2, CN numuneleri için %8,3-14,7 ve AR* numuneleri için ise %7,5-16,1 aralığında olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.5, 4.6, 4.7). Genleştirilen CB*, CN ve AR* numunelerinin hacimce su emme değerleri sırasıyla %4,1-7,1 aralığında, %4,7-8,5 aralığında ve %4,6-9,3 aralığında olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.5, 4.6, 4.7).

$$S_a = \frac{W_d - W_k}{W_k} \times 100 \quad (4.2)$$

$$S_h = \frac{W_d - W_k}{V_t} \times 100 \quad (4.3)$$

Genleştirilen numunelerin gerçek yoğunluk değerleri TS EN 1936, (2006) standardına uygun olarak belirlenmiş olup, CB* ve AR* numunelerinin yoğunlukları 2,91 gr/cm³, CN numunelerinin ise 2,90 gr/cm³ olarak bulunmuştur. Numunelerin gerçek yoğunluk ve birim ağırlık değerleri kullanılarak TS EN 1936, (2006) standardına uygun olarak porozite değerleri denklem 4.4 yardımıyla hesaplanmıştır. Buna göre, genişletilen CB*, CN ve AR* numunelerinin porozite değerleri birbirlerine oldukça yakın olmakta olup, sırasıyla % 76,7-81,4, % 76,0-81,7 ve % 75,9-81,3 aralığında değiştiği belirlenmiştir (Tablo 4.5, 4.6, 4.7).

$$p = \left(1 - \frac{\gamma}{\rho}\right) \times 100 \quad (4.4)$$

Genleştirilen numuneler su emme deneyine tabi tutulduktan sonra, gözeneklerin doluluk oranlarını belirlemek için genleştirilmiş kil agregalarının doygunluk derecesi (D) denklem 4.5 yardımıyla belirlenmiştir. Bu göre CB*, CN ve AR* numunelerinin doygunluk dereceleri sırasıyla % 5,2-9,1 aralığında, % 5,9-10,6 aralığında ve % 5,8-11,6 aralığında olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.5, 4.6, 4.7).

$$D = \frac{S_h}{p} \times 100 \quad (4.5)$$



Tablo 4.5: 1,45 cm çaplı CB* numunelerinin genleşme sonrası fiziksel özellikleri.

Genleşme Öncesi			Genleşme Sonrası											
Kod	W _k (gr)	V (cm ³)	W _k (gr)	W _p + W _k (gr)	V _p + V (cm ³)	V _p (cm ³)	V (cm ³)	GO (%)	γ (gr/cm ³)	W _d (gr)	S _a (%)	S _h (%)	p (%)	D (%)
1	2,70	1,53	2,51	3,02	4,7	0,46	4,24	178,0	0,59	2,74	9,2	5,4	79,7	6,8
2	2,70	1,53	2,50	3,02	4,8	0,47	4,33	184,0	0,58	2,71	8,4	4,8	80,2	6,0
3	2,70	1,53	2,49	3,06	4,8	0,51	4,29	181,0	0,58	2,70	8,4	4,9	80,0	6,1
4	2,70	1,53	2,51	3,08	4,7	0,51	4,19	174,5	0,60	2,72	8,4	5,0	79,4	6,3
5	2,63	1,49	2,44	2,95	4,4	0,46	3,94	165,2	0,62	2,61	7,0	4,3	78,7	5,5
6	2,63	1,49	2,45	2,99	4,7	0,49	4,21	183,6	0,58	2,64	7,8	4,5	80,0	5,6
7	2,67	1,51	2,48	2,98	4,4	0,45	3,95	161,9	0,63	2,70	8,9	5,6	78,4	7,1
8	2,67	1,51	2,47	3,10	4,6	0,57	4,03	167,4	0,61	2,70	9,3	5,7	79,0	7,2
9	2,60	1,47	2,43	3,06	4,6	0,57	4,03	174,6	0,60	2,63	8,2	5,0	79,3	6,3
10	2,60	1,47	2,41	3,05	4,7	0,58	4,12	180,7	0,58	2,58	7,1	4,1	79,9	5,2
11	2,70	1,53	2,51	2,99	4,6	0,43	4,17	173,2	0,60	2,73	8,8	5,3	79,3	6,7
12	2,70	1,53	2,49	3,04	4,4	0,50	3,91	156,0	0,64	2,71	8,8	5,6	78,1	7,2
13	2,65	1,50	2,46	3,08	4,5	0,56	3,94	163,3	0,62	2,63	6,9	4,3	78,6	5,5
14	2,65	1,50	2,45	3,02	4,8	0,51	4,29	186,3	0,57	2,65	8,2	4,7	80,4	5,8
15	2,69	1,52	2,49	3,01	4,8	0,47	4,33	185,0	0,57	2,68	7,6	4,4	80,2	5,5
16	2,69	1,52	2,49	3,12	4,9	0,57	4,33	185,1	0,57	2,72	9,2	5,3	80,3	6,6
17	2,63	1,49	2,44	3,04	4,7	0,54	4,16	180,0	0,59	2,67	9,4	5,5	79,8	6,9
18	2,63	1,49	2,42	3,08	4,5	0,59	3,91	162,9	0,62	2,63	8,7	5,4	78,7	6,8
19	2,71	1,53	2,52	3,09	4,8	0,51	4,29	180,0	0,59	2,74	8,7	5,1	79,8	6,4
20	2,71	1,53	2,50	3,14	4,8	0,58	4,22	175,9	0,59	2,69	7,6	4,5	79,7	5,6
21	2,67	1,51	2,45	2,95	4,7	0,45	4,25	181,7	0,58	2,67	9,0	5,2	80,2	6,5

Tablo 4.5 (devam):

Genleşme Öncesi			Genleşme Sonrası											
Kod	W _k (gr)	V (cm ³)	W _k (gr)	W _p + W _k (gr)	V _p + V (cm ³)	V _p (cm ³)	V (cm ³)	GO (%)	γ (gr/cm ³)	W _d (gr)	S _a (%)	S _h (%)	p (%)	D (%)
22	2,67	1,51	2,46	2,99	4,7	0,48	4,22	180,0	0,58	2,65	7,7	4,5	80,0	5,6
23	2,69	1,52	2,49	3,01	4,6	0,47	4,13	171,9	0,60	2,73	9,6	5,8	79,3	7,3
24	2,69	1,52	2,49	3,11	4,6	0,56	4,04	166,0	0,62	2,70	8,4	5,2	78,8	6,6
25	2,71	1,53	2,50	3,13	4,9	0,57	4,33	183,0	0,58	2,69	7,6	4,4	80,2	5,5
26	2,71	1,53	2,51	3,04	4,4	0,48	3,92	156,2	0,64	2,79	11,2	7,1	78,0	9,1
27	2,68	1,51	2,48	3,05	4,5	0,51	3,99	163,3	0,62	2,67	7,7	4,8	78,6	6,1
28	2,68	1,51	2,48	3,06	4,6	0,52	4,08	169,3	0,61	2,70	8,9	5,4	79,1	6,8
29	2,61	1,47	2,51	3,12	4,7	0,55	4,15	181,5	0,60	2,70	7,6	4,6	79,2	5,8
30	2,61	1,47	2,49	3,06	4,4	0,51	3,89	163,6	0,64	2,70	8,4	5,4	78,0	6,9
31	2,70	1,53	2,43	3,02	4,7	0,53	4,17	173,3	0,58	2,61	7,4	4,3	80,0	5,4
32	2,70	1,53	2,42	2,99	4,5	0,51	3,99	161,4	0,61	2,61	7,9	4,8	79,1	6,0
33	2,65	1,50	2,49	3,12	4,4	0,57	3,83	156,0	0,65	2,67	7,2	4,7	77,7	6,0
34	2,65	1,50	2,51	3,18	4,3	0,60	3,70	146,9	0,68	2,70	7,6	5,1	76,7	6,7
35	2,68	1,51	2,45	3,07	4,4	0,56	3,84	153,7	0,64	2,66	8,6	5,5	78,1	7,0
36	2,68	1,51	2,45	3,11	4,3	0,59	3,71	144,8	0,66	2,65	8,2	5,4	77,3	7,0
37	2,65	1,50	2,45	3,10	5,1	0,59	4,52	201,6	0,54	2,64	7,8	4,2	81,4	5,2
38	2,65	1,50	2,46	3,13	5,1	0,60	4,50	200,4	0,55	2,71	10,2	5,6	81,2	6,8
39	2,71	1,53	2,49	3,18	4,8	0,62	4,18	172,9	0,60	2,69	8,0	4,8	79,5	6,0
40	2,71	1,53	2,50	3,11	4,7	0,55	4,15	171,1	0,60	2,70	8,0	4,8	79,3	6,1
Ort.	2,67	1,51	2,47	3,06	4,6	0,53	4,11	172,4	0,60	2,68	8,3	5,0	79,3	6,3
Maks.	2,71	1,53	2,52	3,18	5,1	0,62	4,52	201,6	0,68	2,79	11,2	7,1	81,4	9,1
Min.	2,60	1,47	2,41	2,95	4,3	0,43	3,70	144,8	0,54	2,58	6,9	4,1	76,7	5,2

Tablo 4.6: 1,45 cm çaplı CN numunelerinin genleşme sonrası fiziksel özellikleri.

Genleşme Öncesi			Genleşme Sonrası											
Kod	W _k (gr)	V (cm ³)	W _k (gr)	W _p + W _k (gr)	V _p + V (cm ³)	V _p (cm ³)	V (cm ³)	GO (%)	γ (gr/cm ³)	W _d (gr)	S _a (%)	S _h (%)	p (%)	D (%)
1	2,66	1,52	2,45	3,17	4,9	0,65	4,25	179,7	0,58	2,7	11,8	6,8	80,2	8,5
2	2,66	1,52	2,46	3,01	4,8	0,50	4,31	183,2	0,57	2,7	11,4	6,5	80,4	8,1
3	2,68	1,53	2,45	2,94	4,1	0,44	3,66	138,9	0,67	2,7	9,4	6,3	77,0	8,2
4	2,68	1,53	2,46	3,14	4,6	0,61	3,99	160,4	0,62	2,7	9,3	5,8	78,8	7,3
5	2,63	1,50	2,41	2,89	4,9	0,43	4,47	197,3	0,54	2,7	10,0	5,4	81,5	6,6
6	2,63	1,50	2,40	3,10	4,4	0,63	3,77	150,9	0,64	2,6	9,6	6,1	78,1	7,8
7	2,62	1,50	2,40	2,96	4,8	0,50	4,30	186,9	0,56	2,7	10,4	5,8	80,8	7,2
8	2,62	1,50	2,40	2,92	4,7	0,47	4,23	182,7	0,57	2,6	8,3	4,7	80,5	5,9
9	2,66	1,52	2,43	3,03	4,9	0,54	4,36	186,8	0,56	2,7	11,9	6,7	80,8	8,2
10	2,66	1,52	2,42	3,03	4,8	0,55	4,25	179,7	0,57	2,7	11,2	6,4	80,4	7,9
11	2,70	1,54	2,47	3,04	4,4	0,51	3,89	151,9	0,64	2,7	8,5	5,4	78,2	6,9
12	2,70	1,54	2,45	3,05	5,0	0,54	4,46	189,1	0,55	2,7	9,8	5,4	81,1	6,6
13	2,66	1,52	2,44	3,08	4,8	0,58	4,22	177,9	0,58	2,7	9,0	5,2	80,1	6,5
14	2,66	1,52	2,45	2,98	4,5	0,48	4,02	164,7	0,61	2,8	13,1	8,0	79,1	10,1
15	2,66	1,52	2,43	2,90	3,9	0,42	3,48	128,8	0,70	2,7	10,3	7,2	76,0	9,5
16	2,66	1,52	2,46	3,03	4,7	0,51	4,19	175,5	0,59	2,7	10,2	6,0	79,8	7,5
17	2,68	1,53	2,43	2,94	4,4	0,46	3,94	157,3	0,62	2,7	11,1	6,9	78,8	8,7
18	2,68	1,53	2,43	2,93	4,8	0,45	4,35	184,0	0,56	2,7	9,1	5,1	80,8	6,3
19	2,60	1,49	2,38	2,97	4,5	0,53	3,97	167,1	0,60	2,6	10,1	6,0	79,4	7,6
20	2,60	1,49	2,39	2,92	4,1	0,48	3,62	143,9	0,66	2,6	10,5	6,9	77,3	8,9
21	2,65	1,51	2,42	2,91	4,5	0,44	4,06	168,0	0,60	2,7	10,7	6,4	79,5	8,1

Tablo 4.6 (devam):

Genleşme Öncesi			Genleşme Sonrası											
Kod	W _k (gr)	V (cm ³)	W _k (gr)	W _p + W _k (gr)	V _p + V (cm ³)	V _p (cm ³)	V (cm ³)	GO (%)	γ (gr/cm ³)	W _d (gr)	S _a (%)	S _h (%)	p (%)	D (%)
22	2,65	1,51	2,44	2,97	4,8	0,48	4,32	185,5	0,56	2,7	11,5	6,5	80,6	8,0
23	2,66	1,52	2,45	2,98	4,6	0,48	4,12	171,3	0,59	2,7	10,6	6,3	79,6	7,9
24	2,66	1,52	2,44	2,95	4,6	0,46	4,14	172,4	0,59	2,7	9,0	5,3	79,8	6,7
25	2,72	1,55	2,50	2,98	4,7	0,43	4,27	174,6	0,59	2,7	9,6	5,6	79,9	7,0
26	2,72	1,55	2,49	3,00	4,7	0,46	4,24	172,9	0,59	2,7	9,6	5,7	79,8	7,1
27	2,67	1,53	2,45	3,04	4,8	0,53	4,27	179,8	0,57	2,8	13,9	8,0	80,3	9,9
28	2,67	1,53	2,44	2,96	4,6	0,47	4,13	170,8	0,59	2,7	9,8	5,8	79,7	7,3
29	2,68	1,53	2,44	3,03	5,0	0,53	4,47	191,8	0,55	2,7	11,1	6,0	81,2	7,4
30	2,68	1,53	2,46	3,02	4,8	0,50	4,30	180,5	0,57	2,7	11,4	6,5	80,3	8,1
31	2,65	1,51	2,44	3,00	4,8	0,50	4,30	183,7	0,57	2,7	9,8	5,6	80,5	6,9
32	2,65	1,51	2,43	3,03	5,1	0,54	4,56	201,1	0,53	2,7	9,1	4,8	81,7	5,9
33	2,68	1,53	2,45	3,04	4,5	0,53	3,97	159,2	0,62	2,7	9,8	6,0	78,8	7,7
34	2,68	1,53	2,45	2,98	4,7	0,48	4,22	175,8	0,58	2,8	14,7	8,5	80,1	10,6
35	2,64	1,51	2,42	3,01	4,6	0,53	4,07	169,7	0,59	2,7	9,9	5,9	79,6	7,4
36	2,64	1,51	2,42	2,97	4,5	0,50	4,01	165,5	0,60	2,7	10,7	6,5	79,2	8,2
37	2,69	1,54	2,44	2,95	4,7	0,46	4,24	175,9	0,58	2,7	9,0	5,2	80,2	6,5
38	2,69	1,54	2,45	3,01	4,7	0,50	4,20	173,0	0,58	2,7	11,0	6,4	79,9	8,0
39	2,66	1,52	2,44	3,05	4,8	0,55	4,25	179,7	0,57	2,7	11,1	6,4	80,3	7,9
40	2,66	1,52	2,44	2,98	4,7	0,49	4,21	177,2	0,58	2,7	9,8	5,7	80,1	7,1
Ort.	2,66	1,52	2,44	3,00	4,7	0,50	4,15	172,9	0,59	2,7	10,4	6,1	79,8	7,7
Maks.	2,72	1,55	2,50	3,17	5,1	0,65	4,56	201,1	0,70	2,8	14,7	8,5	81,7	10,6
Min.	2,60	1,49	2,38	2,89	3,9	0,42	3,48	128,8	0,53	2,6	8,3	4,7	76,0	5,9

Tablo 4.7: 1,45 cm çaplı AR* numunelerinin genleşme sonrası fiziksel özellikleri.

Genleşme Öncesi			Genleşme Sonrası											
Kod	W _k (gr)	V (cm ³)	W _k (gr)	W _p + W _k (gr)	V _p + V (cm ³)	V _p (cm ³)	V (cm ³)	GO (%)	γ (gr/cm ³)	W _d (gr)	S _a (%)	S _h (%)	p (%)	D (%)
1	2,80	1,54	2,59	3,22	5,1	0,57	4,53	194,6	0,57	2,90	12,0	6,8	80,4	14,9
2	2,80	1,54	2,60	3,34	4,9	0,67	4,23	175,2	0,61	2,90	11,5	7,1	78,9	9,0
3	2,71	1,49	2,51	3,21	4,9	0,63	4,27	186,8	0,59	2,79	11,2	6,6	79,8	8,2
4	2,71	1,49	2,50	3,16	4,8	0,59	4,21	182,5	0,59	2,76	10,4	6,2	79,6	7,8
5	2,73	1,50	2,54	3,23	5,1	0,62	4,48	198,6	0,57	2,88	13,4	7,6	80,5	9,4
6	2,73	1,50	2,52	3,29	5,0	0,69	4,31	187,1	0,59	2,77	9,9	5,8	79,9	7,3
7	2,72	1,49	2,55	3,21	4,9	0,59	4,31	188,1	0,59	2,83	11,0	6,5	79,6	8,2
8	2,72	1,49	2,51	3,19	4,9	0,61	4,29	186,9	0,59	2,77	10,4	6,1	79,9	7,6
9	2,72	1,49	2,52	3,21	4,6	0,62	3,98	166,2	0,63	2,77	9,9	6,3	78,2	8,0
10	2,72	1,49	2,52	3,20	5,1	0,61	4,49	200,3	0,56	2,83	12,3	6,9	80,7	8,6
11	2,74	1,51	2,53	3,29	4,9	0,68	4,22	180,0	0,60	2,86	13,0	7,8	79,4	9,9
12	2,74	1,51	2,54	3,24	4,7	0,63	4,07	170,3	0,62	2,74	7,9	4,9	78,6	6,3
13	2,71	1,49	2,54	3,17	4,9	0,57	4,33	191,0	0,59	2,79	9,8	5,8	79,9	7,2
14	2,71	1,49	2,54	3,21	5,0	0,60	4,40	195,3	0,58	2,95	16,1	9,3	80,1	11,6
15	2,70	1,48	2,54	3,14	4,8	0,54	4,26	187,2	0,60	2,86	12,6	7,5	79,5	9,4
16	2,70	1,48	2,54	3,15	4,6	0,55	4,05	173,1	0,63	2,79	9,8	6,2	78,5	7,9
17	2,77	1,52	2,54	3,24	4,4	0,63	3,77	147,7	0,67	2,83	11,4	7,7	76,8	10,0
18	2,77	1,52	2,54	3,21	5,0	0,60	4,40	188,9	0,58	2,75	8,3	4,8	80,1	6,0
19	2,70	1,48	2,54	3,21	4,5	0,60	3,90	162,7	0,65	2,79	9,8	6,4	77,6	8,3
20	2,65	1,46	2,54	3,09	4,2	0,50	3,71	154,5	0,69	2,73	7,5	5,1	76,4	6,7
21	2,65	1,46	2,54	3,13	4,3	0,53	3,77	158,9	0,67	2,73	7,5	5,0	76,8	6,6

Tablo 4.7 (devam):

Genleşme Öncesi			Genleşme Sonrası											
Kod	W _k (gr)	V (cm ³)	W _k (gr)	W _p + W _k (gr)	V _p + V (cm ³)	V _p (cm ³)	V (cm ³)	GO (%)	γ (gr/cm ³)	W _d (gr)	S _a (%)	S _h (%)	p (%)	D (%)
22	2,73	1,50	2,54	3,12	4,9	0,52	4,38	191,9	0,58	2,79	9,8	5,7	80,1	7,1
23	2,73	1,50	2,54	3,23	5,2	0,62	4,58	205,3	0,55	2,79	9,8	5,5	80,9	6,7
24	2,66	1,46	2,54	3,08	4,4	0,49	3,91	167,8	0,65	2,79	9,8	6,4	77,7	8,2
25	2,66	1,46	2,54	3,17	4,7	0,57	4,13	182,8	0,61	2,73	7,5	4,6	78,9	5,8
26	2,70	1,48	2,54	3,17	4,4	0,57	3,83	158,4	0,66	2,81	10,6	7,0	77,2	9,1
27	2,70	1,48	2,54	3,14	4,6	0,54	4,06	173,7	0,63	2,84	11,8	7,4	78,5	9,4
28	2,75	1,51	2,54	3,19	5,2	0,59	4,62	205,4	0,55	2,94	15,7	8,7	81,1	10,7
29	2,75	1,51	2,54	3,19	4,7	0,59	4,12	172,3	0,62	2,85	12,2	7,5	78,8	9,6
30	2,72	1,49	2,54	3,24	5,3	0,63	4,67	212,5	0,54	2,83	11,4	6,2	81,3	7,6
31	2,72	1,49	2,54	3,15	4,7	0,55	4,15	177,8	0,61	2,79	9,8	6,0	79,0	7,6
32	2,67	1,47	2,54	3,18	4,2	0,58	3,62	147,0	0,70	2,74	7,9	5,5	75,9	7,3
33	2,67	1,47	2,48	3,13	4,8	0,59	4,22	187,3	0,59	2,75	10,9	6,4	79,8	8,0
34	2,74	1,51	2,54	3,15	4,2	0,55	3,65	142,5	0,70	2,84	11,8	8,2	76,1	10,8
35	2,74	1,51	2,54	3,20	4,7	0,59	4,11	172,7	0,62	2,85	12,2	7,5	78,7	9,6
36	2,67	1,47	2,54	3,15	4,5	0,55	3,95	169,3	0,64	2,77	9,1	5,8	77,9	7,5
37	2,67	1,47	2,54	3,18	4,9	0,58	4,32	194,7	0,59	2,74	7,9	4,6	79,8	5,8
38	2,71	1,49	2,54	3,06	4,9	0,47	4,43	197,6	0,57	2,81	10,6	6,1	80,3	7,6
39	2,71	1,49	2,54	3,11	4,8	0,51	4,29	187,9	0,59	2,81	10,6	6,3	79,6	7,9
40	2,71	1,49	2,54	3,24	4,7	0,63	4,07	173,3	0,62	2,78	9,4	5,9	78,6	7,5
Ort.	2,72	1,49	2,54	3,19	4,8	0,58	4,18	179,9	0,61	2,81	10,6	6,4	79,0	8,3
Maks.	2,80	1,54	2,60	3,34	5,3	0,69	4,67	212,5	0,70	2,95	16,1	9,3	81,3	14,9
Min.	2,65	1,46	2,48	3,06	4,2	0,47	3,62	142,5	0,54	2,73	7,5	4,6	75,9	5,8

4.3.2. Büyük Boy ($\emptyset=1,6$ cm) Agregaların Fiziksel Özellikleri

Çapları 1,6 cm olan ham artık numuneleri büyük boy olarak adlandırılmıştır. Her grup örnekten kırk adet geliştirilen artık numunelerinin birim ağırlıkları, genleşme oranları, ağırlıkça ve hacimce su emme, porozite, doygunluk derecesi ve yenilme yük değerleri belirlenmiştir. Agregaların birim ağırlıkları denklem 4.1 yardımıyla hesaplanmış olup, CB*, CN ve AR* numunelerinin genleşme sonrası birim ağırlıkları sırasıyla $0,53-0,78$ gr/cm³, $0,48-0,59$ gr/cm³ ve $0,59-0,76$ gr/cm³ aralığında olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.8, 4.9, 4.10).

Genleştirilen numunelerin ağırlıkça ve hacimce su emme değerleri için TS EN 1097-6, (2022) standardı dikkate alınmış olup, sırasıyla denklem 4.2 ve denklem 4.3 yardımıyla hesaplanmıştır. Hacimce su emme değerleri CB* numuneleri için % 3,1-7,1, CN numuneleri için % 4,1-9,7 ve AR* numuneleri için ise % 4,4-8,2 aralığında olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.8, 4.9, 4.10). Genleştirilen CB*, CN ve AR* numunelerinin ağırlıkça su emme değerleri sırasıyla % 5,2-11,6 aralığında, % 7,9-18,5 aralığında ve % 6,8-13,1 aralığında olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.8, 4.9, 4.10).

Numunelerin gerçek yoğunluk ve birim ağırlık değerleri kullanılarak TS EN 1936, (2006) standardına uygun olarak porozite değerleri denklem 4.4 yardımıyla hesaplanmıştır. Buna göre, geliştirilen CB*, CN ve AR* numunelerinin porozite değerleri sırasıyla % 73,2-81,8 aralığında, % 79,8-83,5 aralığında ve % 73,9-79,8 aralığında değiştiği belirlenmiştir (Tablo 4.8, 4.9, 4.10).

Gözeneklerin doluluk oranlarını belirlemek için geliştirilmiş kil agregalarının doygunluk derecesi denklem 4.5 yardımıyla belirlenmiştir. Bu göre CB*, CN ve AR* numunelerinin doygunluk dereceleri sırasıyla % 3,9-9,1 aralığında, % 5,0-11,9 aralığında ve % 5,7-11,1 aralığında olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.8, 4.9, 4.10).

Tablo 4.8: 1,6 cm çaplı CB* numunelerinin genişleme sonrası fiziksel özellikleri.

Genleşme Öncesi			Genleşme Sonrası											
Kod	W _k (gr)	V (cm ³)	W _k (gr)	W _p + W _k (gr)	V _p + V (cm ³)	V _p (cm ³)	V (cm ³)	GO (%)	γ (gr/cm ³)	W _d (gr)	S _a (%)	S _h (%)	p (%)	D (%)
1	3,74	2,11	3,43	4,33	7,3	0,81	6,49	207,1	0,53	3,67	7,0	3,7	81,8	4,5
2	3,78	2,14	3,48	4,53	7,1	0,95	6,16	188,2	0,57	3,70	6,3	3,6	80,6	4,4
3	3,81	2,15	3,52	4,24	6,8	0,65	6,15	185,8	0,57	3,82	8,5	4,9	80,3	6,1
4	3,78	2,14	3,46	4,26	5,7	0,72	4,98	133,2	0,69	3,70	6,9	4,8	76,1	6,3
5	3,73	2,11	3,49	4,31	6,7	0,74	5,96	182,9	0,59	3,68	5,4	3,2	79,9	4,0
6	3,87	2,19	3,57	4,32	6,8	0,68	6,13	180,1	0,58	3,77	5,6	3,3	80,0	4,1
7	3,87	2,19	3,58	4,35	6,5	0,69	5,81	165,6	0,62	3,85	7,5	4,6	78,8	5,9
8	3,7	2,09	3,43	4,24	7	0,73	6,27	200,0	0,55	3,67	7,0	3,8	81,2	4,7
9	3,86	2,18	3,58	4,41	6,1	0,75	5,35	145,5	0,67	3,79	5,9	3,9	77,0	5,1
10	3,72	2,10	3,44	4,31	6,6	0,78	5,82	176,8	0,59	3,64	5,8	3,4	79,7	4,3
11	3,72	2,10	3,45	4,22	6,6	0,69	5,91	181,1	0,58	3,65	5,8	3,4	79,9	4,2
12	3,74	2,11	3,45	4,24	6,1	0,71	5,39	155,0	0,64	3,71	7,5	4,8	78,0	6,2
13	3,74	2,11	3,45	4,24	6,4	0,71	5,69	169,2	0,61	3,68	6,7	4,0	79,2	5,1
14	3,79	2,14	3,5	4,28	6,4	0,70	5,70	166,1	0,61	3,70	5,7	3,5	78,9	4,4
15	3,79	2,14	3,51	4,26	5,7	0,68	5,03	134,7	0,70	3,75	6,8	4,8	76,0	6,3
16	3,83	2,16	3,55	4,28	7,2	0,66	6,54	202,4	0,54	3,79	6,8	3,7	81,4	4,5
17	3,83	2,16	3,54	4,19	6,3	0,59	5,72	164,1	0,62	3,75	5,9	3,7	78,7	4,7
18	3,76	2,12	3,49	4,32	6,4	0,75	5,65	166,1	0,62	3,69	5,7	3,5	78,8	4,5
19	3,76	2,12	3,48	4,3	6,5	0,74	5,76	171,2	0,60	3,76	8,0	4,9	79,2	6,1
20	3,9	2,20	3,6	4,26	6,9	0,59	6,31	186,2	0,57	3,96	10,0	5,7	80,4	7,1
21	3,9	2,20	3,61	4,3	7	0,62	6,38	189,5	0,57	3,85	6,6	3,8	80,6	4,7

Tablo 4.8 (devam):

Genleşme Öncesi			Genleşme Sonrası											
Kod	W _k (gr)	V (cm ³)	W _k (gr)	W _p + W _k (gr)	V _p + V (cm ³)	V _p (cm ³)	V (cm ³)	GO (%)	γ (gr/cm ³)	W _d (gr)	S _a (%)	S _h (%)	p (%)	D (%)
22	3,74	2,11	3,47	4,1	5,6	0,57	5,03	138,2	0,69	3,67	5,8	4,0	76,3	5,2
23	3,74	2,11	3,44	4,11	6,3	0,60	5,70	169,6	0,60	3,66	6,4	3,9	79,2	4,9
24	3,74	2,11	3,46	4,17	6,4	0,64	5,76	172,6	0,60	3,64	5,2	3,1	79,4	3,9
25	3,74	2,11	3,39	4,14	6,3	0,68	5,63	166,2	0,60	3,60	6,2	3,7	79,3	4,7
26	3,73	2,11	3,45	4,26	6,7	0,73	5,97	183,3	0,58	3,77	9,3	5,4	80,1	6,7
27	3,73	2,11	3,44	4,19	6,2	0,68	5,53	162,2	0,62	3,67	6,7	4,2	78,6	5,3
28	3,79	2,14	3,53	4,27	6,4	0,67	5,73	167,8	0,62	3,78	7,1	4,4	78,8	5,5
29	3,79	2,14	3,51	4,24	6,3	0,66	5,64	163,5	0,62	3,73	6,3	3,9	78,6	5,0
30	3,69	2,08	3,41	4,07	6,5	0,59	5,91	183,3	0,58	3,64	6,7	3,9	80,2	4,9
31	3,69	2,08	3,4	4,22	7,0	0,74	6,26	200,4	0,54	3,70	8,8	4,8	81,3	5,9
32	3,82	2,16	3,54	4,17	5,1	0,57	4,53	110,0	0,78	3,82	7,9	6,2	73,2	8,4
33	3,75	2,12	3,48	4,22	6,9	0,67	6,23	194,2	0,56	3,71	6,6	3,7	80,8	4,6
34	3,75	2,12	3,46	4,17	6,3	0,64	5,66	167,2	0,61	3,67	6,1	3,7	79,0	4,7
35	3,8	2,15	3,51	4,31	6,4	0,72	5,68	164,6	0,62	3,77	7,4	4,6	78,8	5,8
36	3,8	2,15	3,55	4,23	5,7	0,61	5,09	137,0	0,70	3,75	5,6	3,9	76,0	5,2
37	3,72	2,10	3,43	4,22	6,3	0,71	5,59	165,9	0,61	3,69	7,6	4,7	78,9	5,9
38	3,72	2,10	3,43	4,1	6,1	0,60	5,50	161,6	0,62	3,70	7,9	4,9	78,6	6,3
39	3,74	2,11	3,46	4,13	6,2	0,60	5,60	164,9	0,62	3,86	11,6	7,1	78,8	9,1
40	3,74	2,11	3,47	4,19	6,4	0,65	5,75	172,2	0,60	3,66	5,5	3,3	79,3	4,2
Ort.	3,77	2,13	3,49	4,24	6,4	0,68	5,75	169,9	0,61	3,73	6,9	4,2	79,0	5,3
Maks.	3,90	2,20	3,61	4,53	7,3	0,95	6,54	207,1	0,78	3,96	11,6	7,1	81,8	9,1
Min.	3,69	2,08	3,39	4,07	5,1	0,57	4,53	110,0	0,53	3,60	5,2	3,1	73,2	3,9

Tablo 4.9: 1,6 cm çaplı CN numunelerinin genleşme sonrası fiziksel özellikleri.

Genleşme Öncesi			Genleşme Sonrası											
Kod	W _k (gr)	V (cm ³)	W _k (gr)	W _p + W _k (gr)	V _p + V (cm ³)	V _p (cm ³)	V (cm ³)	GO (%)	γ (gr/cm ³)	W _d (gr)	S _a (%)	S _h (%)	p (%)	D (%)
1	3,51	2,01	3,21	4,02	7,2	0,73	6,47	222,6	0,50	3,64	13,4	6,6	83,0	8,0
2	3,62	2,07	3,31	4,06	6,8	0,68	6,13	196,1	0,54	3,72	12,4	6,7	81,4	8,2
3	3,79	2,17	3,45	4,31	7,2	0,77	6,43	196,7	0,54	4,01	16,2	8,7	81,6	10,7
4	3,71	2,12	3,38	4,11	7,6	0,66	6,94	227,5	0,49	3,73	10,4	5,0	83,3	6,1
5	3,86	2,21	3,52	4,19	7,0	0,60	6,40	190,0	0,55	3,90	10,8	5,9	81,1	7,3
6	3,75	2,14	3,42	4,23	7,8	0,73	7,07	230,0	0,48	3,80	11,1	5,4	83,4	6,4
7	3,61	2,06	3,3	3,98	7,5	0,61	6,89	233,9	0,48	3,83	16,1	7,7	83,5	9,2
8	3,47	1,98	3,16	3,89	6,7	0,66	6,04	204,8	0,52	3,41	7,9	4,1	82,0	5,0
9	3,75	2,14	3,43	4,18	7,6	0,68	6,93	223,2	0,50	3,89	13,4	6,6	83,0	8,0
10	3,71	2,12	3,39	4,13	7,2	0,67	6,53	208,2	0,52	3,90	15,0	7,8	82,2	9,5
11	3,81	2,18	3,45	4,35	7,3	0,81	6,49	198,1	0,53	3,81	10,4	5,5	81,7	6,8
12	3,79	2,17	3,47	4,39	7,5	0,83	6,67	208,1	0,52	3,90	12,4	6,4	82,1	7,8
13	3,63	2,07	3,33	4,09	7,1	0,68	6,42	209,3	0,52	3,76	12,9	6,7	82,2	8,2
14	3,75	2,14	3,43	4,09	7,3	0,59	6,71	212,9	0,51	3,94	14,9	7,6	82,4	9,2
15	3,73	2,13	3,41	4,22	7,6	0,73	6,87	222,4	0,50	3,80	11,4	5,7	82,9	6,8
16	3,69	2,11	3,37	4,03	6,7	0,59	6,11	189,6	0,55	3,74	11,0	6,1	81,0	7,5
17	3,73	2,13	3,4	4,22	7,2	0,74	6,46	203,2	0,53	3,78	11,2	5,9	81,9	7,2
18	3,81	2,18	3,48	4,23	7,0	0,68	6,33	190,5	0,55	3,86	10,9	6,0	81,1	7,4
19	3,74	2,14	3,42	4,13	7,2	0,64	6,56	207,0	0,52	4,00	17,0	8,8	82,1	10,8
20	3,77	2,15	3,45	4,18	6,7	0,66	6,04	180,5	0,57	3,85	11,6	6,6	80,4	8,2
21	3,74	2,14	3,41	4,16	7,2	0,68	6,53	205,3	0,52	3,76	10,3	5,4	82,0	6,5

Tablo 4.9 (devam):

Genleşme Öncesi			Genleşme Sonrası											
Kod	W _k (gr)	V (cm ³)	W _k (gr)	W _p + W _k (gr)	V _p + V (cm ³)	V _p (cm ³)	V (cm ³)	GO (%)	γ (gr/cm ³)	W _d (gr)	S _a (%)	S _h (%)	p (%)	D (%)
22	3,77	2,15	3,43	4,16	6,8	0,66	6,14	185,2	0,56	3,78	10,2	5,7	80,8	7,1
23	3,85	2,20	3,5	4,3	7,3	0,72	6,58	199,1	0,53	3,92	12,0	6,4	81,7	7,8
24	3,73	2,13	3,41	4,16	7,4	0,68	6,73	215,5	0,51	3,77	10,6	5,4	82,6	6,5
25	3,81	2,18	3,49	4,28	7,0	0,71	6,29	188,9	0,55	3,81	9,2	5,1	80,9	6,3
26	3,73	2,13	3,4	4,28	7,2	0,79	6,41	200,6	0,53	3,92	15,3	8,1	81,8	9,9
27	3,73	2,13	3,4	4,24	7,6	0,76	6,84	221,1	0,50	3,75	10,3	5,1	82,9	6,2
28	3,69	2,11	3,37	4,21	6,5	0,76	5,74	172,4	0,59	3,80	12,8	7,5	79,8	9,4
29	3,85	2,20	3,52	4,44	7,5	0,83	6,67	203,3	0,53	4,17	18,5	9,7	81,9	11,9
30	3,75	2,14	3,42	4,22	7,2	0,72	6,48	202,4	0,53	3,89	13,7	7,3	81,9	8,9
31	3,75	2,14	3,42	4,28	7,6	0,77	6,83	218,5	0,50	3,79	10,8	5,4	82,8	6,5
32	3,77	2,15	3,45	4,27	6,7	0,74	5,96	176,8	0,58	3,84	11,3	6,5	80,1	8,2
33	3,83	2,19	3,5	4,36	7,4	0,77	6,63	202,8	0,53	3,98	13,7	7,2	81,8	8,9
34	3,83	2,19	3,5	4,32	6,7	0,74	5,96	172,4	0,59	3,91	11,7	6,9	79,8	8,6
35	3,86	2,21	3,5	4,43	7,4	0,84	6,56	197,5	0,53	3,94	12,6	6,7	81,7	8,2
36	3,81	2,18	3,48	4,28	6,8	0,72	6,08	179,3	0,57	3,84	10,3	5,9	80,3	7,4
37	3,77	2,15	3,44	4,25	6,8	0,73	6,07	181,8	0,57	3,86	12,2	6,9	80,5	8,6
38	3,81	2,18	3,48	4,31	6,7	0,75	5,95	173,4	0,58	3,89	11,8	6,9	79,9	8,6
39	3,72	2,13	3,4	4,14	6,7	0,67	6,03	183,9	0,56	3,90	14,7	8,3	80,6	10,3
40	3,8	2,17	3,48	4,33	6,8	0,77	6,04	177,9	0,58	4,04	16,1	9,3	80,2	11,6
Ort.	3,75	2,14	3,42	4,21	7,1	0,71	6,42	200,3	0,53	3,85	12,5	6,6	81,7	8,14
Maks.	3,86	2,21	3,52	4,44	7,8	0,84	7,07	233,9	0,59	4,17	18,5	9,7	83,5	11,9
Min.	3,47	1,98	3,16	3,89	6,5	0,59	5,74	172,4	0,48	3,41	7,9	4,1	79,8	5,0

Tablo 4.10: 1,6 cm çaplı CN numunelerinin genişleme sonrası fiziksel özellikleri.

Genleşme Öncesi			Genleşme Sonrası											
Kod	W _k (gr)	V (cm ³)	W _k (gr)	W _p + W _k (gr)	V _p + V (cm ³)	V _p (cm ³)	V (cm ³)	GO (%)	γ (gr/cm ³)	W _d (gr)	S _a (%)	S _h (%)	p (%)	D (%)
1	3,92	2,15	3,62	4,32	5,4	0,63	4,77	121,5	0,76	4,01	10,8	8,2	73,9	11,1
2	3,92	2,15	3,65	4,38	6,5	0,66	5,84	171,3	0,62	3,96	8,5	5,3	78,5	6,8
3	3,82	2,10	3,52	4,41	6,4	0,80	5,60	166,8	0,63	3,98	13,1	8,2	78,4	10,5
4	3,82	2,10	3,54	4,23	6,4	0,62	5,78	175,3	0,61	3,86	9,0	5,5	78,9	7,0
5	3,89	2,14	3,61	4,41	6,3	0,72	5,58	161,1	0,65	3,96	9,7	6,3	77,8	8,1
6	3,89	2,14	3,60	4,44	6,5	0,76	5,74	168,7	0,63	3,96	10,0	6,3	78,5	8,0
7	3,91	2,15	3,61	4,28	6,4	0,60	5,80	169,8	0,62	3,95	9,4	5,9	78,6	7,5
8	3,91	2,15	3,65	4,49	6,0	0,76	5,24	144,1	0,70	4,01	9,9	6,9	76,1	9,0
9	3,97	2,18	3,66	4,27	6,7	0,55	6,15	182,0	0,60	3,97	8,5	5,0	79,6	6,3
10	3,97	2,18	3,66	4,31	6,7	0,59	6,12	180,3	0,60	4,01	9,6	5,7	79,4	7,2
11	3,79	2,08	3,53	4,25	6,2	0,65	5,55	166,6	0,64	3,88	9,9	6,3	78,2	8,1
12	3,79	2,08	3,49	4,13	6,2	0,58	5,62	170,1	0,62	3,8	8,9	5,5	78,7	7,0
13	3,85	2,12	3,57	4,25	6,3	0,61	5,69	168,9	0,63	3,92	9,8	6,2	78,4	7,8
14	3,85	2,12	3,59	4,32	5,9	0,66	5,24	147,9	0,68	3,87	7,8	5,3	76,5	7,0
15	3,81	2,09	3,54	4,20	6,2	0,59	5,61	167,8	0,63	3,87	9,3	5,9	78,3	7,5
16	3,81	2,09	3,52	4,24	6,1	0,65	5,45	160,4	0,65	3,86	9,7	6,2	77,8	8,0
17	3,80	2,09	3,49	4,21	6,2	0,65	5,55	165,9	0,63	3,8	8,9	5,6	78,4	7,1
18	3,97	2,18	3,68	4,49	6,7	0,73	5,97	173,7	0,62	4,03	9,5	5,9	78,8	7,4
19	3,97	2,18	3,67	4,49	6,6	0,74	5,86	168,7	0,63	4,07	10,9	6,8	78,5	8,7
20	3,93	2,16	3,67	4,42	6,3	0,68	5,63	160,5	0,65	3,95	7,6	5,0	77,6	6,4
21	3,93	2,16	3,63	4,28	6,2	0,59	5,62	160,0	0,65	3,91	7,7	5,0	77,8	6,4

Tablo 4.10 (devam):

Genleşme Öncesi			Genleşme Sonrası											
Kod	W _k (gr)	V (cm ³)	W _k (gr)	W _p + W _k (gr)	V _p + V (cm ³)	V _p (cm ³)	V (cm ³)	GO (%)	γ (gr/cm ³)	W _d (gr)	S _a (%)	S _h (%)	p (%)	D (%)
22	3,89	2,14	3,68	4,26	6,2	0,52	5,68	165,7	0,65	3,93	6,8	4,4	77,7	5,7
23	3,89	2,14	3,61	4,40	6,3	0,71	5,59	161,5	0,65	3,93	8,9	5,7	77,8	7,4
24	3,87	2,13	3,58	4,25	6,7	0,60	6,10	186,7	0,59	3,96	10,6	6,2	79,8	7,8
25	3,87	2,13	3,61	4,34	6,3	0,66	5,64	165,4	0,64	3,95	9,4	6,0	78,0	7,7
26	3,82	2,10	3,55	4,22	6,2	0,60	5,60	166,7	0,63	3,87	9,0	5,7	78,2	7,3
27	3,82	2,10	3,55	4,30	6,2	0,68	5,53	163,2	0,64	3,89	9,6	6,2	77,9	7,9
28	3,86	2,12	3,59	4,26	6,2	0,60	5,60	163,9	0,64	3,89	8,4	5,4	78,0	6,9
29	3,86	2,12	3,59	4,35	5,8	0,68	5,12	141,2	0,70	3,89	8,4	5,9	75,9	7,7
30	3,80	2,09	3,53	4,31	6,2	0,70	5,50	163,3	0,64	3,89	10,2	6,5	77,9	8,4
31	3,80	2,09	3,52	4,23	6,3	0,64	5,66	171,1	0,62	3,86	9,7	6,0	78,6	7,6
32	3,97	2,18	3,69	4,48	6,4	0,71	5,69	160,8	0,65	4,06	10,0	6,5	77,7	8,4
33	3,97	2,18	3,67	4,50	6,3	0,75	5,55	154,6	0,66	3,99	8,7	5,8	77,3	7,5
34	3,88	2,13	3,59	4,45	6,3	0,77	5,53	159,2	0,65	3,93	9,5	6,2	77,7	7,9
35	3,88	2,13	3,59	4,32	6,4	0,66	5,74	169,4	0,63	4,01	11,7	7,3	78,5	9,3
36	3,88	2,13	3,61	4,36	6,3	0,68	5,63	163,9	0,64	3,92	8,6	5,5	77,9	7,1
37	3,88	2,13	3,61	4,36	6,3	0,68	5,63	163,9	0,64	3,89	7,8	5,0	77,9	6,4
38	3,85	2,12	3,56	4,44	6,6	0,79	5,81	174,6	0,61	3,89	9,3	5,7	78,9	7,2
39	3,85	2,12	3,59	4,30	6,1	0,64	5,46	158,2	0,66	3,91	8,9	5,9	77,4	7,6
40	3,76	2,07	3,48	4,38	6,3	0,81	5,49	165,7	0,63	3,83	10,1	6,4	78,2	8,2
Ort.	3,87	2,13	3,59	4,33	6,3	0,67	5,62	164,3	0,64	3,93	9,3	6,0	78,0	7,7
Maks.	3,97	2,18	3,69	4,50	6,7	0,81	6,15	186,7	0,76	4,07	13,1	8,2	79,8	11,1
Min.	3,76	2,07	3,48	4,13	5,4	0,52	4,77	121,5	0,59	3,80	6,8	4,4	73,9	5,7

4.3.3. Küçük Boy ($\varnothing=1,45$ cm) Agregaların Mekanik Özellikleri

Her gruptan kırk adet geliştirilen numunelerin yenilme yükleri belirlenmiştir. Numunelerin kırılma dayanımı değerleri ise araştırmacılar tarafından önerilen ampirik formüller yardımıyla belirlenmiştir. Yenilme deneyleri sonucunda CB* numunelerinin en düşük yenilme yükü 105,9 N, en yüksek yenilme yükü 274,7 N bulunurken ortalama olarak 172,2 N olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.11). CB* numunelerinin kırılma dayanımı değerleri ise maksimum 0,97 MPa, minimum 0,37 MPa ve ortalama 0,61 MPa olarak bulunmuştur (Tablo 4.11). CN numunelerinin en yüksek, en düşük ve ortalama yenilme yükleri sırasıyla 280,6 N, 101 N ve 159,6 N olarak bulunurken, en yüksek, en düşük ve ortalama kırılma dayanım değerleri de sırasıyla 0,99 MPa, 0,36 MPa ve 0,56 MPa olarak belirlenmiştir (Tablo 4.11). Genleştirilen AR* numunelerinin en yüksek, en düşük ve ortalama yenilme yükleri sırasıyla 273,7 N, 96,1 N ve 172 N olarak bulunurken, en yüksek, en düşük ve ortalama kırılma dayanımı değerleri ise sırasıyla 0,96 MPa, 0,34 MPa ve 0,61 MPa olarak belirlenmiştir.

4.3.4. Büyük Boy ($\varnothing=1,6$ cm) Agregaların Mekanik Özellikleri

Küçük boy agregalarda olduğu gibi bu boyuttaki agregalardan da her grup için kırk adet numune geliştirilmiş olup, her bir agreganın yenilme yükleri belirlenmiştir. Agregaların kırılma dayanımı değerleri de araştırmacıların önermiş olduğu denklem 3.3 yardımıyla belirlenmiştir. Yenilme deneyleri sonucunda CB* numunelerinin en düşük yenilme yükü 84,4 N, en yüksek yenilme yükü 279,6 N bulunurken ortalama olarak 183 N olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.12). CB* numunelerinin kırılma dayanımı değerleri ise maksimum 0,81 MPa, minimum 0,24 MPa ve ortalama 0,53 MPa olarak bulunmuştur (Tablo 4.12). CN numunelerinin en yüksek, en düşük ve ortalama yenilme yükleri sırasıyla 270,8 N, 69,7 N ve 134,9 N olarak bulunurken, en yüksek, en düşük ve ortalama kırılma dayanımı değerleri de sırasıyla 0,78 MPa, 0,2 MPa ve 0,39 MPa olarak belirlenmiştir (Tablo 4.12). Genleştirilen AR* numunelerinin en yüksek, en düşük ve ortalama yenilme yükleri sırasıyla 291,4 N, 124,6 N ve 199,3 N olarak bulunurken, en yüksek, en düşük ve ortalama kırılma dayanımı değerleri ise sırasıyla 0,84 MPa, 0,36 MPa ve 0,58 MPa olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.11: 1,45 cm çaplı numunelerinin genişleme sonrası yenilme yükleri ve kırılma dayanımı değerleri.

Numune kodu	CB*		CN		AR*	
	F _c (N)	C (MPa)	F _c (N)	C (MPa)	F _c (N)	C (MPa)
1	198,2	0,70	150,1	0,53	103,0	0,36
2	139,3	0,49	172,7	0,61	120,7	0,42
3	152,1	0,54	280,6	0,99	142,2	0,50
4	164,8	0,58	161,9	0,57	207,0	0,73
5	198,2	0,70	156,0	0,55	188,4	0,66
6	127,5	0,45	161,9	0,57	185,4	0,65
7	142,2	0,50	136,4	0,48	96,1	0,34
8	144,2	0,51	149,1	0,52	135,4	0,48
9	207,0	0,73	103,0	0,36	187,4	0,66
10	144,2	0,51	130,5	0,46	172,7	0,61
11	163,8	0,58	256,0	0,90	150,1	0,53
12	253,1	0,89	218,8	0,77	173,6	0,61
13	239,4	0,84	109,9	0,39	138,3	0,49
14	158,9	0,56	120,7	0,42	173,6	0,61
15	210,9	0,74	170,7	0,60	182,5	0,64
16	190,3	0,67	193,3	0,68	139,3	0,49
17	114,8	0,40	129,5	0,46	164,8	0,58
18	161,9	0,57	133,4	0,47	188,4	0,66
19	257,0	0,90	104,0	0,37	149,1	0,52
20	169,7	0,60	215,8	0,76	196,2	0,69
21	139,3	0,49	155,0	0,55	242,3	0,85
22	182,5	0,64	164,8	0,58	193,3	0,68
23	274,7	0,97	224,6	0,79	224,6	0,79
24	135,4	0,48	118,7	0,42	215,8	0,76
25	135,4	0,48	114,8	0,40	115,8	0,41
26	126,5	0,45	170,7	0,60	127,5	0,45
27	157,9	0,56	133,4	0,47	141,3	0,50
28	191,3	0,67	185,4	0,65	175,6	0,62
29	105,9	0,37	145,2	0,51	222,7	0,78
30	179,5	0,63	114,8	0,40	219,7	0,77
31	135,4	0,48	161,9	0,57	198,2	0,70
32	126,5	0,45	167,8	0,59	198,2	0,70
33	196,2	0,69	199,1	0,70	149,1	0,52
34	145,2	0,51	101,0	0,36	205,0	0,72
35	233,5	0,82	157,9	0,56	170,7	0,60
36	150,1	0,53	129,5	0,46	169,7	0,60
37	215,8	0,76	194,2	0,68	117,7	0,41
38	176,6	0,62	114,8	0,40	163,8	0,58
39	156,0	0,55	175,6	0,62	273,7	0,96
40	188,4	0,66	199,1	0,70	160,9	0,57
Maks.	274,7	0,97	280,6	0,99	273,7	0,96
Min.	105,9	0,37	101,0	0,36	96,1	0,34
Ort.	172,2	0,61	159,6	0,56	172,0	0,61

Tablo 4.12: 1,6 cm çaplı numunelerinin genişleme sonrası yenilme yükleri ve kırılma dayanımı değerleri.

Numune kodu	CB*		CN		AR*	
	F _c (N)	C (MPa)	F _c (N)	C (MPa)	F _c (N)	C (MPa)
1	279,6	0,81	132,4	0,38	247,2	0,71
2	176,6	0,51	133,4	0,39	158,9	0,46
3	158,9	0,46	138,3	0,40	175,6	0,51
4	231,5	0,67	103,0	0,30	167,8	0,48
5	138,3	0,40	141,3	0,41	222,7	0,64
6	138,3	0,40	161,9	0,47	194,2	0,56
7	265,9	0,77	166,8	0,48	207,0	0,60
8	204,0	0,59	142,2	0,41	280,6	0,81
9	190,3	0,55	126,5	0,37	196,2	0,57
10	153,0	0,44	92,2	0,27	124,6	0,36
11	204,0	0,59	145,2	0,42	190,3	0,55
12	260,0	0,75	166,8	0,48	239,4	0,69
13	227,6	0,66	133,4	0,39	199,1	0,58
14	117,7	0,34	138,3	0,40	240,3	0,69
15	228,6	0,66	98,1	0,28	167,8	0,48
16	135,4	0,39	118,7	0,34	176,6	0,51
17	150,1	0,43	100,1	0,29	188,4	0,54
18	198,2	0,57	160,9	0,47	176,6	0,51
19	179,5	0,52	114,8	0,33	153,0	0,44
20	144,2	0,42	112,8	0,33	150,1	0,43
21	227,6	0,66	108,9	0,31	172,7	0,50
22	172,7	0,50	118,7	0,34	156,0	0,45
23	160,9	0,47	80,4	0,23	194,2	0,56
24	138,3	0,40	117,7	0,34	253,1	0,73
25	228,6	0,66	187,4	0,54	153,0	0,44
26	118,7	0,34	135,4	0,39	216,8	0,63
27	208,0	0,60	153,0	0,44	236,4	0,68
28	158,9	0,46	145,2	0,42	233,5	0,67
29	274,7	0,79	69,7	0,20	218,8	0,63
30	176,6	0,51	204,0	0,59	218,8	0,63
31	158,9	0,46	132,4	0,38	291,4	0,84
32	218,8	0,63	118,7	0,34	202,1	0,58
33	84,4	0,24	80,4	0,23	163,8	0,47
34	218,8	0,63	166,8	0,48	175,6	0,51
35	175,6	0,51	101,0	0,29	209,9	0,61
36	208,0	0,60	149,1	0,43	139,3	0,40
37	156,0	0,45	181,5	0,52	191,3	0,55
38	135,4	0,39	270,8	0,78	204,0	0,59
39	139,3	0,40	115,8	0,33	250,2	0,72
40	178,5	0,52	130,5	0,38	236,4	0,68
Maks.	279,6	0,81	270,8	0,78	291,4	0,84
Min.	84,4	0,24	69,7	0,20	124,6	0,36
Ort.	183,0	0,53	134,9	0,39	199,3	0,58

5. TARTIŞMA

5.1. DEHİDROKSİLASYON REAKSİYONLARININ GENLEŞMEYE ETKİLERİ

Dehidroksilasyon, kil mineralleri veya hidroksil moleküllerini içeren minerallerin silisyum/alüminyum ile hidroksil moleküllerinin arasındaki bağların sıcaklık etkisiyle kopması sonucu hidroksil moleküllerinin ortamdaki su buharı olarak ayrılmasıdır (Mazzucato ve diğ., 1999; Heller-Kallai ve Lapidés, 2015). Klorit minerallerindeki dehidroksilasyon reaksiyonun çoğunluğu yaklaşık olarak 450-660 °C aralığında gerçekleşmektedir (Smykatz-Kloss W., 1974; Brindley ve Porter, 1978; Borggaard ve diğ., 1982; Villiéras ve diğ., 1993). Bu sıcaklık aralığında gelişen reaksiyonlar sonucunda klorit minerallerinin bünyesinde OH⁻ moleküllerinin tamamı salınmamaktadır. İlk dehidroksilasyon reaksiyonundan sonra geriye kalan OH⁻ molekülleri ise yaklaşık olarak 830 °C'de klorit minerallerinin tamamen parçalanmasıyla birlikte su buharı olarak açığa çıkmaktadır (Villiéras ve diğ., 1993).

Klorit minerallerinin dehidroksilasyon sıcaklıklarının farklılık göstermesi, minerallerin bileşimlerine bağlıdır. Buna göre, klorit minerallerinin Fe uç üyesinin dehidroksilasyon sıcaklığı, Mg uç üyesine göre daha düşüktür (Smykatz-Kloss W., 1974; Villiéras ve diğ., 1993).

Muskovit minerallerinin dehidroksilasyon reaksiyon sıcaklıkları ve süreçleri hala tartışma konusudur. Barlow ve Manning, (1999) muskovit minerallerinde dehidroksilasyon reaksiyonlarının 560°C civarında başlayıp, 800 °C'den önce tamamen gerçekleştiğini belirtmiştir. Muskovit minerallerindeki OH⁻ moleküllerinin salınması sıcaklığın yanı sıra ısıtma süresine de bağlı olup, süre arttıkça OH⁻ moleküllerinin salınma miktarı artmaktadır (Tokiwai ve Nakashima, 2010).

Sedimenter kayaların bünyesindeki organik maddeler bünyesindeki uçucu bileşenler 570 °C'ye kadar salınmaktadır (Frangipane ve diğ., 2008). Kalsit minerallerinin kalsinasyonu ise 700-900 °C aralığında gerçekleşmektedir (González-Corrochano ve diğ., 2009b; Rodriguez-Navarro ve diğ., 2009).

Cebeci, Cendere ve Arnavutköy agrega ocaklarında açığa çıkan artıklarda kütle kayıplarının büyük bir çoğunluğu endotermik reaksiyonlar sonucunda ve iki kademede gerçekleşmiştir. İlk endotermik reaksiyonların gerçekleştiği sıcaklık aralığında (520-560 °C) artık numunelerindeki kütle kayıpları % 2.5-3.5 aralığında iken ikinci endotermik reaksiyon sıcaklıkları aralığında ise

(700-750 °C) % 3-4 aralığındadır. Her üç bölgeye ait artıklarda yüksek sıcaklık altında kütle kayıplarına sebep olan ve dolayısıyla artıkların genişmesini sağlayabilecek bileşenler klorit, muskovit, kalsit mineralleri ve artıkların organik madde içerikleridir. Artıkların mineral ve organik madde içerikleri gösteriyor ki kütle kaybına sebep olan mineraller esas olarak klorit ve muskovit mineralleridir. İlk kademe 520-560 °C aralığında gerçekleşmekte ve kütle kaybına sebep olan bileşenler ise esas olarak klorit mineralleri ve az oranda da organik maddedir. Muskovit minerallerinin 560 °C civarında dehidroksilasyona uğramaya başlayıp, 800 °C'den önce ise tamamen dehidroksilasyona uğradığı dikkate alındığında, ilk kademe meydana gelen kütle kaybına az da olsa muskovit mineralleri katkı sağlamaktadır. Muskovit minerallerinin klorit minerallerine kıyasla daha yüksek sıcaklıklarda dehidroksilasyona uğraması, bu minerallerin artık numunelerinde ikinci endotermik reaksiyona (700-750 °C) sebep olan esas mineraller olduğunu gösterir (Şekil. 4.2). Klorit minerallerinin 800 °C civarında tamamen parçalanması sonucunda, ilk dehidroksilasyon reaksiyonundan arta kalan çok az miktardaki OH⁻ molekülleri ikinci kademe endotermik reaksiyon sıcaklığında salınmaktadır. Kalsit mineralleri 700-900 °C aralığında kalsinasyona uğrayarak endotermik reaksiyona sebep olmaktadır. Artıklardaki kalsit minerallerinin miktarı dikkate alındığında, kalsit minerallerinin artık numunelerinde çok az da olsa kütle kaybına sebep olduğu söylenebilir. 1100-1120 °C aralığında ekzotermik reaksiyonlar artık numunelerinin kısmen ergiyerek yeni fazlar olan hematit ile spinel minerallerinin oluştuğunu göstermektedir (Şekil 4.6).

Ortamda H₂O'nun olması durumunda, kayalarda kısmi ergime daha kolay gerçekleşmektedir (Tuttle ve Bowen, 1958; Stevens ve Clemens, 1993; Clemens ve Droop, 1998). 600 °C'de 30 dakika ısıtılan numunelerde genişmenin gerçekleşmemesi, bu numunelerde viskoz yapının yani kısmi ergimenin oluşmadığını göstermektedir. Klorit ve muskovit minerallerinin dehidroksilasyon sıcaklıkları, 600 °C'de klorit minerallerdeki OH⁻ moleküllerinin tamamına yakını, muskovit minerallerinde ise birçoğunun salındığını göstermektedir. Tokiwai ve Nakashima, (2010)'e göre muskovit minerallerinin sıcaklığa maruz kalma süresi arttıkça, kristal yapılarındaki OH⁻ molekülleri de ortamdan daha kolay uzaklaşacaktır. Buna göre, artık numuneleri 600 °C'de 30 dakika ısıtıldığında muskovit minerallerinde arta kalan OH⁻ molekülleri genişme için yeterli ergimeyi oluşturamayacaktır. Elde edilen verilere göre genişmeyi sağlayan kısmi ergimenin oluşabilmesi için artıklarda OH⁻ moleküllerini içeren bileşenlerin olması gerekmektedir. Bir anda yüksek sıcaklığa maruz bırakılan artıklardaki muskovit ve klorit minerallerindeki OH⁻ molekülleri su buharını oluşturup, artıkların ergime

sıcaklığını düşürmektedir. Oluşan su buharı, viskoz yapı sayesinde malzemede hapsolarak artıkların genişmesini sağlamaktadır. Bu durum düşünüldüğünde, muskovit, klorit ve kil minerallerinin genişmeyen malzemeler için katkı malzemesi olarak kullanılabilmesi önerilmektedir.

5.2. HAM MADDE ÖZELLİKLERİNİN GENLEŞMEYE ETKİLERİ

Genleşmeye tabi tutulacak olan malzemenin mineralojik ve jeokimyasal bileşimleri malzemenin genişmesini etkilemektedir (Riley, 1951; de' Gennaro ve diğ., 2004; González-Corrochano ve diğ., 2009b; Dondi ve diğ., 2016). Ayrıca malzemenin dane boyutu dağılımı da genişleme için önemli bir kıstas olup, dane boyu küçüldükçe malzeme daha fazla genişmektedir (Özguven ve Gündüz, 2012). Cebeci, Cendere ve Arnavutköy agrega ocağı artıklarında genişmeyi sağlayabilecek gaz kaynakları klorit, muskovit, kalsit mineralleri ve organik maddelerdir. Uçucu bileşenler içeren bu minerallerin fazla olduğu CN artıklarında genişleme oranları yaklaşık %352'ye kadar çıkmaktadır (Şekil 4.10). Uçucu bileşenlerin CN ve CB artıklarına kıyasla daha az olduğu AR artıklarında genişleme oranlarının yaklaşık %223'e ulaşması uçucu bileşenlerin genişmeyi olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Artıkların uçucu bileşen içerikleri ile uyumlu olarak Cendere artıklarının ateşte kayıp değerlerinin fazla olması bu artıkların CB ve AR artıklarına kıyasla daha fazla genişebileceğini göstermektedir (Şekil 4.10). Mineralojik ve jeokimyasal verilerin yanı sıra artıkların dane boyutu dağılımları da genişleme oranlarını etkilediği söylenebilir. Buna göre CN artıklarının dane boyutlarının CB ve AR artıklarından küçük olması CN artıklarının diğer artıklardan daha fazla genişmesini sağlamaktadır.

Artık numuneleri öncelikle 600 °C'de 30 dakika fırında bekletildikten sonra 1200-1210 °C'de genişleme testine tabi tutulduğunda, artıkların genişmediği gözlenmiştir. 600 °C sıcaklıkta muskovit ve klorit minerallerindeki OH⁻ moleküllerinin çoğu ortamdaki uzaklaştığı için genişleme gerçekleşmemiştir. Bu durum gösteriyor ki kalsit mineralleri ve organik madde içerikleri her ne kadar gaz kaynağı olarak değerlendirilse de genişmeyi tek başına sağlayabilecek etkiye sahip değildir. Genleşmenin gerçekleşebilmesi için numunelerde kısmi ergimeyi oluşturabilecek bileşenlerin bulunması gerekmektedir. Bu çalışma ise CB, CN ve AR artıklarında kısmi ergimeyi oluşturan ve genişmeyi sağlayan bileşenlerin esas olarak klorit ve muskovit minerallerinin olduğunu göstermektedir. Kalsit mineralleri ve organik madde içerikleri ise genişmeye katkı sağlayan bileşenlerdir.

Muskovit ve klorit minerallerindeki OH^- moleküllerinin sıcaklığın etkisiyle numunelerde kısmi ergimeye sebep olmasıyla birlikte klorit, muskovit, kalsit mineralleri ve organik maddelerden açığa çıkan gazlar genişmeyi sağlamaktadır. Bundan dolayı, artık numunelerinde kısmi ergime oluşturacak ve genişmeyi sağlayabilecek miktarda klorit ve muskovit minerallerinin olduğu söylenebilir.

5.3. ÜRETİLEN AGREGALARIN MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI İÇİN UYGUNLUKLARI

Genleştirilmiş kil agregaları hafif olmaları sayesinde birçok mühendislik uygulamalarında kullanıldığı bölüm 2.4'te ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Hafif olmalarının yanı sıra su emme özellikleri, kırılma dayanımları, ses ve sıcaklık yalıtım özellikleri de mühendislik uygulamalarında dikkate alınmaktadır. Bu kapsamda iki farklı boyutta üretilen CB*, CN ve AR* numunelerinin su emme değerleri piyasada üretilen LECA ürünlerine kıyasla daha az olduğu belirlenmiştir (Tablo 5.1). Ayrıca CB*, CN ve AR* numunelerinin su emme değerlerinin Ardakani ve Yazdani, (2014)'nin çalışmalarında belirlemiş oldukları su emme değerlerinden kısmen daha düşük olduğu görülmektedir (Tablo 5.1).

Bernhardt ve diğ., (2013)'nin yapmış olduğu çalışmada genleştirilmiş kil agregalarının yenilme yükleri ve bu yükler yardımıyla da agregaların kırılma dayanımları belirlenmiştir. Ampirik formüller haricinde genleştirilmiş kil agregalarının kırılma dayanımları EN 13055-1 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Araştırmacıların önermiş oldukları çalışmada elde edilen yenilme yükleri CB*, CN ve AR* agregalarının yenilme yükleri ile karşılaştırılmıştır (Tablo 5.1). Araştırmacıların bulmuş oldukları yenilme yükleri CB*, CN ve AR* numunelerinin her iki farklı boyutlarına kıyasla çoğunlukla düşük yenilme yüklerine sahip oldukları gözlenmiştir (Şekil 5.1).

Bernhardt ve diğ., (2013) yenilme yüklerinden ampirik formülle hesaplanan kırılma dayanımlarını laboratuvar örnekleri için 0,27-0,65 MPa olarak bulurken, LECA üretim tesislerinde üretilen agregalar için ise kırılma dayanımlarını 0,97-2,87 MPa aralığında hesaplamıştır (Tablo 5.1). Araştırmacılar BS EN 13055-1 standardına uygun olarak kırılma dayanım değerlerinin laboratuvar örnekleri için 1-2 MPa, LECA üretim tesislerinde üretilen agregalar için ise 3-10 MPa aralığında olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışma, standarda uygun olarak yapılan kırılma dayanım değerlerinin ampirik formüle kıyasla kısmen daha fazla olduğunu göstermektedir. Tez çalışması kapsamında elde edilen kırılma dayanım değerleri

ampirik formül yardımıyla elde edilmiş olup, Bernhardt ve diğ., (2013)'nin laboratuvar örnekleri için bulmuş oldukları kırılma dayanımı değerlerinden daha fazla olduğu belirlenmiştir (Tablo 5.1). Ayrıca LECA tarafından üretilen ve birçok mühendislik uygulamalarında kullanılan agregaların kırılma dayanımı dikkate alındığında, bu çalışmada üretilen farklı boyutlardaki her grup agregaların bu mühendislik uygulamalarında kullanılabileceği göstermektedir.



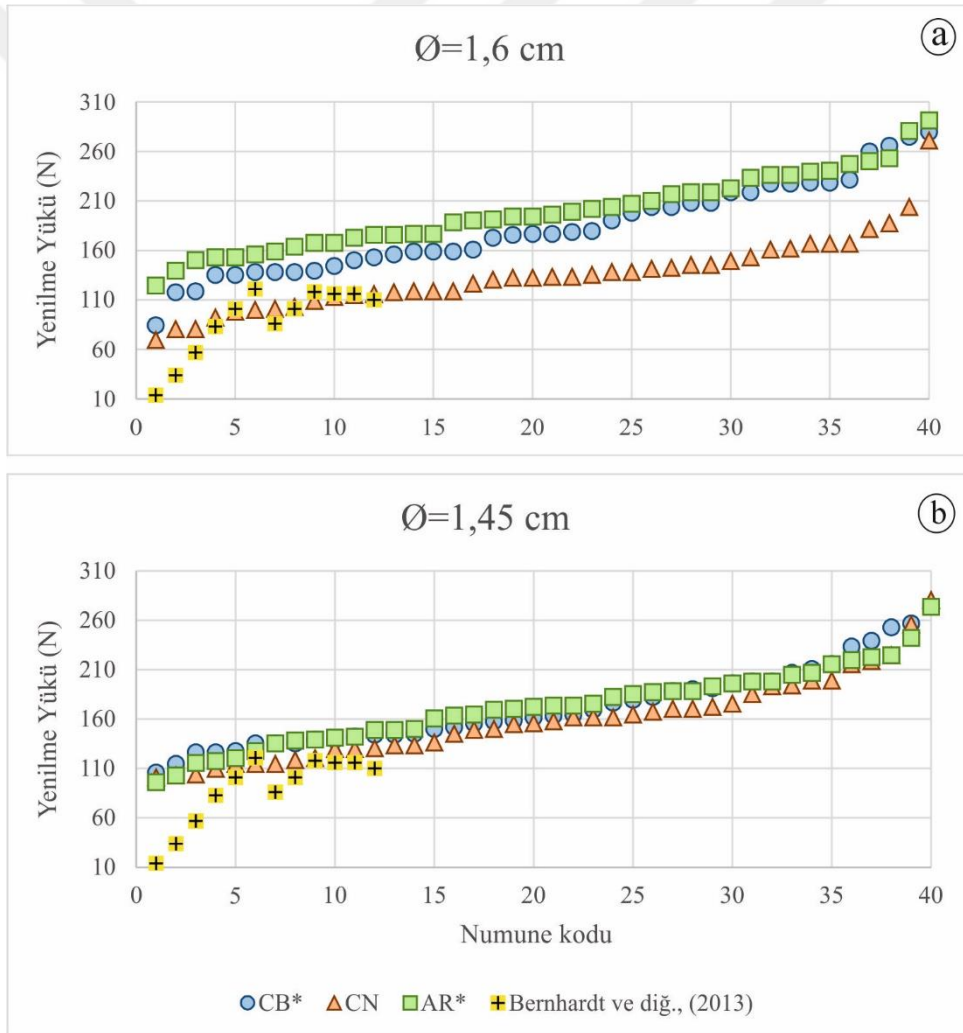
Tablo 5.1: CB*, CN ve AR* agregaları ile diğer agregaların fiziko-mekanik özellikleri.

Yapılan Çalışma		\varnothing_{ort} (mm)	S _a (%)	S _h (%)	F _c (N)	C _s (MPa)	C _h (MPa)	Genleşme sıcaklığı °C
Bu çalışma	CB*	20	6,9-11,2	4,1-7,1	105,9-274,7		0,37-0,97	1200-1210
		22,5	5,2-11,6	3,1-7,2	84,4-279,6		0,24-0,81	
	CN	20	8,3-14,69	4,7-8,52	101-280,6		0,36-0,99	
		22,5	7,9-18,5	4,1-9,7	69,7-270,8		0,2-0,78	
	AR*	20	7,5-16,1	4,6-9,3	96,1-273,7		0,34-0,96	
		22,5	6,8-13,1	4,4-8,2	124,6-291,4		0,36-0,84	
Ardakani ve Yazdani (2014)		4,1	21,6		-	1,74		1200
		7,2	22,3			1,17		
		9,6	24,1			0,87		
		14,3	26,2			0,82		
Bernhardt ve diğ. (2013)		1,9	-		14	3-10	2,87	1120
		3,6			34		1,94	
		5,3			57		1,50	
		7,1			83		1,22	
		8,8			101		0,97	
		11,7			121	0,65		
		11,4			86	0,49		
		12,8			101	0,46		
		13,8			118	0,46		
		15,3			116	0,37		
		16,0			116	0,34		
		17,3			110	0,27		
LECA			18	-	-	>0,52		1200

Ardakani ve Yazdani, (2014)'nin yapmış oldukları çalışmada üretilen agregaların kırılma dayanımları 0,82-1,74 MPa aralığında bulunmuştur (Tablo 5.1). 4,1 mm gibi daha küçük çaplı agregalarda dayanım fazla bulunurken çap arttıkça dayanım azalmıştır. Bu çalışma kapsamında üretilen küçük boy agregaların çapları araştırmacıların genişlettiği numunelerin çaplarından daha büyük olmasına rağmen, bazılarının kırılma dayanımları araştırmacıların saptamış olduğu kırılma dayanımlarından kısmen daha fazla bulunmuştur (Tablo 5.1). Büyük boy CB*, CN ve AR* agregalarının kırılma dayanımları ise araştırmacılar tarafından saptanan kırılma dayanım aralığından daha az olarak bulunmuştur. Bu çalışmalar geliştirilmiş kil agregalarında kırılma dayanımını agreganın çapının nasıl etkilediğini göstermiştir. Bu çalışmada ise geliştirilen

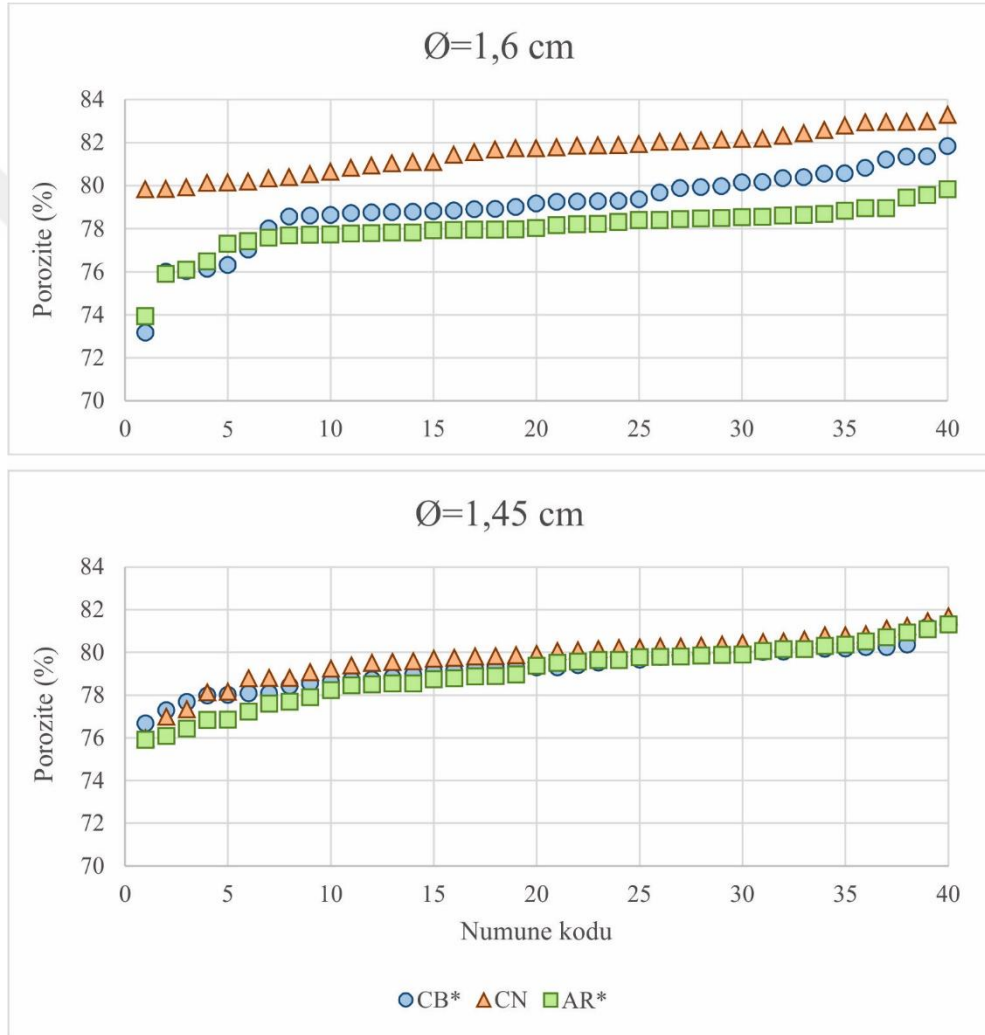
agregaların boyutları yukarıda verilen çalışmalardaki agregalara kıyasla fazla olmasına rağmen, birçoğunun kırılma dayanımları ile kıyaslanabilir olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, farklı çaplardaki numuneler genişletildikten sonra numunelerin yenilme yükleri belirlenmiştir. Buna göre genişleme öncesi çapı 1,6 cm olan numunelerin genişleme sonrası çapları ortalama olarak 2,25 cm olarak bulunmuş olup, bu numunelerin yenilme yükleri birbirleriyle kıyaslandığında AR* numunelerinin yenilme yükleri CB* ve CN'ye kıyasla fazla olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.1). CN numunelerinin yenilme yükleri ise diğer iki gruptan da az olarak bulunmuştur (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: Genleştirilen numunelerin yenilme yüklerinin karşılaştırılması.

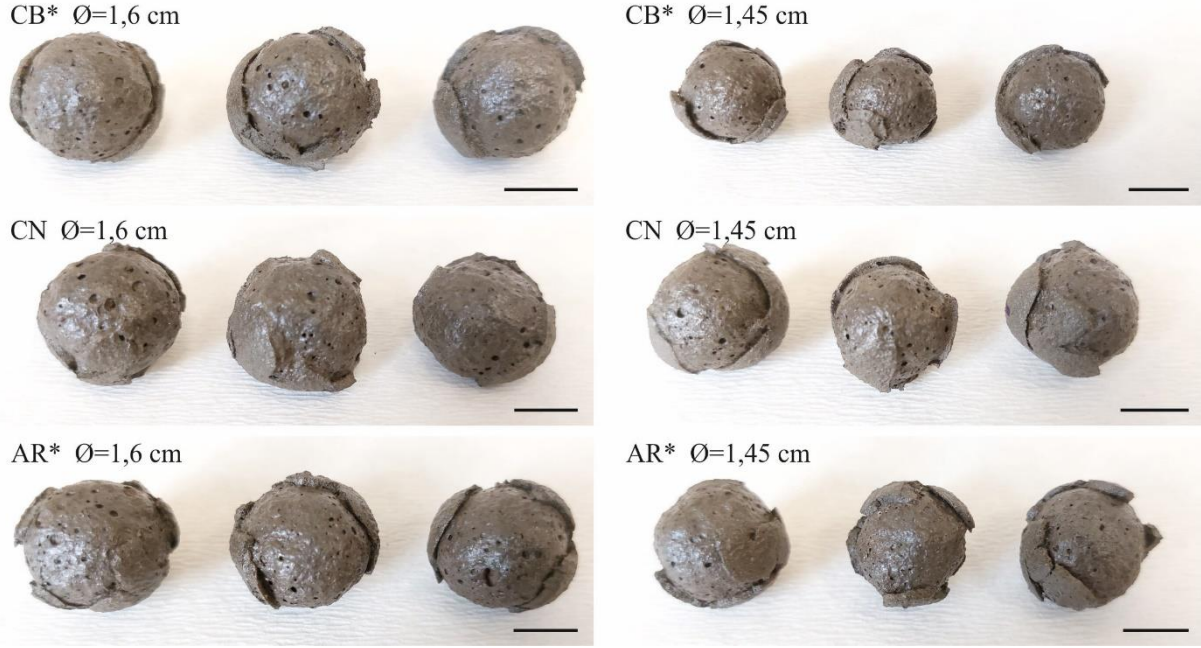
Genleşme öncesi çapı 1,45 cm olan numunelerin genleşme sonrası çapları ortalama 2 cm olarak bulunmuş olup, yenilme yükleri dikkate alındığında, büyük boy agregalara kıyasla aralarında bariz farklılıklar olmamasına rağmen AR* numunelerinin yenilme yüklerinin diğer iki gruba kıyasla fazla olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.1). AR* numunelerinin yenilme yüklerinin CB* ve CN numunelerinden kısmen daha fazla olmasının sebebi ise numunelerinin porozite değerleri ile açıklanabilir. Buna göre AR* numunelerinin porozite değerlerinin diğer gruplara kıyasla az olması yenilme yüklerinin fazla olmasını açıklamaktadır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2: Genleştirilen numunelerin porozite değerlerinin karşılaştırılması.

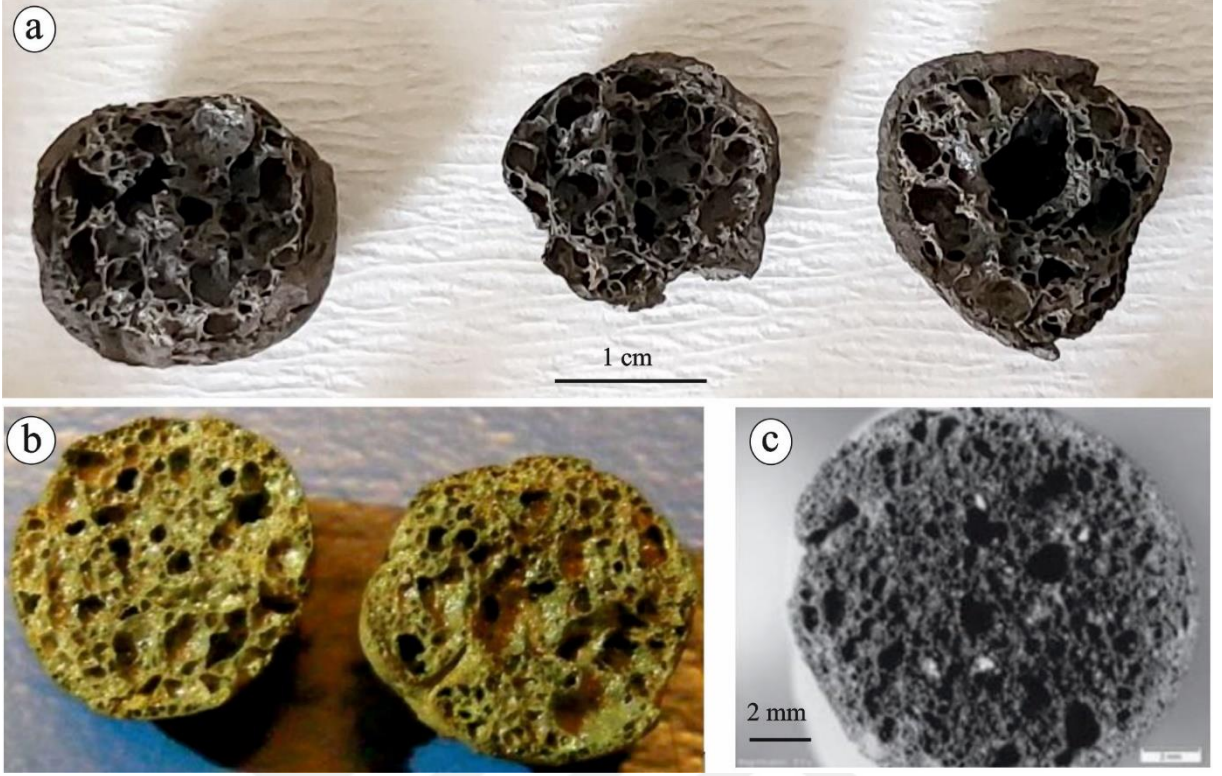
5.4. BOŞLUK BOYUTU VE DAĞILIMININ FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Sabit fırında genişletildiği zaman küresel formunu koruyamayan CB ve AR numuneleri daha iyi genişleme özelliği gösteren CN numuneleri ile karıştırılıp genişletildiği zaman kısmen daha küresel bir şekil elde edilmiştir (Şekil 5.3).



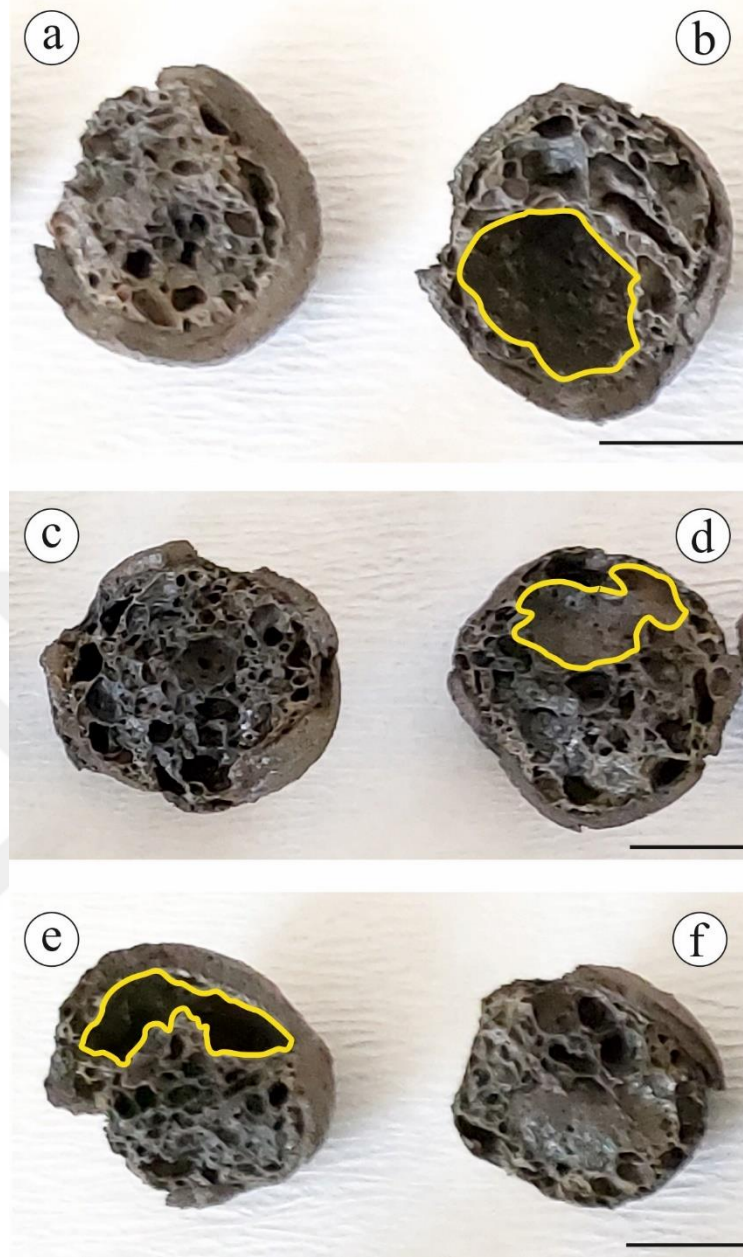
Şekil 5.3: 1,6 cm ve 1,45 cm çaplı numunelerin genişletilmiş görüntüleri (ölçekler 1 cm'dir).

Genleştirilmiş kil agregaları çoğunlukla boşluklu bir yapıya sahip olduğundan, dayanımlarını etkileyen en önemli parametre porozite olarak belirtilmiştir (Boudaghpour ve Hashemi, 2008; Bernhardt ve diğ., 2013). Bu durumda geniştirilen kil agregalarının boşluk yapısı da önem arz etmektedir. Tablo 5.1'deki bazı araştırmacılar tarafından geniştirilen kil agregalarının boşluk yapıları belirlenmiş olup, bu çalışma ile kıyaslanmıştır (Şekil 5.4). Buna göre, bu çalışmada elde edilen geniştirilmiş kil agregalarına kıyasla daha az genişleme oranlarına ve dolayısıyla düşük poroziteye sahip olmalarına rağmen yenilme yükleri ve dayanım değerleri CB*, CN ve AR* numuneleriyle çoğunlukla benzerlik göstermektedir (Tablo 5.1). Bu durumda, porozite değerlerinin yaklaşık %73-83 aralığında olmasına rağmen CB*, CN ve AR* agregalarının yukarıda belirtilen çalışmalardaki agregalarla benzer dayanım ve yenilme yüklerine sahip olması, agregaların dış tarafında bulunan sert kabuktan kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.4: Bu çalışma (a) ve diğer çalışmalarda (b: Bernhardt ve diğ., (2013); c: Ardakani ve Yazdani, (2014)) üretilen agregaların boşluk yapılarının karşılaştırılması.

Her grup numunelerinde de porozite değerlerinin %73-83 aralığında olmasına rağmen agregaların doygunluk derecesinin genleşme oranı en fazla olan CN numunelerinde bile %12'yi aşmaması boşlukların hepsinin birbiriyle bağlantılı olmadığını göstermektedir (Şekil 5.5). Genleştirme işlemleri sabit fırında gerçekleştirildiğinden, yerçekimi etkisiyle bazı numunelerde boşluk çaplarının homojen dağılmadığı ve küçük boşlukların birleşerek daha büyük boşlukları oluşturduğu gözlenmiştir (Şekil 5.5). Bu numunelerin aynı zamanda yenilme yüklerinin de düşük olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla bu durumda, eş boyutlu boşluk çapına sahip agregalarda yenilme yükleri eş boyutlu olmayan boşluk çapına sahip agregalara kıyasla kısmen fazla olduğu söylenebilir. Şekil 5.5'te verilen fotoğrafta, CB* agregalarına ait olan a ve b numunelerinin yenilme yükleri sırasıyla 218,8 N ve 84,4 N, CN agregalarına ait olan c ve d numunelerinin yenilme yükleri sırasıyla 145,2 N ve 69,7 N, AR* agregalarına ait olan e ve f numunelerinin ise yenilme yükleri sırasıyla 291,4 N ve 202,1 N olarak bulunmuştur.



Şekil 5.5: Genleştirildikten sonra a ve b: CB*, c ve d: CN, e ve f: AR* numunelerinin boşluk yapıları (ölçekler 1 cm'dir).

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

İstanbul'un Avrupa yakasındaki Cebeci, Cendere ve Arnavutköy agrega ocaklarında üretilen grovak-şeyl türü kayaç agregalarının filtre pres artıkları hem büyük bir çevre problemine hem de ekonomik kayba sebep olmaktadır. Bu çalışma kapsamında söz konusu agrega ocaklarına ait artıklar geliştirilmiş kil agregası olarak değerlendirilerek katma değerli ürün elde edilmiştir.

Genleştirme işlemleri bir litre hacme sahip fırında 1200-1210 °C aralığında gerçekleştirilmiştir. Genleşme oranlarının saptanabilmesi için silindirik numuneler 2 ila 8 dk. aralığında genleşme testlerine tabi tutulmuştur. Genleşme testleri sonucunda CN numunelerinin genleşme oranlarının CB ve AR numunelerinden fazla olduğu belirlenirken, CB numunelerinin de kısmen AR numunelerinden fazla genleştiği belirlenmiştir.

Agrega ocaklarındaki filtre pres artıklarının %90'ının dane çapları 80 µm'den küçük olup, herhangi bir öğütme işlemine tabi tutulmadan kolayca şekil verilerek geliştirilebilir. Cendere agrega ocaklarından alınan filtre pres artıklarının dane çapları diğer artıklardan daha küçük olup, genleşme oranlarına da olumlu yönde katkı sağladığı düşünülmektedir.

Üç farklı ocaktan alınan artıkların mineralojik bileşimleri benzerlik sunmakta olup, artıkların kuvars, albit, muskovit, klorit ve kalsit minerallerinden oluştuğu saptanmıştır. Cebeci, Cendere ve Arnavutköy agrega ocaklarına ait artıkların toplam uçucu mineral ve organik madde içerikleri sırasıyla %51,8, %56,8 ve %48,2 olarak bulunmuştur. Dane boyutlarının yanı sıra uçucu mineral ve organik madde içerikleri de genleşmeye olumlu yönde katkı yaptığı belirlenmiş olup, CN numunelerinin diğer numunelere kıyasla fazla genleşmesini sağlayan bir diğer etkinin de uçucu mineral ve organik madde içeriklerinin olduğu saptanmıştır. Aynı formasyona ait birimlerin agrega olarak işletilmesine rağmen CN numunelerinin CB ve AR numunelerine kıyasla daha iyi genleşmesi yıkama tesislerinin önemini ortaya koymaktadır.

Artıklarda gerçekleştirilen termal analizlerde, 750 °C'ye kadar iki endotermik reaksiyon meydana geldiği ve bu reaksiyonlar sonucunda ise artıklarda kütle kayıplarının oluştuğu belirlenmiştir. Endotermik reaksiyonlar, muskovit ve klorit minerallerinin bünyelerinde

bulunan hidroksil moleküllerin ortamdan su buharı olarak uzaklaştığını göstermektedir. Bu reaksiyonların gerçekleşmesiyle birlikte agregalarda kısmi ergime meydana gelerek oluşan gazların numunede hapsolmesini ve sıcaklıkla birlikte gazların da genişmesini dolayısıyla agregaların genişmesini sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında ortaya konulan bu bulgu, genişmeyi sağlayan asıl etkinin dehidroksilasyon reaksiyonları olduğunu göstermektedir. Ayrıca, termal analizler yaklaşık 1100-1120 °C aralığından spinel ve hematit gibi yeni mineral fazlarının da oluştuğunu ortaya koymuştur.

Silindirik halde iken geliştirilen agregalar genişleme sonucunda düzensiz şekillere sahip olduğu için, fiziko-mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi adına küre şekilli numuneler hazırlanmıştır. Cendere artıkları küresel şekilli olarak geliştirildiğinde şeklini kısmen koruyarak genişmiştir. CB ve AR artıkları ise küresel şeklini koruyamadığı için CN artıkları ile karıştırılarak genişmeye tabi tutulmuştur. Böylelikle geniştiğinde daha küresel bir şekil elde edilmiştir. Bu aşamadan sonra, ağırlıkça aynı miktarda CN karıştırılan CB ve AR numuneleri CB* ve AR* olarak adlandırılmıştır.

CB*, CN ve AR* artıkları için 1,45 cm (küçük boy) ve 1,6 cm (büyük boy) olmak üzere iki farklı boyut ve genişleme süreleri ise küçük boyutlu numuneler için 3 dk., büyük boyutlu numuneler için ise 4 dk. olarak belirlenmiştir. Süre ve boyut belirlenirken agregaların genişleme durumları ve yenilme yükleri kriter olarak alınmıştır. Buna göre genişleme oranı arttıkça yenilme yükü de azaldığı için optimum süre ve boyut belirlenmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar genişmeye tabi tutulacak malzemenin dane çapı ne kadar küçük olursa, genişleyen numunelerin yenilme yüklerinin veya kırılma dayanımlarının çapı büyük agregalara kıyasla daha fazla olacağını göstermiştir. Bu kapsamda, geliştirilecek malzemelerin dane çaplarının küçültülmesi durumunda yenilme yükleri kısmen biraz daha arttırılabilir.

Genleştirilen CB*, CN ve AR* artıklarının su emme oranları ve dayanım parametreleri, halihazırda birçok Avrupa ülkesinde üretimi yapılan ve birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılan agregalar ile benzerlik sunması, çalışma kapsamında üretilen agregaların da mühendislik uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Ardakani, A. ve Yazdani, M., 2014, The relation between particle density and static elastic moduli of lightweight expanded clay aggregates, *Applied Clay Science*, 93–94(May), 28–34. doi: 10.1016/j.clay.2014.02.017.
- Ayati, B., Ferrándiz-Mas, V., Newport, D. ve Cheeseman, C., 2018, Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, 162, 124–131. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.018.
- Barlow, S.G. ve Manning, D.A.C., 1999, Influence of time and temperature on reactions and transformations of muscovite mica, *British Ceramic Transactions*, 98(3), 122–126. doi: 10.1179/096797899680327.
- Bernhardt, M., Tellesbø, H., Justnes, H. ve Wiik, K., 2013, Mechanical properties of lightweight aggregates, *Journal of the European Ceramic Society*, 33(13–14), 2731–2743. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.05.013.
- Borggaard, O.K., Lindgreen, H.B. ve Morup, S., 1982, Oxidation and reduction of structural iron in chlorite at 480°C., *Clays and Clay Minerals*, 30(5), 353–364. doi: 10.1346/ccmn.1982.0300506.
- Boudaghpour, S. ve Hashemi, S., 2008, A Study on Light Expanded Clay Aggregate (LECA) in a Geotechnical View and its Application on Greenhouse and Greenroof Cultivation, 2(4), 59–63.
- Brindley, G.W. ve Porter, A.R.D., 1978, Occurrence of dickite in Jamaica-ordered and disordered varieties, *American Mineralogist*, 63, 462–554.
- Broch, E. ve Franklin, J.A., 1972, The point-load strength test, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 9(6), 669–676. doi: 10.1016/0148-9062(72)90030-7.
- Chen, Y., Zou, C., Mastalerz, M., Hu, S., Gasaway, C. ve Tao, X., 2015, Applications of micro-

- fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) in the geological sciences—A Review, *International Journal of Molecular Sciences*, 16(12), 30223–30250. doi: 10.3390/ijms161226227.
- Chiou, I.J., Wang, K.S., Chen, C.H. ve Lin, Y.T., 2006, Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash, *Waste Management*, 26(12), 1453–1461. doi: 10.1016/j.wasman.2005.11.024.
- Chukanov, N. V., 2014, *Infrared spectra of mineral species, Infrared spectra of mineral species: Extended library*. doi: 10.1007/978-94-007-7128-4.
- Clemens, J.D. ve Droop, G.T.R., 1998, Fluids , P – T paths and the fates of anatectic melts in the Earth ' s crust, *Lithos*, 44, 21–36.
- de' Gennaro, R., Cappelletti, P., Cerri, G., de' Gennaro, M., Dondi, M. ve Langella, A., 2004, Zeolitic tuffs as raw materials for lightweight aggregates, *Applied Clay Science*, 25(1–2), 71–81. doi: 10.1016/j.clay.2003.08.005.
- Dondi, M., Cappelletti, P., D'Amore, M., de Gennaro, R., Graziano, S.F., Langella, A., Raimondo, M. ve Zanelli, C., 2016, Lightweight aggregates from waste materials: Reappraisal of expansion behavior and prediction schemes for bloating, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, 127, 394–409. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.111.
- Ducman, V. ve Mirtič, B., 2009, The applicability of different waste materials for the production of lightweight aggregates, *Waste Management*, 29(8), 2361–2368. doi: 10.1016/j.wasman.2009.02.013.
- Fakhfakh, E., Hajjaji, W., Medhioub, M., Rocha, F., López-Galindo, A., Setti, M., Kooli, F., Zargouni, F. ve Jamoussi, F., 2007, Effects of sand addition on production of lightweight aggregates from Tunisian smectite-rich clayey rocks, *Applied Clay Science*, 35(3–4), 228–237. doi: 10.1016/j.clay.2006.09.006.
- Frangipane, G., Pistolato, M., Molinaroli, E., Guerzoni, S. ve Tagliapietra, D., 2008, Comparison of loss on ignition and thermal analysis stepwise methods for determination of sedimentary organic matter, *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 19, 24–33. doi: 10.1002/aqc.

- Franus, M., Barnat-Hunek, D. ve Wdowin, M., 2016, Utilization of sewage sludge in the manufacture of lightweight aggregate, *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(1), 1–13. doi: 10.1007/s10661-015-5010-8.
- González-Corrochano, B., Alonso-Azcárate, J. ve Rodas, M., 2009a, Characterization of lightweight aggregates manufactured from washing aggregate sludge and fly ash, *Resources, Conservation and Recycling*, 53(10), 571–581. doi: 10.1016/j.resconrec.2009.04.008.
- González-Corrochano, B., Alonso-Azcárate, J. ve Rodas, M., 2009b, Production of lightweight aggregates from mining and industrial wastes, *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2801–2812. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.03.009.
- González-Corrochano, B., Alonso-Azcárate, J., Rodas, M., Barrenechea, J.F. ve Luque, F.J., 2011, Microstructure and mineralogy of lightweight aggregates manufactured from mining and industrial wastes, *Construction and Building Materials*, 25(8), 3591–3602. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.053.
- Gözübol, A. M., Aysal, N., 2008, Cebeciköy kireçtaşı ocaklarında litolojik ve yapısal kökenli işletme sınırları, *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 21, 1, 25-35.
- Gridi-Bennadji, F., Beneu, B., Laval, J.P. ve Blanchart, P., 2008, Structural transformations of Muscovite at high temperature by X-ray and neutron diffraction, *Applied Clay Science*, 38(3–4), 259–267. doi: 10.1016/j.clay.2007.03.003.
- Han, M.C., Han, D. ve Shin, J.K., 2015, Use of bottom ash and stone dust to make lightweight aggregate, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, 99, 192–199. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.036.
- Heller-Kallai, L. ve Lapidés, I., 2015, Dehydroxylation of muscovite: study of quenched samples, *Physics and Chemistry of Minerals*, Springer Berlin Heidelberg, 42(10), 835–845. doi: 10.1007/s00269-015-0767-4.
- Huang, C.H. ve Wang, S.Y., 2013, Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, 43, 174–183. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.016.

- Hung, M.F. ve Hwang, C.L., 2007, Study of fine sediments for making lightweight aggregate, *Waste Management and Research*, 25(5), 449–456. doi: 10.1177/0734242X07077615.
- Jaeger, J.C., 1967, Failure of rocks under tensile conditions, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 4(2), 219–227. doi: 10.1016/0148-9062(67)90046-0.
- Kaya, O., 1971, İstanbul'un Karbonifer stratigrafisi, *Türkiye Jeol. Kur. Bült.*, XIV, 2, 143-199.
- Loutou, M. ve Hajjaji, M., 2017, Clayey wastes-based lightweight aggregates: Heating transformations and physical/mechanical properties, *Applied Clay Science*, Elsevier Ltd, 150, 56–62. doi: 10.1016/j.clay.2017.09.011.
- Loutou, M., Hajjaji, M., Mansori, M., Favotto, C. ve Hakkou, R., 2013, Phosphate sludge: Thermal transformation and use as lightweight aggregate material, *Journal of Environmental Management*, Elsevier Ltd, 130, 354–360. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.09.004.
- Mazzucato, E., Artioli, G. ve Gualtieri, A., 1999, High temperature dehydroxylation of muscovite-2M1: A kinetic study by in situ XRPD, *Physics and Chemistry of Minerals*, 26(5), 375–381. doi: 10.1007/s002690050197.
- McDowell, G.R., Bolton, M.D. ve Robertson, D., 1996, The fractal crushing of granular materials, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 44(12), 2079–2102. doi: 10.1557/s0883769400058747.
- Özgüven, A. ve Gündüz, L., 2012, Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate, *Cement and Concrete Composites*, Elsevier Ltd, 34(6), 781–787. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.02.007.
- Pioro, L.S. ve Pioro, I.L., 2004, Production of expanded-clay aggregate for lightweight concrete from non-selfbloating clays, *Cement and Concrete Composites*, 26(6), 639–643. doi: 10.1016/S0958-9465(03)00103-3.
- Riley, C.M., 1951, Relation of Chemical Properties to the Bloating of Clays, *Journal of the American Ceramic Society*, 34(4), 121–128. doi: 10.1111/j.1151-2916.1951.tb11619.x.

- Ritz, M., Vaculíková, L., Plevová, E., Matýsek, D. ve Mališ, J., 2012, Determination of chlorite, muscovite, albite and quartz in claystones and clay shales by infrared spectroscopy and partial least-squares regression, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 9(4), 511–520.
- Rodriguez-Navarro, C., Ruiz-Agudo, E., Luque, A., Rodriguez-Navarro, A.B. ve Ortega-Huertas, M., 2009, Thermal decomposition of calcite: Mechanisms of formation and textural evolution of CaO nanocrystals, *American Mineralogist*, 94(4), 578–593. doi: 10.2138/am.2009.3021.
- Russell, J.D. ve Fraser, A.R., 1994, Infrared methods, *Clay Mineralogy: Spectroscopic and Chemical Determinative Methods* içinde, Wilson, M. J. (ed.), 11–67. doi: 10.1063/1.3057869.
- Schroeder, P., 2002, Infrared spectroscopy in clay science, *Teaching clay science* içinde, Rule, A. ve Guggenheim, S. (ed.), 181–206.
- Smykatz-Kloss W., 1974, *Differential Thermal Analysis: Application and Results in Mineralogy*. 1. baskı, Editör P. J. Wyllie, W. V. Engelhardt, ve T. Hahn, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-65951-5.
- Studel, A., Kleeberg, R., Koch, C.B., Friedrich, F. ve Emmerich, K., 2016, Thermal behavior of chlorites of the clinocllore-chamosite solid solution series: Oxidation of structural iron, hydrogen release and dehydroxylation, *Applied Clay Science*, Elsevier B.V., 132–133, 626–634. doi: 10.1016/j.clay.2016.08.013.
- Stevens, G. ve Clemens, J.D., 1993, Fluid-absent melting and the roles of fluids in the lithosphere : a slanted summary ?, *Chemical Geology*, 108, 1–17.
- Tokiwai, K. ve Nakashima, S., 2010, Dehydration kinetics of muscovite by in situ infrared microspectroscopy, *Physics and Chemistry of Minerals*, 37(2), 91–101. doi: 10.1007/s00269-009-0313-3.
- TS EN 1936, 2006, Natural stone test method- Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity.
- TS EN 1097-6, 2022, Standards Publication Tests for mechanical and physical properties of aggregates Part 6 : Determination of particle density and water absorption.

- Tuttle, O.F. ve Bowen, N.L., 1958, Origin of granite in the light of experimental studies in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-KAlSi}_3\text{O}_8\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$, *Geological Society of America Bulletin*, 104, 1–145.
- Tuğrul, A., Aysal, N., Yılmaz M., Çinku K., Hoşgörmez H., Gözübol, A.M., Özer, Ü., Öztoprak, S., Onat, B., Karadoğan, A., Küçükdeniz, T., Şahin, Ü.A, 2018, Cebeci Maden Bölgesi Proje Raporu, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara, Türkiye.
- Villieras, F., Yvon, J., François, M., Maurice^Cases, J., Lhote, F. ve Uriot, J.P., 1993, Micropore formation due to thermal decomposition of hydroxide layer of Mg-chlorites: interactions with water, *Applied Clay Science*, 8(2–3), 147–168. doi: 10.1016/0169-1317(93)90034-X.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

İstanbul Avrupa Yakası Taş Ocaklarında Açığa Çıkan Kumtaşı-Şeyl Atıklarının Genleştirilmiş Kil Agregası Olarak Değerlendirilmesi

ORIGINALITY REPORT

3%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	acikbilim.yok.gov.tr Internet	132 words — 1%
2	lisansustu.omu.edu.tr Internet	64 words — < 1%
3	docplayer.biz.tr Internet	30 words — < 1%
4	dergipark.org.tr Internet	27 words — < 1%
5	Pengcheng Jiao, Manish Roy, Kaveh Barri, Ronghua Zhu, Indrajit Ray, Amir H. Alavi. "High-performance fiber reinforced concrete as a repairing material to normal concrete structures: Experiments, numerical simulations and a machine learning-based prediction model", Construction and Building Materials, 2019 Crossref	20 words — < 1%
6	Cesur, Sidika. "İsitsel uyarılmış P1-N1-P2 Kortikal Potansiyellerle esik İncelemesi.", Marmara Üniversitesi (Turkey), 2021 ProQuest	16 words — < 1%

nek.istanbul.edu.tr:4444

KURUM İZİNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

- Kurum izni gerekmektedir.
- Kurum izni gerekmemektedir.



Erdi AVCI